

**Diseño, Desarrollo, Caracterización y Análisis de  
Sensores de Fibras Ópticas: Aplicación al Estudio de  
Materiales y Estructuras**

Tesis de doctorado

**ING. ANGÉLICA MARÍA MESA YANDY**

**Presentado ante la  
Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de la Plata  
Como requisito para la obtención del grado académico de**

**DOCTORA EN INGENIERÍA**

Dirección de Tesis:

*Dr. Ricardo Duchowicz, Dra. Nélida Russo*

Jurado de Tesis:

*Dr. Marcelo Trivi, Dr. Enrique Sicre y Dr. Jorge Torga*

Fecha de la defensa oral y pública:

4 de Abril de 2018

# **Diseño, Desarrollo, Caracterización y Análisis de Sensores de Fibras Ópticas: Aplicación al Estudio de Materiales y Estructuras**

Tesis doctoral presentada por

**ING. ANGÉLICA MARÍA MESA YANDY**



Ante la  
**Facultad de Ingeniería de la  
Universidad Nacional de la Plata**  
Para acceder al grado académico de  
**DOCTORA EN INGENIERÍA**

Dirección de la Tesis

**Dr. Ricardo Duchowicz y Dra. Nélica Russo**

**Lugar de realización: Centro de Investigaciones Ópticas - CIOp  
(CONICET – CIC - UNLP)**

La Plata

Argentina

2018

***Dedicado a Dios, a mis padres, al amor de mi vida Andrés y a mi familia***

A la memoria de mi *padre Oscar Arenas* que desde cielo celebra con orgullo la culminación de mi tesis doctoral y a *mi madre Luz Marina Yandy* que con amor y mucho esfuerzo luchó para que saliéramos adelante, siempre creyó en mis capacidades y me brindó palabras de aliento para seguir adelante y perseverar.

Se la dedico con todo mi amor a *Andrés* por su confianza, amor, apoyo y comprensión en todo momento. No puedo dejar de expresar lo feliz que me siento de alcanzar juntos otro logro grande en nuestras vidas.

A mi hermano *Alejandro Mesa*, su esposa *Carolina Carballo* y mis sobrinos *Eric* y *Nicholas*, en fin, a *toda mi familia tíos y primos* porque siempre están presentes de una u otra manera apoyándome y alentándome para que cumpla mis sueños.

También quiero resaltar a toda la familia de Andrés mencionando en especial a *Melba Lida Mejía*, *Luis Carlos Escobar* y *Nelly Mejía* porque me han hecho parte de su familia y su apoyo ha sido incondicional.

## **Agradecimientos**

---

Primero que todo agradezco a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por haberme guiado y dado fortaleza para seguir adelante siempre, por haber puesto en mi camino todas aquellas personas que han sido mi soporte y por haberme guiado para formarme en el doctorado en este país tan maravilloso, Argentina, en la Ciudad de La Plata, no tengo sino buenos recuerdos de momentos y personas maravillosas.

Un agradecimiento muy merecido a mis Directores Dr. Ricardo Duchowicz y Dra. Nélida Russo por toda la paciencia, dedicación y apoyo a lo largo de estos años para guiarme en el desarrollo de mi tesis Doctoral. Quisiera destacar su desempeño como directores y también su calidad humana.

A las autoridades del Centro de Investigaciones Ópticas por permitirme utilizar sus instalaciones para llevar a cabo mi tarea. ¡Gracias a toda la familia del CIOp que, de una u otra manera han sido claves no solo en mi vida profesional sino como persona, que lindos momentos compartidos!

Quiero resaltar el “Grupo de Fibras – Dr. Ricardo Duchowicz, Dra. Nélida Russo, Ing. Sergio Noriega, Tèc. Emanuel Vaio, Ing. Daniel Aredes, Ing. Guillermo Castiglioni e Ing. Juan Ciciarelli” porque tuve siempre un muy buen ambiente de trabajo y compañerismo. Destaco en especial a Emanuel Vaio porque no solo fue un compañero, sino también amigo dispuesto a colaborar, y puso una muy buena chispa de humor al grupo. También no quiero dejar atrás a mis compañeros de grupo y oficina me brindaron una linda amistad y compañerismo, Emanuel Paulucci, Laureano Bulus y Alejandro Giordana.

Al concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – CONICET y a la Comisión de Investigaciones Científicas - CIC por financiar mi doctorado. En este punto quisiera agradecer a Christian Cuadrado por colaborarme en la gestión de la beca con el CONICET y también al CD del CIOp por la gestión de la beca de la CIC.

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por la formación académica del Doctorado y el apoyo administrativo del Doctorado.

Agradezco al Dr. Miguel V. Andrés y al Dr. José Luis Cruz del Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia – España, porque su colaboración fue clave para mi formación. Gracias a dicha colaboración fue posible realizar una estadía que me permitió enriquecer mi formación profesional. En este punto también quisiera mencionar a Dra. Martina Delgado, Dr. Antonio Díez, Dr. Jaime Cascante, Ing. Antonio Carrascosa, Ing. Manuel Sevillano, Ing. Erica Alcusa, en especial a Dr. Luis Jorge Poveda Wong, y al Dr. Braulio García Domene. En si agradezco a todo el grupo de Fibras porque hicieron que mi estadía en Valencia fuera acogedora. El trabajo en conjunto ha conducido a la presentación de los resultados en diferentes congresos nacionales e internacionales.



## *Agradecimientos*

Gracias al Dr. Gustavo Arenas y al Ing. Julián Antonacci de la Universidad Nacional de Mar de Plata no solo por el gusto de haber trabajado juntos si no por la linda amistad. Además, también quiero agradecer a la Dra. Claudia Vallo del INTEMA por su contribución en este trabajo. El trabajo en conjunto ha conducido a la presentación de los resultados en diferentes congresos nacionales e internacionales. También agradezco al Dr. Raúl Zerbino y la Dra. Graciela M. Giaccio de la Universidad Nacional de la Plata y el LEMIT-CIC por la grata experiencia de haber trabajado en conjunto, lo cual redundo además en la publicación de artículos científicos y la asistencia a congresos tanto nacionales como internacionales.

Gracias a todos los amigos que sin esperar nada a cambio estuvieron allí para apoyarme cuando más lo he necesitado como son Jérica Santillán, David Muñetón Arboleda, Roxana Romero, Valeria Arce, Lila Lopardo, Cecilia Martínez, Emanuel Vaio y sus familias.

No puedo dejar de mencionar a todos los amigos que hicieron parte de mi vida personal, Antonia Varano y toda su familia cuyo apoyo fue incondicional.

Karen Salcedo, Jorge Gallego, Gonzalo Zubia, Melina Gaona, Veronica Ficosseco, Andrea López, Juan Restrepo, Angela Moreno, Lorena Calambas, Fredy Barrera, Sorayda Trejos, todos amigos con los que compartí muy gratos eh inolvidables momentos, su amistad y apoyo moral han aportado un alto porcentaje para seguir adelante.

Estando lejos de nuestro país natal, todas estas personas maravillosas se convierten en nuestras familias y sin su apoyo se haría muy difícil culminar esta meta.

En fin, esta lista tiende a crecer cuando pienso en lo afortunada que fui al tener la oportunidad de hacer mi tesis doctoral en el mismo centro que mi pareja y contar siempre con personas tan extraordinarias, nunca me sentí sola siempre tuve apoyo. Además, de una formación profesional y personal que no tiene precio.

Finalmente quisiera agradecer a los Jurados de Tesis por su colaboración y aportes realizados, tendientes a enriquecer la misma. El mismo estuvo integrado por los Dres. Marcelo Trivi, Enrique Sicre y Jorge Torga, siendo designados como suplentes los Dres. Mario Garavaglia y Jorge Reyna Almandos.

## Contenido

---

<b>Agradecimientos</b> .....	1
<b>Figuras</b> .....	9
<b>Resumen</b> .....	16
<b>Publicaciones y presentaciones en congresos científicos</b> .....	18
Publicaciones.....	18
Presentaciones a congresos, reuniones y simposios.....	19
<b>Capítulo 1</b> .....	21
<i>Sensores de Fibra Óptica. Aplicación al estudio de materiales</i> .....	21
1.1    Introducción .....	21
1.2    Características generales de los sensores de fibra óptica .....	22
1.2.1 Tipos de sensores de fibras ópticas .....	23
1.2.1.1 Sensores modulados en amplitud o intensidad.....	23
1.2.1.2 Sensores modulados en fase o interferométricos .....	24
1.2.1.3 Sensores modulados en polarización.....	24
1.2.1.4 Sensores modulados espectralmente .....	24
1.2.1.5 Sensores ópticos basados en procesos no-lineales .....	24
1.3    Diferentes técnicas de multiplexación de sensores .....	25
1.4    Aplicaciones de sensores de fibras ópticas.....	25
1.4.1 Aplicaciones en la Ingeniería Civil .....	26
1.4.2 Aplicación en la Industria de la Energía Eléctrica .....	27
1.4.3 Aplicación en la Industria del Petróleo y Gas .....	27
1.4.4 Aplicación en la industria aeroespacial.....	28
1.5    Aplicación al estudio de materiales.....	29
1.5.1 Resinas compuestas.....	29
1.5.2 Materiales cementicios .....	30
<b>Capítulo 2</b> .....	32
<i>Redes de Bragg en fibra óptica</i> .....	32

## Contenido

2.0	Introducción .....	32
2.1	Tipos de redes .....	32
2.2	Redes de Bragg uniformes .....	34
2.3	Red de Bragg con “Chirp” lineal.....	36
2.4	Propagación de la luz en una FBG. Métodos de simulación.....	37
2.4.1	Simulación de redes de Bragg uniformes mediante la integración numérica de las ecuaciones de modos acoplados.....	38
2.4.1.1	Ejemplo de simulación de una red de Bragg uniforme mediante integración de ecuaciones de modos acoplados.....	40
2.4.2	Simulación de redes con el Método de la Matriz de Transferencia (MMT) .....	43
2.4.2.1	Simulación de una red de Bragg uniforme utilizando el MMT.....	45
2.4.2.2	Simulación de una red con Chirp utilizando el MMT.....	46
2.5	Caracterización experimental de redes de Bragg .....	47
2.5.1	Definición de parámetros .....	48
2.5.2	Medida del espectro de transmisión y reflexión de las redes de Bragg.....	48
2.5.2.1	Medida de una FBG con un interrogador de redes comercial .....	48
2.5.2.2	Medida de una FBG con un analizador óptico de espectros .....	50
2.5.2.3	Cálculo de parámetros relevantes a partir de la respuesta en amplitud de una FBG.....	53
2.6	Grabado de redes de Bragg. Fotosensibilidad en fibras ópticas.....	54
2.6.1	Láseres utilizados para el grabado de redes de Bragg.....	56
2.6.2	Grabado de redes uniformes.....	56
2.6.3	Método interferométrico u holográfico .....	57
2.6.4	Método de grabado punto por punto .....	57
2.6.5	Método de la máscara de Fase.....	57
2.6.6	Implementación del método de grabado de redes de Bragg uniformes en fibras fotosensibles utilizando máscaras de fase.....	59
2.6.7	Grabado de redes de Bragg con chirp .....	63
2.7	Red de Bragg como sensor.....	67
2.7.1	FBG como sensor de deformación .....	67
2.7.2	FBG como sensor de temperatura .....	68
2.7.3	Dependencia de la longitud de onda de Bragg con la deformación y los cambios de temperatura en la red.....	69
2.7.3.1	Montaje de la FBG para medir deformación.....	70
2.7.3.2	Modificación de la respuesta de la FBG cuando son despreciables los cambios térmicos .....	70

## Contenido

2.8 Ejemplo de la aplicación de redes de Bragg en medidas de vibraciones .....	71
2.8.1 Sensor de vibraciones empleando redes de Bragg con detección temporal .....	71
2.8.2 Modelado del sensor de vibraciones basado en FBGs .....	72
2.8.3 Medidas experimentales del sensor de vibración .....	74
<i>Resumen del Capítulo 2</i> .....	77
<b>Capítulo 3</b> .....	78
<i>Interferómetro Fizeau de fibra óptica</i> .....	78
3.0 Introducción .....	78
3.1 Tipos de Interferómetros .....	79
3.1.1 Interferómetro Mach-Zehnder .....	79
3.1.2 Interferómetro Michelson.....	79
3.1.3 Interferómetro Sagnac .....	80
3.1.4 El Interferómetro Fabry-Perot (IFP) .....	80
3.1.5 Interferómetro de Fizeau .....	83
3.1.6 Sistemas de detección del IF .....	85
3.1.6.1 Sistema de detección del IF con una medida temporal .....	85
3.1.6.2 Sistema de detección del IF con una medida espectral .....	86
3.1.7 Medida de vibraciones con el Interferómetro de Fizeau .....	87
3.1.8 Medición de vibraciones en simultáneo con FBG e IF .....	90
<i>Resumen del Capítulo 3</i> .....	93
<b>Capítulo 4</b> .....	94
<i>Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)</i> .....	94
4.0 Introducción .....	94
4.1 Conceptos previos referidos a las resinas compuestas .....	95
4.1.1 Resinas compuestas para restauraciones dentales .....	95
4.1.2 Composición química de las resinas compuestas.....	96
4.1.3 Algunas propiedades de estos materiales .....	97
4.1.4 Mecanismos de polimerización.....	97
4.1.5 Breve descripción de las resinas comerciales estudiadas .....	98
4.1.6 Fuentes ópticas empleadas en el fotocurado de las resinas estudiadas .....	100
4.2 Sistema experimental para el curado de resinas fotocurables .....	101
4.2.1 Características de la fuente de luz utilizada para el curado de las resinas estudiadas.....	101

## Contenido

4.2.2 Monitorización de la temperatura en el material durante el curado .....	103
4.2.3 Implementación de técnicas ópticas para sensado de deformación.....	104
4.2.3.1 Redes de Bragg para monitorear el curado de resinas dentales.....	104
4.2.3.2 Interferómetro de Fizeau para monitorear el curado de resinas dentales .....	106
4.2.3.2.1 Configuración del IF para una medida temporal.....	106
4.2.3.2.2 Configuración del IF para una medida espectral.....	107
4.2.3.2.3 Configuración del interferómetro de Fizeau para una medida simultánea temporal y espectral.....	108
4.2.3.2.4 Análisis de la respuesta de la señal temporal obtenida con el interferómetro de Fizeau .....	110
4.2.3.2.5 Análisis de la respuesta de la señal espectral obtenida con el interferómetro de Fizeau .....	113
4.3 Resultados experimentales .....	114
4.3.1 Consideraciones generales .....	114
4.3.2 Resultados y discusión de medidas realizadas con redes de Bragg.....	116
4.3.3 Resultados de las medidas realizadas con el Interferómetro de Fizeau.....	120
<i>Resumen del capítulo 4 .....</i>	<i>126</i>
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>128</b>
<i>Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco .....</i>	<i>128</i>
5.0 Introducción .....	128
5.1 Conceptos previos vinculados a materiales cementicios .....	129
5.1.1 El Concreto .....	129
5.1.2 La contracción del hormigón.....	131
5.1.3 Tipos o mecanismos de contracción.....	132
5.1.4 Aditivos de cemento.....	133
5.1.5 Materiales en estudio.....	134
5.1.6 Causas de deterioro de estructuras de hormigón .....	135
5.1.6.1 Fisuras y grietas en el hormigón en estado fresco .....	136
5.1.7 Fraguado del cemento .....	137
5.2 Antecedentes de métodos utilizados para monitorear el fraguado de materiales cementicios .	138
5.3 Descripción de los esquemas de medida utilizados para monitorizar cambios dimensionales en materiales cementicios.....	138
5.3.1 Redes de Bragg embebidas para evaluar los cambios dimensionales de materiales cementicios en estado fresco .....	139
5.3.2 Comparador de Longitudes Mecánico .....	140

## Contenido

5.3.3 Implementación experimental del interferómetro de Fizeau.....	141
5.3.3.1 Configuración del interferómetro de Fizeau en forma vertical (IFV) simple.....	141
5.3.3.2 Configuración del IFV para medidas en simultáneo .....	143
5.3.3.3 Configuración del Interferómetro de Fizeau en dirección horizontal (IFH) .....	144
5.3.3.4 Medición de deformaciones con interferómetro de Fizeau para diferentes condiciones de restricción .....	145
5.3.4 Medida simultánea con dos métodos ópticos (IF y FBG) y un método mecánico convencional (CM), de la evolución dimensional del material en estado fresco .....	146
5.4 Resultados experimentales .....	148
5.4.1 Medida con una red de Bragg embebida y el comparador mecánico.....	148
5.4.2 Medida utilizando el interferómetro de Fizeau en dirección vertical (IFV).....	149
5.4.2.1 Medición simple .....	149
5.4.2.2 Medición en simultáneo de dos muestras.....	150
5.4.3 Medición con interferómetro de Fizeau para diferentes condiciones de restricción .....	155
5.4.4 Mediciones comparativas en simultáneo utilizando una FBG embebida, el IF y un CM ..	156
<b>Capítulo 6</b> .....	160
<i>Detección de defectos (grietas) mediante Redes de Bragg con Chirp</i> .....	160
6.0 Introducción .....	160
6.1 Modelo para determinar la posición de un “defecto” generado dentro de una red de Bragg con chirp analizando el espectro de reflexión y retardo de grupo.....	161
6.1.1 Descripción del modelo.....	161
6.1.1.1 Definición de los parámetros usados para modelar una CFBG.....	162
6.1.1.2 Modelado de la deformación de la red .....	163
6.1.1.3 Estudio preliminar del comportamiento del modelo .....	165
6.2 Análisis de la respuesta espectral del modelo .....	171
6.2.1 Comportamiento espectral de las respuestas para defectos de diferentes tamaños .....	175
6.2.2 Determinación de la posición de la grieta o fractura (defecto) .....	176
6.2.3 Ancho del defecto o de la grieta.....	179
6.2.3.1 Discusión de la aparición de la ventana de transmisión .....	180
6.2.3.1.1 Cavity Fabry-Perot formada por dos redes uniformes analizada en términos de la longitud efectiva.....	181
6.2.3.1.2 Cavity Fabry-Perot formada en una CFBG donde una pequeña porción de la misma permanece invariante .....	182
6.2.4 Determinación de la posición de la grieta considerando el comportamiento periódico del retardo de grupo con la deformación.....	187

*Contenido*

6.3 Implementación experimental.....	189
<b>Conclusiones</b> .....	195
Perspectivas Futuras.....	197
<b>Referencias</b> .....	198

## Figuras

---

Fig. 1. 1 Sensores de fibra óptica .....	22
Fig. 1. 2 Monitoreo de puentes.....	26
Fig. 1. 3 Control de túneles y represas .....	27
Fig. 1. 4 Monitoreo de oleoductos y pozos de petróleo .....	28
Fig. 1. 5 Monitoreo de vehículos lanzadores espaciales .....	29
Fig. 2. 1 Tipos de redes .....	33
Fig. 2. 2 Tipos de variación de índice .....	34
Fig. 2. 3 Esquema de una red de Bragg.....	35
Fig. 2. 4 Principio de funcionamiento de una FBG.....	35
Fig. 2. 5 Parámetros relevantes del espectro de reflexión de una FBG.....	36
Fig. 2. 6 Esquema de una red de Bragg con Chirp lineal .....	36
Fig. 2. 7 Condición de ajuste o igualación de fase en una FBG uniforme .....	39
Fig. 2. 8 Reflectividad de una FBG uniforme para diferentes valores de su longitud.....	41
Fig. 2. 9 Reflectividad y ancho espectral para diferentes longitudes de una FBG.....	41
Fig. 2. 10 Espectro de reflexión de dos FBG evaluando la variación del dn .....	42
Fig. 2. 11 Espectros de reflectividad y fase.....	42
Fig. 2. 12 Espectros de reflectividad y retardo de grupo.....	42
Fig. 2. 13 Variación del índice de refracción en una sección de FBG .....	43
Fig. 2. 14 Modelado de una red de Bragg uniforme.....	45
Fig. 2. 15 Simulación de una FBG uniforme para dos KL distintos .....	46
Fig. 2. 16 Modelado de redes de Bragg con Chirp.....	46
Fig. 2. 17 (a y b) Espectros de reflexión y transmisión de una CFBG para diferentes longitudes de la red.....	47
Fig. 2. 18 (a y b) Retardo de grupo y fase de una CFBG para diferentes longitudes de la red .....	47
Fig. 2. 19 Esquema de medida por reflexión de una FBG con interrogador de redes.....	49
Fig. 2. 20 Espectro del barrido del láser sintonizable utilizado por el interrogador de redes .....	49
Fig. 2. 21 Esquema de medida por transmisión de una FBG con interrogador de redes.....	50
Fig. 2. 22 (a y b) Espectros de transmisión y reflexión de una FBG medidos con un interrogador..	50
Fig. 2. 23 Espectro de emisión del SLED utilizado en las mediciones de FBG con OSA.....	51
Fig. 2. 24 Esquema de medida de una FBG por reflexión con el OSA.....	51
Fig. 2. 25 Esquema de medida de una FBG por transmisión con el OSA.....	52
Fig. 2. 26 Espectro del SLED (trazo amarillo) y FBG medida por transmisión (trazo verde).....	52
Fig. 2. 27 FBG medida por transmisión .....	53
Fig. 2. 28 Determinación de la reflectividad de una FBG a partir de su espectro de transmisión ....	53
Fig. 2. 29 Sistema de hidrogenado de fibra óptica .....	55
Fig. 2. 30 Difracción de un haz incidente en las ranuras de una MF.....	58
Fig. 2. 31 Difracción de un haz UV incidente de manera perpendicular sobre la MF .....	58



## Figuras

Fig. 2. 32 Esquema de grabado con el láser de Nd-YAG .....	60
Fig. 2. 33 Montaje experimental de grabado utilizando el láser de Nd-YAG .....	61
Fig. 2. 34 Detalle del sistema de grabado mostrando la máscara de fase (MF), la fibra óptica fotosensible (FOF) y el microposicionador (Mp) .....	61
Fig. 2. 35 Red Uniforme grabada empleando la técnica de MF y un láser Nd-YAG cuadruplicado	62
Fig. 2. 36 Esquema experimental de grabado de redes con el láser de pulsos de fs.....	62
Fig. 2. 37 Ilustración de la triplicación en frecuencia para producir radiación UV en 266 nm.....	63
Fig. 2. 38 Red de Bragg grabada con máscara de fase y laser de Ti-Za triplicado .....	63
Fig. 2. 39 Esquema de grabado de redes de Bragg con Chirp (técnica (d)) .....	65
Fig. 2. 40 Montaje experimental del sistema de grabado de redes CFBG .....	65
Fig. 2. 41 Monitoreo del grabado de una CFBG .....	66
Fig. 2. 42 Posicionamiento de los PZ en el esquema de grabado.....	66
Fig. 2. 43 Respuesta espectral en amplitud de una red de Bragg con chirp grabada con el sistema descrito en (d).....	67
Fig. 2. 44 FBG como sensor de deformación.....	68
Fig. 2. 45 FBG como sensor de temperatura.....	68
Fig. 2. 46 Detalle del cantiléver .....	72
Fig. 2. 47 Esquema general del sensor de vibraciones.....	72
Fig. 2. 48 Producto de las reflectividades de FBGA y FBGB.....	73
Fig. 2. 49 Integral del producto de reflectividades, indicando la zona de operación del sensor .....	73
Fig. 2. 50 Producto de las reflectividades de FBGC y FBGD.....	74
Fig. 2. 51 Integral del producto de reflectividades (FBGC y FBGD), indicando la zona de operación del sensor.....	74
Fig. 2. 52 Ubicación de la FBG en la chapa de aluminio que se hizo oscilar .....	75
Fig. 2. 53 a) Señal Temporal – Medida a y b) FFT – Medida a .....	75
Fig. 2. 54 a) Señal temporal – Medida b y b) FFT Medida b.....	76
Fig. 2. 55 a) Señal Temporal – Medida c y b) FFT – Medida c .....	76
Fig. 2. 56 a) Señal Temporal – Medida d y b) FFT – Medida d.....	76
Fig. 3. 1 Esquema del interferómetro Mach- Zehnder .....	79
Fig. 3. 2 Esquema del interferómetro Michelson .....	80
Fig. 3. 3 Esquema del interferómetro Sagnac .....	80
Fig. 3. 4 Distintas configuraciones del Interferómetro Fabry-Perot Intrínseco.....	81
Fig. 3. 5 Esquemas de Interferómetros Fabry-Perot Extrínsecos.....	82
Fig. 3. 6 Función de Airy para tres reflectividades diferentes.....	83
Fig. 3. 7 Esquema del funcionamiento del interferómetro de Fizeau.....	84
Fig. 3. 8 Señal temporal típica del IF .....	86
Fig. 3. 9 Señal espectral de un IF .....	87
Fig. 3. 10 Esquema de medida de vibraciones con el IF .....	88
Fig. 3. 11 Ilustración de las posiciones de medida.....	88
Fig. 3. 12 Señal temporal del IF al medir vibraciones .....	89
Fig. 3. 13 Flexión del cantiléver.....	89
Fig. 3. 14 Montaje experimental en simultáneo con las FBGs y el IF .....	90
Fig. 3. 15 Detalle de la implementación del IF (a) y de la FBG (b).....	90
Fig. 3. 16 Masas colocadas sobre el cantiléver para variar la frecuencia natural de oscilación.....	91
Fig. 3. 17 Señal espectral y temporal de una medida de vibración con FBG.....	91

## Figuras

Fig. 3. 18 Señal temporal típica del IF al medir vibración.....	91
Fig. 3. 19 Amplitud de la vibración medida con FBG e IF para $f_r=29.4$ Hz.....	92
Fig. 3. 20 Curvas de resonancia del cantiléver libre de carga, con Carga I y con Carga II.....	92
Fig. 4. 1 Presentación comercial de las resinas compuestas.....	96
Fig. 4. 2 Estructura de una resina compuesta.....	96
Fig. 4. 3 Monómeros que componen la matriz orgánica.....	96
Fig. 4. 4 Dientes anteriores y posteriores.....	99
Fig. 4. 5 Resina Filtek P60.....	100
Fig. 4. 6 Resina Filtek Z250.....	100
Fig. 4. 7 Dimensiones del LED – 470nm.....	101
Fig. 4. 8 Espectro del LED empleado para el curado.....	102
Fig. 4. 9 Esquema utilizado para medir la potencia óptica del LED de 470nm.....	102
Fig. 4. 10 Curva de potencia del LED de curado.....	103
Fig. 4. 11 Esquema de monitoreo de temperatura durante el curado de la resina.....	103
Fig. 4. 12 Esquema de medida de deformación con una FBG embebida.....	104
Fig. 4. 13 Montaje experimental para medir deformación con una FBG embebida.....	105
Fig. 4. 14 Evolución de la longitud de onda de Bragg durante el curado de una resina BIS-GMA.....	106
Fig. 4. 15 Esquema de medida temporal de deformación con el IF.....	107
Fig. 4. 16 Esquema de medida espectral de deformación con el IF.....	107
Fig. 4. 17 Montaje experimental de la medida espectral con el IF, utilizando el analizador espectral o el espectrómetro.....	108
Fig. 4. 18 Esquema global del sistema de medida temporal y espectral con el IF.....	109
Fig. 4. 19 Montaje experimental del sistema de medida temporal y espectral con el IF.....	109
Fig. 4. 20 Configuración WDM.....	109
Fig. 4. 21 Medida temporal obtenida con IF.....	110
Fig. 4. 22 Ampliación de la señal temporal de la Fig. 4.21 en el comienzo del curado.....	111
Fig. 4. 23 Curva de contracción de una resina dental, obtenida a partir del procesamiento de la señal temporal del IF.....	112
Fig. 4. 24 Parámetros considerados en el cálculo de la contracción de una resina.....	113
Fig. 4. 25 Respuesta espectral típica del IF correspondiente a dos instantes durante el curado de una resina dental.....	113
Fig. 4. 26 Montaje para posicionamiento de las muestras durante el fotocurado.....	114
Fig. 4. 27 Dimensiones de los moldes.....	115
Fig. 4. 28 Muestras de resina comercial.....	115
Fig. 4. 29 Molde con resina experimental.....	115
Fig. 4. 30 Variación temporal de la longitud de onda de Bragg y de la temperatura durante el curado de la resina P60.....	117
Fig. 4. 31 Ampliación de la Fig. 4.30.....	117
Fig. 4. 32 Comparación de la derivada de la señal espectral de la FBG y la variación temporal de la temperatura.....	117
Fig. 4. 33 Posición inicial y final de la FBG utilizada para monitorear el proceso de polimerización de la resina MDQ1.....	118
Fig. 4. 34 Cambio en la longitud de onda de Bragg - resina MDQ1.....	119
Fig. 4. 35 Variación de temperatura en la muestra – resina MDQ1.....	119
Fig. 4. 36 Contracción absoluta – MDQ1.....	119

## Figuras

Fig. 4. 37 Contracción relativa – MDQ1.....	119
Fig. 4. 38 Resina MDQ2 medida con diferentes potencias de curado .....	120
Fig. 4. 39 Resina Filtek P60 con diferentes potencias de curado.....	120
Fig. 4. 40 Resinas Filtek P60 y Z250 curadas con la misma potencia: 1.55mW .....	120
Fig. 4. 41 Medida de deformación relativa y absoluta de la resina comercial Z250.....	121
Fig. 4. 42 Trazos comparativos de la derivada del strain respecto al tiempo y la temperatura durante el curado de la resina comercial Z250.....	122
Fig. 4. 43 Comparación de resina MDQ2 y Z250 curadas con 1.55mW .....	123
Fig. 4. 44 Medida de 2 resinas comerciales con la misma potencia de polimerización (12.39mW) .....	123
.....	
Fig. 4. 45 Comparación de las resinas experimentales MDQ1 y MDQ2.....	123
Fig. 4. 46 Medida de resina Filtek P60 con diferentes potencias de curado .....	124
Fig. 4. 47 Contracción máxima de la resina Filtek P60 para diferentes potencias de curado .....	124
Fig. 4. 48 Contracción obtenida a partir de la señal temporal.....	125
Fig. 4. 49 Contracción obtenida a partir de la señal espectral.....	126
Fig. 5. 1 Mezcla de Concreto .....	129
Fig. 5. 2 Agregados finos y gruesos.....	129
Fig. 5. 3 Estructura interna del hormigón.....	130
Fig. 5. 4 Etapas de la contracción del hormigón .....	132
Fig. 5. 5 Cambios de volumen por contracción.....	133
Fig. 5. 6 Aditivos que se incorporan al cemento .....	133
Fig. 5. 7 Fisuras debido a esfuerzos estructurales .....	136
Fig. 5. 8 Fisuras por asentamiento plástico .....	136
Fig. 5. 9 Fisuras por retracción plástica .....	136
Fig. 5. 10 Proceso de fraguado y endurecimiento del concreto.....	137
Fig. 5. 11 Esquema de medida con FBG.....	139
Fig. 5. 12 Medida experimental con una red embebida en la muestra de cemento.....	140
Fig. 5. 13 Esquema de medida con el CM .....	141
Fig. 5. 14 CM con la muestra de cemento.....	141
Fig. 5. 15 Cavidad interferométrica y señal típica .....	142
Fig. 5. 16 Esquema de medida del IFV .....	142
Fig. 5. 17 Fotografía del montaje vertical del I. F.....	142
Fig. 5. 18 Probeta con superficie reflectante.....	142
Fig. 5. 19 Esquema de medida de 2 muestras en simultáneo con el IFV utilizando un switch óptico .....	143
.....	
Fig. 5. 20 Probetas del mismo material medidas simultáneamente con el IFV.....	143
Fig. 5. 21 Instrumental utilizado para iluminar las muestras y adquirir las señales generadas con el IFV .....	144
Fig. 5. 22 Esquema de medida del IF horizontal.....	144
Fig. 5. 23 Implementación práctica del I. F. en forma horizontal .....	145
Fig. 5. 24 Montaje experimental para mediciones simultáneas con el interferómetro Fizeau en direcciones vertical y horizontal .....	145
Fig. 5. 25 Vistas de la probeta medida con IFV e IFH.....	146
Fig. 5. 26 Medida experimental del cambio dimensional de materiales cementicios en forma simultánea con tres métodos: FBG embebida, IF y CM. ....	146

## Figuras

Fig. 5. 27 Muestras en molde triple para medición simultánea con IFH, FBG y CM.....	147
Fig. 5. 28 Molde triple.....	147
Fig. 5. 29 Mezcla colocada en los moldes para medida experimental .....	147
Fig. 5. 30 Medida con una FBG y el CM.....	148
Fig. 5. 31 Medida de muestras individuales con IFV.....	149
Fig. 5. 32 Medida simultánea de dos muestras iguales con IFV .....	150
Fig. 5. 33 Evolución dimensional de las mezclas de la serie 1 (medidas a 22°C).....	152
Fig. 5. 34 Efecto de la temperatura ambiente en el cambio dimensional durante el fraguado .....	153
Fig. 5. 35 Evolución dimensional de las mezclas de la serie 2 (medidas a 22°C).....	154
Fig. 5. 36 Evolución dimensional de la mezcla M2 medida con el IF en dos direcciones ortogonales: horizontal y vertical.....	155
Fig. 5. 37 Comparación de los cambios dimensionales experimentados por M2 en dirección vertical, cuando se colocó en un molde con y sin restricciones .....	156
Fig. 5. 38 Comparación de los resultados obtenidos con tres técnicas: FBGs, IF y CM .....	157
Fig. 5. 39 Evolución dimensional durante el estado fresco de dos muestras idénticas medidas con el Interferómetro de Fizeau (círculos grises y negros) y con el sensor de FBG (triángulos) .....	158
Fig. 6. 1 Ilustración de una CFBG embebida o fijada superficialmente en un material.....	162
Fig. 6. 2 Detalle de la CFBG usada para la simulación, sin ejercer tensión.....	162
Fig. 6. 3 Espectro de reflexión y retardo de grupo de la CFBG modelada .....	163
Fig. 6. 4 Representación del efecto espectral del estiramiento de la CFBG .....	164
Fig. 6. 5 Espectro de reflexión de una CFBG sometida a diferentes tensiones: 90 $\mu\epsilon$ , (—) 136 $\mu\epsilon$ , (—) 181 $\mu\epsilon$ , (—) 227 $\mu\epsilon$ y (—) 245 $\mu\epsilon$ .....	165
Fig. 6. 6 Cambio de posición de la perturbación sobre la CFBG.....	166
Fig. 6. 7 Caso A con (a) $\Delta\epsilon = 164 \mu\epsilon$ y (b) $\Delta\epsilon = 165 \mu\epsilon$ .....	166
Fig. 6. 8 Caso A (a) $\Delta\epsilon = 164 \mu\epsilon$ y (b) Ampliación de (a).....	167
Fig. 6. 9 Caso A (a) $\Delta\epsilon = 165 \mu\epsilon$ y (b) Ampliación de (a).....	167
Fig. 6. 10 Espectros de reflexión y retardo de grupo para los Casos A, B y C .....	168
Fig. 6. 11 (a) Ampliación del espectro de reflexión destacando los picos que aparecen al tensionar la red y (b) ajuste de los mínimos obtenidos del espectro de reflexión utilizando la curva de transmisión de $R_2$ .....	168
Fig. 6. 12 Determinación de la posición espectral del defecto para 3 casos diferentes.....	169
Fig. 6. 13 Comportamiento de la respuesta del modelo para defectos de diferente tamaño (a) $t_1 : L_{R2}$ $= 1mm$ y $\Delta\epsilon = 33\mu\epsilon$ , (b) $t_2 : L_{R2} = 2mm$ y $\Delta\epsilon = 18\mu\epsilon$ , (c) $t_3 : L_{R2} = 5mm$ y $\Delta\epsilon = 36 \mu\epsilon$ y (d) $t_4 : L_{R2}$ $= 10mm$ y $\Delta\epsilon = 40 \mu\epsilon$ .....	170
Fig. 6. 14 Respuesta de la CFBG para defectos de 0.5 – 2 mm, con la misma ubicación física sobre la red.....	171
Fig. 6. 15 Simulación del espectro de reflectividad (a) y retardo de grupo (b) de la CFBG inicial. La línea roja es la dispersión cromática promedio de la red sin tensionar .....	172
Fig. 6. 16 (a) y (b) CFBG con un defecto de 1mm: (a) espectro de reflexión y (b) retardo de grupo .....	172
Fig. 6. 17 (a) Espectros de reflectividad y retardo de grupo para diferentes tensiones: (—) 146 $\mu\epsilon$ , (—) 182 $\mu\epsilon$ , (—) 218 $\mu\epsilon$ , (—) 255 $\mu\epsilon$ , (—) 291 $\mu\epsilon$ , (—) 327 $\mu\epsilon$ , (—) 364 $\mu\epsilon$ , (—) 400 $\mu\epsilon$ y (—) 436 $\mu\epsilon$ ; (b) ampliación en la zona de la ventana de transmisión.....	173
Fig. 6. 18 Espectros de reflectividad y retardo de grupo en los tres instantes clave de un ciclo completo de tensionado: (a) inicio, (b) mitad del ciclo y (c) finalización.....	174

## Figuras

Fig. 6. 19 Ampliación de los picos de reflectividad (rombos grises) y retardo de grupo (cuadrados vacíos azules) para dos casos diferentes: (a) $d = 1 \text{ mm}$ y $\Delta\epsilon = 291 \mu\epsilon$ y (b) $d = 4 \text{ mm}$ y $\Delta\epsilon = 173 \mu\epsilon$ .....	174
Fig. 6. 20 Respuesta espectral de la amplitud del pico de transmisión para cinco defectos diferentes .....	176
Fig. 6. 21 Amplitud del pico de transmisión con respecto a la deformación por unidad de longitud aplicada, para cinco defectos diferentes .....	176
Fig. 6. 22 Espectros para grietas de 1 mm en diferentes posiciones: $L / 3$ y $2L / 3$ : (a) Reflectividad y (b) retardo de grupo .....	177
Fig. 6. 23 Identificación de parámetros del espectro de reflectividad requeridos para calcular la posición $z$ de una grieta o fractura .....	177
Fig. 6. 24 Identificación de parámetros del espectro de retardo de grupo para calcular la posición $z$ de una grieta o fractura .....	178
Fig. 6. 25 Posición de la grieta ( $z$ [mm]) versus (a) posición de la longitud de onda ( $\Delta\lambda$ ) y (b) posición de retardo de grupo ( $\tau_g$ ) de la resonancia. Se incluye el punto calculado para dos valores de tensión ( $291 \mu\epsilon$ y $691 \mu\epsilon$ ) .....	179
Fig. 6. 26 a) Deformación aplicada vs. longitud de onda del pico resonante y (b) amplitud del pico de transmisión respecto de la deformación aplicada, para $d = 1 \text{ mm}$ .....	180
Fig. 6. 27 Esquema de una cavidad Fabry Perot formada por dos redes uniformes .....	181
Fig. 6. 28 Esquema del Fabry-Perot entre redes con chirp .....	183
Fig. 6. 29 Espectros de reflectividad para 3 tamaños del defecto: (a) 1 mm (b) 4 mm y (c) 6 mm .....	184
Fig. 6. 30 (a), (b) y (c) Ampliación de las ventanas de transmisión para tres defectos diferentes .....	184
Fig. 6. 31 Dependencia de la desviación de la pendiente con respecto a $(1 - pe)$ , normalizado con $d$ , en $(d+d_0)^{-1}$ .....	186
Fig. 6. 32 Dependencia del periodo de deformación con respecto a la longitud efectiva de la cavidad .....	187
Fig. 6. 33 Dependencia de $\tau_g$ y $\tau_{gp}$ con la deformación, para $d = 1 \text{ mm}$ .....	188
Fig. 6. 34 Vista superior del esquema de medida .....	190
Fig. 6. 35 Montaje experimental .....	190
Fig. 6. 36 Condición inicial de la amplitud de reflexión y del retardo de grupo de la CFBG: (a) medida experimental, (b) simulación .....	190
Fig. 6. 37 Reflectividad (trazo negro) y retardo de grupo (trazo gris) para una deformación de $523 \mu\epsilon$ , (a) experimental, (b) simulación .....	191
Fig. 6. 38 Determinación experimental de la posición del defecto .....	191
Fig. 6. 39 (a) Deformación aplicada ( $\Delta\epsilon$ ) vs. longitud de onda del pico resonante (simulación: círculos vacíos, puntos experimentales: triángulos grises, mitad de ciclo: círculos llenos), y (b) amplitud del pico de transmisión respecto de la deformación aplicada. En ambos casos $d=1.6 \text{ mm}$ .....	192
Fig. 6. 40 Dependencia de la posición (a) del retardo de grupo ( $\tau_g$ ) y (b) de su valor en resonancia ( $\tau_{gp}$ ) con la deformación aplicada, para $d = 1 \text{ mm}$ .....	193

## Tablas

---

Tabla 2. 1 Características de las redes de la implementación experimental.....	74
Tabla 2. 2 variaciones de la longitud de la lámina .....	75
Tabla 3. 1 Resultados de mediciones de vibración con IF .....	89
Tabla 4. 1 Resinas comerciales más representativas .....	96
Tabla 4. 2 Resinas en estudio .....	100
Tabla 4. 3 Características del LED de curado .....	101
Tabla 4. 4 Especificaciones técnicas del acoplador WDM 1310/1550 nm .....	110
Tabla 4. 5 Detalle del cálculo la deformación absoluta .....	112
Tabla 5. 1 Composición de las mezclas (en kg/m <sup>3</sup> ) medidas individualmente con el IFV .....	149
Tabla 5. 2 Proporciones y materiales usados en las mezclas .....	152
Tabla 5. 3 Parámetros utilizados para ajustar las curvas de evolución dimensional.....	154
Tabla 6. 1 Parámetros del modelado de la CFBG .....	163
Tabla 6. 2 Parámetros para el modelado, correspondientes a cuatro tamaños diferentes del defecto .....	169
Tabla 6. 3 Parámetros para dos posiciones diferentes de una grieta de 1 mm .....	178
Tabla 6. 4 Valores de $p_d$ calculados para diferentes tamaños de fisuras o grietas.....	185
Tabla 6. 5 Parámetros para calcular la anchura $d$ a partir del periodo .....	187

## Resumen

---

Desde hace ya varios años, los sensores de fibra óptica se han empleado en el sector aeroespacial, en grandes obras de ingeniería civil, en proyectos energéticos (petróleo, gas, energía eólica), transporte (automóviles, barcos, aviones, trenes), aplicaciones médicas y químicas, etc., dado que constituyen herramientas de monitorización fiables y precisas. La razón principal son sus ventajas predominantes tales como tamaño pequeño, en general poseen bajo costo, utilizan materiales abundantes en la naturaleza (el silicio, que es eléctricamente aislante) y poseen la propiedad de ser básicamente inmunes a la radiación electromagnética.

En el desarrollo de esta tesis se diseñaron y aplicaron diferentes técnicas que incorporan sensores basados en fibra óptica al estudio de materiales compuestos y cementicios. En particular se utilizaron dispositivos de tipo interferométrico debido a su alta sensibilidad y por su precisión sub-micrométrica. Por otro lado, la tecnología de fibra óptica permite desarrollar sensores poco invasivos que pueden embeberse en el material bajo estudio durante su elaboración, sin modificar sus propiedades. De esta manera, para caracterizar el proceso de curado y endurecimiento de materiales como los mencionados, se estudió su evolución dimensional mediante el empleo de sensores interferométricos tipo Fizeau y redes de Bragg grabadas en fibra óptica (FBG).

Las resinas analizadas son de aplicación en odontología, por lo que resulta de sumo interés evaluar el grado de contracción del material durante el curado, ya que eso puede generar grietas que dan lugar a la formación de caries. En el caso de los materiales cementicios, los avances realizados en el desarrollo de nuevas formulaciones mediante la introducción de diversos aditivos a las mezclas, han dado origen a líneas de investigación que requieren técnicas de caracterización cada vez más precisas y más sensibles.

La monitorización de cambios de temperatura o del desarrollo de tensiones y grietas durante el proceso de curado de polímeros y el fraguado de mezclas a base de cemento Portland, tiene un interés tecnológico permanente. Además, el control de cargas distribuidas tiene interés en sí mismo y para detectar la aparición de grietas, su progresión y cualquier deterioro de las propiedades elásticas del material. Áreas como la aeronáutica, la obra civil y la medicina se beneficiarían con el desarrollo de herramientas de control fiables y precisas. Por ello se planteó una propuesta de detección de grietas presentando un modelo basado en el uso de redes de Bragg con chirp (CFBG) y un esquema experimental para su concreción.

En este contexto, la presente Tesis de Doctorado se ha ordenado de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 *Introducción a los Sensores de Fibra Óptica. Aplicación al estudio de materiales*, se brinda un panorama de los sensores de fibra óptica, indicando sus características generales y algunas de sus aplicaciones actuales en diferentes áreas. Asimismo, se realiza una introducción sobre los materiales estudiados con las técnicas mencionadas.

## Resumen

En el Capítulo 2 *Redes de Bragg en fibra óptica*, se presentaron los principios básicos que describen las características y funcionamiento de estos dispositivos. Inicialmente, se muestra una síntesis de los diferentes tipos de redes y luego se enfoca el análisis en la descripción de aquellas que se utilizaron en cada una de las aplicaciones desarrolladas en esta Tesis (redes de Bragg – FBG y redes de Bragg con chirp - CFBG). Partiendo desde la definición, se discute su principio de funcionamiento, modelado teórico, grabado en fibra óptica fotosensible y caracterización de las mismas. Además, se plantea la primera aplicación desarrollada en la Tesis un *Sensor de Vibraciones* utilizando un interferómetro de Fizeau y redes de Bragg, y se comparan los tipos de respuestas de estos dos sensores ópticos.

En el Capítulo 3 *Interferómetro Fizeau (IF) de fibra óptica*, se describen las principales características y propiedades del dispositivo, y los esquemas de medida con detección temporal o espectral.

En el Capítulo 4 *Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*, se comienza realizando una descripción de algunas características y propiedades de estos materiales (tipos de resina usados en odontología como material de obturación, su composición química, mecanismos de polimerización, entre otras cuestiones). A continuación, se describe el arreglo experimental utilizado para llevar a cabo el proceso de fotopolimerización, el monitoreo de la temperatura, las probetas de material empleadas y el montaje diseñado para posicionarlas a la hora de realizar las medidas. Posteriormente, se describen las técnicas y los esquemas de medida, basados en el interferómetro de Fizeau y en redes de Bragg, empleados para monitorizar el proceso de polimerización de resinas fotocurables comerciales (Filtek 60 y Z250 XT de 3M) y de otras resinas en etapa de desarrollo. Se compararon sus respuestas y el nivel final de contracción para cada caso.

En el Capítulo 5 *Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco*, se estudia el fraguado de estos materiales y se evalúan los niveles de contracción/expansión que experimentan desde el momento de preparación de la mezcla. Inicialmente se incluyen conceptos generales, definiciones específicas, parámetros, etc. Luego, se discuten los esquemas de medida empleados para monitorizar los cambios dimensionales, ya sea utilizando redes de Bragg en fibra o el Interferómetro de Fizeau.

En el Capítulo 6 *Aplicación de redes de Bragg con Chirp (CFBG) en la detección de cracks o fisuras*, se modeló teóricamente una red de Bragg con chirp lineal utilizando el método de la Matriz de Transferencia, para luego aplicarlo en la detección de fisuras generadas en materiales. Se evaluaron tanto el espectro de reflexión como el retardo de grupo. Además, se implementó experimentalmente una situación equivalente a la fisura del material en cuestión. Este tema fue el objetivo de estudio y fue iniciado durante una estadía de seis meses (Septiembre – Marzo / 2016) en el Laboratorio de Fibras Ópticas del Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo de la Universidad de Valencia, España, dirigido por el Dr. Miguel V. Andrés.

Finalmente, se presentan las *Conclusiones y dirección futura de la investigación*, con la que se dará continuidad a la tarea llevada a cabo hasta aquí.



## Publicaciones y presentaciones en congresos científicos

---

### Publicaciones

1. **“Dimensional stability of materials based on portland cement at the early stages”** (Proceeding); Angélica Mesa Yandi, Raúl L. Zerbino, Graciela M. Giaccio, Nélica A Russo, Ricardo Duchowicz. *Proceeding of SPIE Vol. 9202, Photonics Applications for Aviation, Aerospace, Commercial, and Harsh Environments V*, 92021U, 2014. doi: 10.1117/12.2062222. ISSN: 0277-786X. ISBN: 9781628412291. País de edición: USA.
2. **“Characterization of dimensional changes of cement pastes and mortars in fresh state applying an interferometric technique”** (paper); Angélica Mesa Yandy, Nélica Araceli Russo, Ricardo Duchowicz, Raúl Luis Zerbino. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 4, N° 10, p530-535, ISSN: 2278-0181, ESRSA Publication, Octubre de 2015.
3. **“Análisis de la respuesta temporal y espectral de un interferómetro de Fizeau de fibra óptica aplicado al estudio de resinas fotocurables”** (Proceeding); A. M. M. Yandy, N. A. Russo, G. F. Arenas, J. Antonacci, S. Noriega, R. Duchowicz. *IEEE Conference Publication: 2015 XVI Workshop on Information Processing and Control (RPIC), Cordoba, Argentina, 2015, pp. 1-5*, doi: 10.1109/RPIC.2015.7497113.
4. **“Determination of the position of defects generated within a chirped fiber Bragg grating by analyzing its reflection spectrum and group delay”** (Proceeding). A. M. Mesa Yandy, J. Cruz, N. A. Russo, R. Duchowicz, M. V. Andrés. *Latin America Optics and Photonics Conference, (Optical Society of America, 2016), paper LTu4A.36. ISBN: 978-1-943580-16-3*.
5. **“Spectral properties of a variable period Bragg grating including a segment isolated of external deformations”** (Proceeding y presentación oral); Angélica Mesa Yandy, José L. Cruz, Nélica A. Russo, Miguel V. Andrés y Ricardo Duchowicz. *XVII Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control - RPIC2017-, Mar del Plata, Argentina, 2015, doi: 10.23919/RPIC.2017.8214378*.
6. **“Desarrollo de redes de período largo en fibras ópticas por métodos mecánicos”** (Proceeding); Mesa Yandy, Angélica María, Aredes, Daniel, Russo, Nélica Araceli, Duchowicz, Ricardo. *Documento de conferencia IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT 2017*.
7. **“Spectral Fizeau Interferometer applied to dental polymeric resins early shrinkage determination Interferómetro de Fizeau espectral aplicado a la determinación de la contracción temprana de resinas poliméricas dentales”** (paper); J. Antonacci, A. Mesa Yandi, N.A. Russo, R. Duchowicz, G.F. Arenas, doi: 10.7149/OPA.51.1.49076 .

8. **“Development and analysis of a model based on chirped fiber Bragg gratings employed for cracks characterization in materials”** (Paper); Angélica Mesa Yandy, Ricardo Duchowicz, Nélica A. Russo, José L. Cruz and Miguel V. Andrés, enviado a publicar.

## Presentaciones a congresos, reuniones y simposios

1. **“Desarrollo de un sistema de fabricación de redes de Bragg en Fibra óptica fotosensible”** (Póster); Sergio Noriega; Nélica A. Russo; Ricardo Duchowicz; Angelica María Mesa Yandy. Presentado en: *97<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, AFA-2012 25 al 28 de septiembre de 2012.*
2. **“Sensor de vibraciones empleando redes de Bragg de Fibra óptica”** (Póster); Mesa Yandi A. M., Russo N. A., Arenas G., Duchowicz R. Presentado en: *97<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina - AFA 2012 -, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, 25 al 28 de septiembre de 2012.*
3. **“Grabado de redes de Bragg en fibra óptica fotosensible utilizando un láser de femtosegundos triplicado en frecuencia”** (Póster); Noriega S. B., Giordana A., Russo N. A., Mesa Yandi A. M., Duchowicz R. Presentado en: *98<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina, AFA-2013 24 al 27 de septiembre de 2013.*
4. **“Análisis comparativo del empleo de dos técnicas ópticas en el monitoreo de procesos de polimerización de resinas fotocurables”** (Póster); Mesa Yandi A., Russo N. A., Arenas G., Duchowicz R. Presentado en: *98<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina, AFA-2013 24 al 27 de septiembre de 2013.*
5. **“Redes de Bragg y sus Aplicaciones”** (Póster); Angélica Mesa Yandy; Alejandro A. Giordana; Nélica A. Russo; Gustavo F. Arenas; Sergio B. Noriega; Ricardo Duchowicz. Presentado en: *X Taller de Óptica y Fotónica -TOPFOT 2014-, Fotónica y Óptica Aplicada a los Ensayos no Destructivos que se realizó en la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional, Campana, Buenos Aires, Argentina, del 27 al 30 de mayo de 2014.*
6. **“Dimensional stability of materials based on portland cement at the early stages”** (Póster); Mesa Yandy, Zerbino R L, Giaccio Graciela M, Russo N A, Duchowicz R. Presentado en: *en el congreso Optics + Photonics 2014 organizado por la sociedad SPIE, del 17 al 21 de agosto de 2014 en la ciudad de San Diego, California, EEUU.*
7. **“Estudio complementario de un Interferómetro Fizeau dual y sus aplicaciones”** (Póster); Antonacci J; Arenas G. F; Mesa Yandy A; Russo N. A., Duchowicz R. Presentado en: *la 99<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina - AFA 2014 -, Tandil, Buenos Aires, Argentina, del 22 al 25 de septiembre de 2014.*
8. **“Análisis de la respuesta temporal y espectral de un interferómetro de Fizeau de fibra óptica aplicado al estudio de resinas fotocurables”**; A. M. M. Yandy, N. A. Russo, G. F. Arenas, J. Antonacci, S. Noriega, R. Duchowicz. Presentado en: *XVI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control - RPIC 2015; Universidad Nacional de*

*Córdoba y Universidad Tecnológica Nacional-Fac. Regional Córdoba, Córdoba, Argentina; 6 al 9 de octubre de 2015.*

9. **“Determination of the position of defects generated within a chirped fiber Bragg grating by analyzing its reflection spectrum and group delay”** (Póster); Angélica Mesa Yandy, José L. Cruz, Nélica A. Russo, Ricardo Duchowicz and Miguel V. Andrés. Presentado en: *la reunión “Latin America Optics & Photonics Conference - LAOP 2016”, realizada en la ciudad de Medellín, Colombia, del 22 al 25 de agosto de 2016.*
10. **“Spectral Fizeau Interferometer applied to dental polymeric resins early shrinkage determination”** (Proceeding); J. Antonacci, A. M. Mesa Yandy, N. A. Russo, R. Duchowicz, G. F. Arenas. Presentado en: *IX Iberoamerican Optics Meeting/XII Latinoamerican Meeting on Optics, Lasers and Applications – RIAO/OPTILAS 2016, Pucón, Chile; 21 al 25 de noviembre de 2016.*
11. **“Propiedades espectrales de una red de Bragg de periodo variable que incluye un segmento aislado de deformaciones externas”** (Proceeding y presentación oral); Angélica Mesa Yandy, José L. Cruz, Nélica A. Russo, Miguel V. Andrés y Ricardo Duchowicz. Presentado en: *XVII Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control - RPIC2017-, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina; 20 al 22 de septiembre de 2017.*
12. **“Desarrollo de redes de periodo largo en fibras ópticas por métodos mecánicos”** (Póster); Daniel Aredes, Angélica Mesa Yandy, Nélica A. Russo, Ricardo Duchowicz. Presentado en: *102ª Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina - AFA 2017 -, La Plata, Argentina, 26 al 29 de septiembre de 2017.*

# Capítulo 1

## *Sensores de Fibra Óptica. Aplicación al estudio de materiales*

### 1.1 Introducción

En el año de 1958, los premios nobel *Arthur Schawlow* y *Charles H. Townes* describieron teóricamente las características necesarias en un sistema para obtener emisión *láser*. El primer dispositivo fue desarrollado por *Theodor H. Maiman* en 1960. La palabra *láser* (light amplified by stimulated radiation) significa luz amplificada por emisión estimulada de radiación. A partir de ese momento se planteó un gran interés en su aplicación en distintos campos, especialmente en el desarrollo de sistemas ópticos para transmisión de datos, los sistemas láser podrían enviar una mayor cantidad de datos que las microondas, y otros sistemas eléctricos. El primer experimento con el láser implicó la transmisión libre de un haz láser en el aire. Posteriormente se llevaron a cabo experimentos mediante la transmisión de luz láser a través de diferentes tipos de guías de onda. Las fibras de vidrio pronto se convirtieron en el medio preferido para la transmisión de la luz. Las investigaciones se dirigieron hacia la realización de un sistema de transmisión por fibras ópticas que, debido a su alta frecuencia ( $10^{14}$  Hz), podría permitir la transmisión de una gran cantidad de información [1], [2]. Inicialmente, la existencia de grandes pérdidas en las fibras ópticas impedía que los cables coaxiales fueran reemplazados por medios ópticos. Paralelamente a estos acontecimientos, la investigación también se derivó a *la tecnología de sensores de fibras ópticas* combinando la Fibra óptica con dispositivos opto electrónicos para desarrollar sensores. El primer *sensor de fibra óptica* fue el endoscopio, seguido del sensor de proximidad en la década de 1960. A finales de la década de 1970 los sensores de fibra fueron desarrollados como métodos alternativos de detección señales acústicas en el océano (reemplazando el hidrófono piezocerámico) y la velocidad de rotación (reemplazando los giroscopios mecánicos). Desde ese momento, sensores de fibra óptica han sido desarrollados para casi todos los campos [3], [4]. Un sensor se considera una parte indispensable de un sistema de información. En un equipo de control automático, los sensores proporcionan señales de realimentación para el control de las operaciones; en la industria y la ingeniería civil, los sensores indican condiciones básicas, como el estrés, la

tensión, niveles de vibración, y cambios de temperatura; en aplicaciones de seguridad, militar y antiterrorista, generan alarmas; en el cuidado de la salud, se usan para detectar y transmitir información bioquímica y controlar diversos parámetros relevantes del organismo.

## 1.2 Características generales de los sensores de fibra óptica

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo capaz de transformar la variación de uno o varios parámetros de interés en la modificación de una o más propiedades de la luz que se propaga por la fibra. La luz es detectada y procesada con el objeto de obtener el valor del parámetro mencionado.

Los sensores de fibra óptica tienen grandes ventajas que los destacan sobre los sensores convencionales, entre las que pueden mencionarse: pequeño tamaño y peso, inmunidad a interferencias electromagnéticas, capacidad de sensado remoto y distribuido, capacidad de multiplexación, gran ancho de banda, mayor sensibilidad, aislación eléctrica, posibilidad de operación en ambientes explosivos, radioactivos, corrosivos o químicamente agresivos y en general, bajo costo.

Los dispositivos y componentes utilizados en el desarrollo de sensores de fibra óptica pueden ser activos o pasivos. En general, los primeros pueden generar o alterar las señales ópticas mediante métodos eléctricos y entre ellos encontramos amplificadores, moduladores, interruptores, etc. Los dispositivos pasivos no tienen medios eléctricos para alterar señales ópticas y entre los más utilizados pueden mencionarse: acopladores, conectores, colimadores, atenuadores, aisladores, circuladores, controladores de polarización y multiplexores por división en longitud de onda.

Desde un punto de vista genérico, los sensores de fibra óptica se pueden clasificar según la función de la fibra en *intrínsecos* y *extrínsecos*:

Los *sensores intrínsecos de fibra óptica* son aquellos en los que la propia fibra actúa como elemento transductor, es decir, es quién modifica o modula las características de la luz en forma proporcional a la perturbación o magnitud física a medir. En cambio, los *sensores extrínsecos* utilizan la fibra óptica sólo como medio para transmitir la información luminosa desde la fuente de luz hasta el elemento transductor y desde éste hacia el sistema de detección y procesamiento [5].

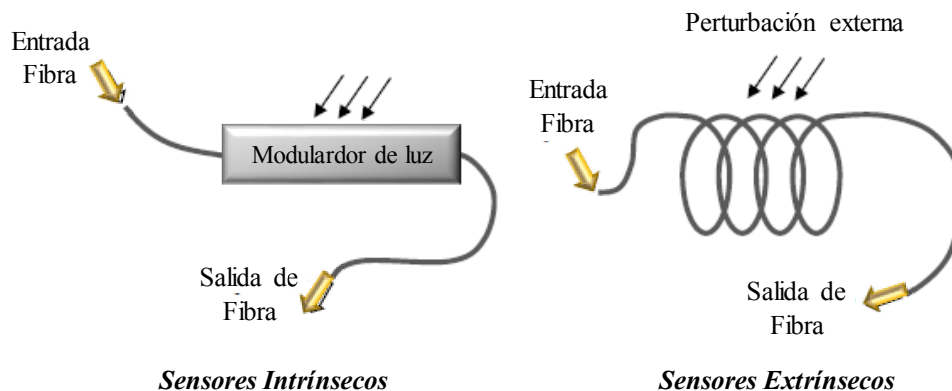


Fig. 1. 1 Sensores de fibra óptica

### 1.2.1 Tipos de sensores de fibras ópticas

De manera más específica, existen diferentes formas de clasificar los sensores de fibra óptica, entre las que podemos mencionar [5]:

#### ***Clasificación basada en el principio de funcionamiento***

- Sensores modulados en amplitud o intensidad: detección a través de la potencia luminosa.
- Sensores modulados en fase o interferométricos: detección mediante la fase del haz luminoso.
- Sensores modulados en polarización: detección de los cambios en el estado de polarización de la luz.
- Sensores modulados espectralmente: detección de variaciones en la longitud de onda de la luz.

#### ***Clasificación basada en la posición espacial***

- Sensores puntuales: variable medida en puntos discretos, con diferentes canales para cada medida.
- Sensores distribuidos: medida determinada a lo largo de una trayectoria, superficie o volumen (Ej. sensores Rayleigh, Raman y Brillouin).
- Sensores cuasi-distribuidos: variable medida en puntos discretos a lo largo de un enlace óptico. (Ej. red de sensores FBG multiplexados en longitud de onda y colocados a lo largo de una estructura).
- Sensores integrados: medida integrada a lo largo de un enlace óptico dando un único valor de salida.

#### ***Clasificación basada en los parámetros medidos o en la aplicación:***

- Sensores físicos: temperatura, presión, tensión (strain), etc.
- Sensores químicos: PH, sensores de gas, estudio espectroscópico, etc.
- Biosensores: ADN, flujo sanguíneo, sensores de glucosa, etc.

A continuación, se hará una breve descripción de algunos de los conceptos mencionados.

#### 1.2.1.1 Sensores modulados en amplitud o intensidad

En esta categoría se puede incluir un tipo especial de sensores llamado *de onda evanescente* cuyo funcionamiento, a pesar de ser levemente diferente, también responde a la detección de cambios en la intensidad lumínica.

*Sensores modulados en amplitud o intensidad*, la luz de una fuente óptica de intensidad constante es enviada a través del elemento a sensor, el cual altera la intensidad de la señal lumínica modulando su amplitud (atenuación que puede ser generada a través de la absorción o dispersión). Este tipo de sensores tiene la ventaja de no necesitar una fuente de luz coherente, ya que no se necesita determinar la variación de la fase sino de su amplitud o

intensidad, pudiendo usarse por ej. un emisor LED [4]. Son ejemplos de este tipo de sensores los utilizados para medir PH, presión arterial, vibraciones, etc.

*Sensor de onda evanescente*, utiliza la energía de la luz que se escapa del núcleo de la fibra hacia el revestimiento y el medio externo (por ej. debido a un micro-doblez). Con este esquema el haz de luz puede interactuar con un medio dependiente del parámetro a medir [4]. Son usados por ej. para la medición de humedad, aceleración, microdoblez, etc.

#### 1.2.1.2 Sensores modulados en fase o interferométricos

Los sensores de fase modulada utilizan cambios en la fase de la luz para detectar los cambios en el parámetro a sensar. Se detecta entonces esta modulación de fase interferométricamente, mediante la comparación de la fase de la señal y la fase de una referencia. En un interferómetro la luz se divide en dos haces, uno de los cuales está expuesto al ambiente de sensado y el otro se aísla del mismo y se utiliza como referencia. Posteriormente los haces se recombinan e interfieren entre sí, dando lugar a una señal resultante de la cual se extrae la información del parámetro a medir. Los interferómetros de Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot y Sagnac son utilizados para implementar este tipo de sensores. Como ej. de aplicación pueden mencionarse los sensores de deformación, el giróscopo para medir velocidad angular, desplazamientos, etc.

#### 1.2.1.3 Sensores modulados en polarización

La dirección y evolución del campo eléctrico de la luz, determina su estado de polarización. El índice de refracción de una fibra cambia cuando se somete a estrés o tensión, generando una diferencia de fase inducida entre las diferentes direcciones de polarización. En otras palabras, bajo una perturbación externa como un estrés o tensión, la fibra óptica funciona como un retardador lineal. Esta propiedad se utiliza para medir esfuerzos sobre la fibra [4], [6]. Utilizan este principio de funcionamiento los sensores de corriente eléctrica (por efecto Faraday), voltaje (por efecto Pockels), entre otros.

#### 1.2.1.4 Sensores modulados espectralmente

Estos sensores basan su funcionamiento en la detección de cambios en la longitud de onda de la luz que se propaga por la fibra, como resultado de la variación del parámetro a sensar. Los sensores de fluorescencia, sensores de cuerpo negro y los basados en redes de Bragg son ejemplos de este tipo de dispositivos de longitud de onda modulada.

#### 1.2.1.5 Sensores ópticos basados en procesos no-lineales

En general, los sensores distribuidos basan su funcionamiento en efectos no lineales producidos en la fibra. Entre ellos se encuentran:

*El efecto Raman*, se produce debido a la interacción del bombeo con el material a través de la vibración de sus niveles energéticos. Genera la dispersión de la luz en dos bandas espectrales a ambos lados de la frecuencia del haz de bombeo (*componentes Stokes y anti-Stokes*). Un sensor Raman tiene la gran ventaja de que es altamente sensible a la temperatura. Cuando una fibra cambia de temperatura, excita los modos vibracionales dentro de su propia estructura por lo que puede usarse para medir este parámetro.

*El Sensor Brillouin*, cuenta con una fuente láser que genera pulsos de luz de alta coherencia (ancho de banda reducido) que cuando se propagan en una fibra óptica generan luz retrodispersada con componentes Stokes (longitud de onda más larga) y anti-Stokes (longitud de onda más cortas), al igual que en un sensor Raman [7].

Estos sensores son muy utilizados por ej. para realizar mediciones de deformación (strain) y temperatura en tuberías de gas o petróleo. Tienen la ventaja, al igual que el anterior, que el sensor es la propia fibra y la medida es continua en distancia.

*Sensor por Scattering Rayleigh*, utiliza este efecto no lineal que genera la dispersión de la luz que se propaga por la fibra. Se emplea para la medición de distancias con instrumentos como el OTDR (reflectómetro óptico en el dominio temporal), los cuales por ej. permiten determinar la posición de un corte en la fibra en un enlace de comunicaciones.

### 1.3 Diferentes técnicas de multiplexación de sensores

En diversas aplicaciones puede haber una necesidad de sistemas multisensoriales. Tal sistema puede realizarse de varias maneras. Una forma es disponer de un conjunto de sensores discretos (puntuales) en una configuración de red o matriz, con salidas de sensores individuales multiplexados. Los esquemas más frecuentes son los siguientes:

***Multiplexación por división de tiempo (TDM – Time division multiplexing)*** se emplea una fuente luminosa pulsada que inyecta luz en una fibra óptica y analizando el tiempo de regreso de los pulsos es posible discriminar las respuestas de los diferentes sensores. Esta técnica es comúnmente empleada para soportar sensores distribuidos donde se registran medidas de deformación, temperatura u otros parámetros.

***Multiplexación por división de longitud de onda (WDM – Wavelength division multiplexing)*** es uno de los mejores métodos de multiplexación, ya que utiliza la potencia óptica de manera más eficiente. También tiene la ventaja de ser fácilmente integrado en otros sistemas de multiplexación, permitiendo un gran número de sensores soportados en una sola línea de fibra [6].

***Multiplexación por división espacial (SDM - Space division multiplexing)*** en esta última es posible combinar fibras en paralelo para generar grandes conjuntos de sensores utilizando relativamente pocas fibras ópticas. Este tipo de multiplexación es fácilmente extendida a  $m$  fibras y  $n$  sensores por fibra para formar arreglos de  $m \times n$  sensores [6].

### 1.4 Aplicaciones de sensores de fibras ópticas

El rápido crecimiento de la industria de las telecomunicaciones durante la última década ha estimulado el desarrollo y constantes mejoras en la tecnología de las fibras ópticas. Esta tendencia ha hecho que los sensores de fibra óptica (SFO) se vuelvan más competitivos frente a los sensores tradicionales. El ámbito de los SFO se ha visto beneficiado de este crecimiento, haciéndolos más asequibles en diversos sectores productivos. Un aspecto relevante, que ha permitido la diversificación de las aplicaciones de los SFO, es su posibilidad de operar en ambientes hostiles. Además, son muy atractivos para aplicaciones donde el sensor requiere ser *embebido* en el material, puesto que no perturban significativamente las características o propiedades del mismo. Asimismo, el grado de alta performance alcanzado por dispositivos tales como fuentes de luz, fotodetectores y demás componentes fotónicos, ha permitido el desarrollo de una nueva generación de sensores que



ofrece muchas e importantes oportunidades de medición y una gran variedad de aplicaciones. A continuación se van a ejemplificar algunas de ellas, dividiéndolas en áreas específicas como por ej. la ingeniería civil, energía eléctrica, industria del petróleo y el gas, industria aeroespacial y estudio de materiales [6], [8].

#### 1.4.1 Aplicaciones en la Ingeniería Civil

En los últimos años ha aumentado la demanda en la instalación de sensores para monitorear el estado de *estructuras civiles* tales como *edificios*, *carreteras* y *puentes* (Fig. 1.2), en el seguimiento de cracks (grietas), midiendo su longitud y velocidad de propagación, en el seguimiento de la deformación a largo plazo, o en la evaluación del daño post-sísmico, entre otros [9].



Fig. 1. 2 Monitoreo de puentes

También se evalúa la interacción entre hormigón y acero o materiales compuestos como fibras de vidrio o de carbono, que se emplean últimamente para reparar estructuras de hormigón.

Las *represas o diques* (Fig. 1.3) son probablemente las mayores estructuras en ingeniería civil, por lo tanto, es vital controlar sus propiedades mecánicas durante y después de la construcción con el fin de garantizar la calidad de la misma, su longevidad y por cuestiones de seguridad. Los sensores de fibra óptica distribuidos (que por ej. utilizan dispersión Brillouin) y las redes de Bragg son particularmente atractivos ya que tienen decenas de kilómetros de rango de medición con una resolución espacial de metros en el primer caso y centímetros en el segundo [10]. En el caso de *minas y túneles* (Fig. 1.3), los SFO resultan de vital importancia por cuestiones de seguridad en la medición de los cambios de carga y desplazamientos en las excavaciones subterráneas. Los sensores de redes de Bragg multiplexados son particularmente útiles, ya que pueden sustituir a los sensores eléctricos tradicionales reduciendo de manera drástica el cableado necesario.



Fig. 1. 3 Control de túneles y represas

### 1.4.2 Aplicación en la Industria de la Energía Eléctrica

Los SFO fueron aplicados por primera vez en el año 1977 en la *industria de la energía eléctrica*. Después de más de dos décadas de desarrollo, los sensores de corriente de fibra óptica entraron en el mercado. Estos sensores basados en el efecto Faraday han encontrado importantes aplicaciones en la medición y detección de fallas. Al igual que otras implementaciones de SFO, las *redes de Bragg* son ideales para su uso en esta área debido a su *inmunidad a las interferencias electromagnéticas*. A continuación, se mencionan dos aplicaciones específicas:

*Control de carga de las líneas de transmisión eléctrica*, los SFO resultan de particular utilidad para esta aplicación, en particular cuando se trata por ejemplo de líneas ubicadas en zonas montañosas donde el acceso para la inspección es muy difícil. Una línea de transmisión eléctrica necesita un sistema de medición para controlar la carga cambiante en la línea de alimentación, por lo que un sistema de sensores FBG multiplexados puede utilizarse para llevar a cabo esta tarea.

*Medición de la temperatura de bobinados*, para detectar los equipos defectuosos de alta potencia (generadores y transformadores) es necesaria una monitorización continua en la temperatura del devanado, lo que refleja el rendimiento de la refrigeración del sistema. Los sensores de FBG son la mejor opción para esta aplicación [6], [8].

### 1.4.3 Aplicación en la Industria del Petróleo y Gas

Los SFO son ideales para aplicaciones en la industria del petróleo y del gas (Fig. 1.4) debido a sus ventajas inherentes, tales como ser intrínsecamente seguros, mínimamente invasivos, inmunes a la emisión electromagnética, operables a gran temperatura y con capacidad de multiplexación.

*Monitoreo de Tuberías*, los sensores FBG se pueden utilizar con el fin de supervisar la temperatura en el tubo o la presión sobre las uniones, debido a que el índice de refracción de estas fibras es sensible a ambos parámetros. Además, pueden monitorear toda la longitud del tubo con una única fibra mediante el uso de métodos de multiplexación. En el caso de tuberías de agua de alta presión (cercana a 100 bar), se realiza el control de las

deformaciones experimentadas por los tubos de acero, mediante detectores instalados en la superficie interior de los mismos [11].



Fig. 1. 4 Monitoreo de oleoductos y pozos de petróleo

#### 1.4.4 Aplicación en la industria aeroespacial

*Investigación sobre materiales compuestos avanzados*, los SFO se utilizan habitualmente para el monitoreo de estructuras fabricadas para vehículos tales como aviones, satélites, etc. Comparando con los materiales metálicos, los materiales compuestos avanzados, pueden tener mayor resistencia a la fatiga, menor peso y ninguna corrosión. Por lo tanto, el uso de sensores de redes de Bragg embebidos en los materiales compuestos al momento de su elaboración, puede conducir a una reducción en el peso de las estructuras, de los intervalos de inspección y del costo de mantenimiento de las aeronaves, en consecuencia, a una mejora en el rendimiento. Debido a que los sensores FBG son sensibles tanto a la deformación como a la temperatura, son ideales para medir estos parámetros de manera simultánea [6]. En esta área, son también relevantes *los sensores de hidrógeno*, entre los que se encuentran aquellos basados en el campo evanescente generado en fibras ahusadas a las que se les realiza un recubrimiento de paladio [12]. Otro esquema utiliza redes de Bragg recubiertas con hilo de paladio, donde el sensor puede ser embebido en el material compuesto mediante un capilar del mismo material. Estos sensores pueden ser utilizados para detectar fugas en depósitos y tuberías en vehículos terrestres y aeroespaciales que utilizan como fuente de energía el hidrógeno. En el caso del sensor de Bragg, se lo utiliza para detectar deformaciones producidas por la expansión de un bobinado de paladio al absorber hidrógeno [13]. En el *Monitoreo de vehículos lanzadores (cohetes)*, se los emplea para obtener el perfil de despegue, momento en el cual se establecen las excitaciones mecánicas más violentas (vibraciones y shocks), para lo cual se utilizan sensores como los acelerómetros y giróscopos de fibra óptica (IFOG – *Interferometric Fiber Optic Gyroscope*). Ambos dispositivos conforman los denominados sistemas inerciales de navegación (INS) para aeronaves y misiles.



Fig. 1. 5 Monitoreo de vehículos lanzadores espaciales

## 1.5 Aplicación al estudio de materiales

Esta Tesis tiene como objetivo el estudio de materiales utilizando técnicas ópticas basadas en la utilización de redes de Bragg en fibra y el interferómetro de Fizeau. Particularmente se analizan materiales compuestos (como son las resinas usadas en odontología) y materiales cementicios, con el fin de monitorear los cambios dimensionales que ocurren durante su secado y endurecimiento.

A continuación, se introduce la problemática de los materiales mencionados.

### 1.5.1 Resinas compuestas

Las resinas compuestas (composites) se emplean fundamentalmente, en la *sustitución y reparación* del tejido dental. Por esta razón las resinas dentales se clasifican convencionalmente de acuerdo a su uso, que puede ser la restauración de piezas dentales o la fabricación de prótesis. Las primeras formulaciones presentaban serios problemas de durabilidad y funcionalidad ya que sus propiedades físico-mecánicas eran muy deficientes. Por ejemplo, inicialmente presentaban un alto coeficiente de expansión térmica y un alto porcentaje de contracción de curado, puesto que se utilizaba como relleno polvo de metacrilato de metilo. Posteriormente, el relleno polimérico fue sustituido por un material inorgánico llegando a obtener composiciones con una gran mejora en sus características y propiedades. Actualmente las resinas compuestas se siguen estudiando debido al problema de contracción de polimerización que aún prevalece. El estudio de la durabilidad de las resinas compuestas es una tarea muy difícil de llevar a cabo directamente en los pacientes, debido a los costos, tiempo y por lo difícil de controlar y normalizar el procedimiento. Por otro lado, existe una gran variedad de factores que dependen de cada paciente, como por ej. los hábitos alimenticios, las condiciones térmicas y el PH de su cavidad oral, la fuerza de masticación y los hábitos de cepillado, entre otros. Todo ello dificulta la interpretación de resultados. Por todas estas dificultades, los científicos dedicados al desarrollo de nuevas formulaciones de resinas dentales, para la estimación de su eficiencia, realizan estudios “in vitro” que incluyen la determinación de propiedades mecánicas. Actualmente, las mejoras

en las formulaciones, el desarrollo de nuevas técnicas de colocación y la optimización de sus propiedades físicas y mecánicas, han hecho la restauración mediante resinas compuestas más confiable y predecible [14].

En esta Tesis se estudian las resinas dentales aplicando técnicas ópticas y buscando contrarrestar el problema de contracción generado por la polimerización de las mismas, ya que este material desempeña un papel relevante en la solución de problemas presentes en la salud dental. Este es un proceso complejo en el cual se generan fuerzas internas en la estructura del material de restauración que se transforman en tensiones cuando el material está adherido a las superficies dentarias. Las tensiones que se producen durante la etapa de la polimerización donde el material puede aún fluir, pueden ser disipadas en gran medida con el flujo del material [15]. Una vez fotocurada la resina, el material no fluye y las tensiones en su intento de disiparse pueden generar: deformación externa, brechas en la interface de restauración o una fractura del material restaurador. El proceso de curado de las resinas dentales, es un proceso rápido de unos pocos minutos (dependiente de la cantidad de material). Con el fin de monitorear y caracterizar el proceso de curado es importante contar con una técnica no invasiva que no altere la composición del material y el proceso en sí mismo, además de tener una alta precisión. Las técnicas ópticas ofrecen dichas ventajas.

### 1.5.2 Materiales cementicios

En el caso del hormigón (que se compone de una pasta aglutinante formada con cemento y agua, combinada con agregados finos y gruesos), los cambios de volumen en principio dependen del tamaño de la muestra utilizada para la medición. La contracción a edad temprana es una preocupación, ya que es durante las primeras horas, inmediatamente después de la fundición o colado (es decir, una vez preparada la mezcla y colocada en la obra civil) que el hormigón tiene la capacidad de deformación más baja pero es más sensible a las tensiones internas. Esta contracción puede dar lugar a *grietas* que se forman del mismo modo que en edades más avanzadas. Incluso si se generan grietas microscópicas en edad temprana, en edades más avanzadas ellas se pueden abrir o progresar causando problemas a largo plazo [16]. El estudio de estos procesos en el estado fresco es un requisito para algunas lechadas comerciales diseñadas especialmente para piezas de estanqueidad y elementos estructurales. La contracción que se produce en el material durante las primeras horas generalmente es ignorada, porque su magnitud se supone que es mucho más pequeña que la contracción a largo plazo. Esta hipótesis en general es errónea, por lo que este proceso es motivo de estudio cada vez más frecuentemente, aunque los métodos convencionales no se pueden aplicar dado que el material en estado fresco no es sólido. Por ello, las técnicas ópticas no invasivas son una buena alternativa para realizar este monitoreo.

En la actualidad, los morteros y hormigones de cemento contienen, a menudo, uno o más aditivos químicos. Estos aditivos tienen por propósito modificar una o varias propiedades de las mezclas cementicias, mejorando sus prestaciones, ya sea en su estado fresco o endurecido. Si bien su uso no es esencial para todos los casos, su incidencia en las propiedades y desempeño en hormigones con funciones específicas los convierte en un componente necesario. Las dosis de uso de estos materiales son, en comparación con los

demás componentes de las mezclas, notoriamente menores con relación al contenido del cemento, típicamente las dosis de aditivos están entre 0.2-2 % de la mezcla total, aunque su influencia en las propiedades finales de los hormigones y morteros es significativa. Sus efectos pueden ser diversos, por ej. en el tiempo de fraguado, en sus propiedades de resistencia, entre otros aspectos [17]. Para mejorar las propiedades del cemento es muy importante el estudio de este tipo de aditivos, con el fin de garantizar su funcionabilidad cuando son agregados a la mezcla. Las técnicas ópticas, por sus excelentes ventajas en el campo del estudio de materiales, permiten el monitoreo del fraguado de mezclas cementicias con diferentes aditivos, aportando mejoras dentro del campo de la construcción por ejemplo reduciendo los costos de operación y el mantenimiento en estructuras de hormigón, logrando mejores acabados, prolongando su periodo de vida útil, etc.



# Capítulo 2

## *Redes de Bragg en fibra óptica*

### 2.0 Introducción

En este capítulo se discuten aspectos teóricos que brindan las características y propiedades de las redes de Bragg grabadas en fibra óptica. El planteamiento se hace de manera general describiendo los fundamentos básicos de *redes de Bragg uniformes (FBG)* y las *redes de Bragg con Chirp (CFBG)*, considerando la teoría de acople de modos, con el fin de comprender sus características fundamentales.

Las redes de Bragg en fibra comenzaron a desarrollarse en 1989 a partir del descubrimiento de la fotosensibilidad en fibras de sílice dopadas con germanio, que permitió generar una variación del índice de refracción del núcleo de la fibra cuando la misma era irradiada lateralmente con un patrón periódico de luz ultravioleta [18]. Esto permitió diseñar distintos dispositivos con propiedades espectrales particulares, dependientes de si la variación en el núcleo de la fibra es periódica o no. Desde entonces, su aplicación en la tecnología de sensores de redes ha atraído una gran atención y ha sido objeto de desarrollo continuo.

### 2.1 Tipos de redes

Existen diferentes tipos de redes dependiendo del diseño y la aplicación. La estructura de la red puede variar a través del índice de refracción, o el período de red. El período de la red puede ser uniforme o variar gradualmente, y el cambio puede estar localizado o distribuido. Diferentes estructuras de cambio de índice de refracción se ilustran en la Fig. 2.1 [5].

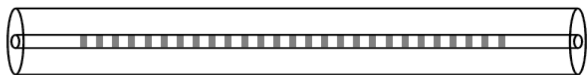


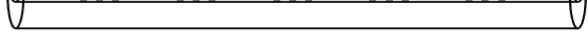
Estructura de la red	Tipo de red
	FBG
	CFBG
	TFBG
	SFBG

Fig. 2. 1 Tipos de redes

**Redes de Bragg Uniformes (FBG)**, tienen periodos de cientos de nanómetros y acoplan modos luminosos contra-propagantes en el núcleo. Estas redes se consideran excelentes dispositivos para detectar deformación o tensión (*strain*) y temperatura. Las medidas de estos parámetros se traducen en cambios de longitud de onda, eliminando los problemas de fluctuación de amplitud o intensidad que existen en muchos tipos de sensores.

**Redes Tildeadas (TFBG)**, la variación del índice de refracción está en un ángulo con respecto al eje óptico; es decir, el ángulo entre los planos de la red y el eje de la fibra es menor que  $90^\circ$ . El ángulo de inclinación en una TFBG tiene un efecto sobre la longitud de onda reflejada y el ancho de banda. En esta red es posible acoplar la luz hacia afuera del núcleo, en modos de radiación que se propagan en sentido contra-direccional. Estas redes son utilizadas, por ejemplo, para medir índices de refracción y nivel de concentración en sensores bioquímicos, sensores de humedad, etc. [19], [20].

**Redes con Chirp (CFBG)**, son redes en las que el período de la modulación de índice no es constante. Dicha aperiodicidad se denomina “chirp” y en el caso de que sea lineal, muestran un incremento monótono en el espaciado entre los planos de la red. La longitud de onda reflejada cambia con el período de red, ensanchando el espectro reflejado. Una red que posee chirp lineal tiene la propiedad de añadir dispersión, es decir, diferentes longitudes de onda reflejadas desde la red estarán sujetas a diferentes retardos. Este tipo de redes se utilizan en comunicaciones para compensar la dispersión de un enlace y en el área de los sensores.

**Redes Súper-estructuradas (SFBG)**, es una red de Bragg estándar con rápida variación espacial del índice de refracción de amplitud uniforme, en la que se superpone una modulación lenta del índice de refracción. Estas redes tienen aplicaciones en el procesamiento de señales y también en los láseres de fibra sintonizable.

Otro tipo de redes de difracción que pueden generarse en una fibra óptica, son las llamadas:

**Redes de Periodo largo (LPG)**, tienen periodos de decenas o cientos de micrones y longitud de unos pocos centímetros. Las LPG acoplan modos co-propagantes del núcleo y del revestimiento, por esto sus resonancias sólo pueden medirse en el espectro de transmisión. A diferencia de las FBG, las LPG no reflejan luz. El acoplamiento entre modos introduce pérdidas en la luz que se propaga por el núcleo, las cuales son



dependientes de la longitud de onda, por lo que se usan para ecualizar la ganancia en amplificadores de fibra dopada con erbio y en aplicaciones de sensado.

En cuanto a la obtención de diferentes estructuras de FBG a partir del tipo de variación del índice de refracción, deben considerarse dos características principales: el perfil de la variación y el desplazamiento del valor medio. Típicamente, el perfil de índice de refracción puede ser uniforme o apodizado, y el desplazamiento del valor medio, positivo o cero. Algunos ejemplos se muestran en la Fig. 2.2.

Las redes con desplazamiento de fase permiten generar filtros ópticos de transmisión muy estrechos (ej. DFB). Un ejemplo de ello se plantea en el Capítulo 6.

El espectro de reflexión de una red de Bragg de longitud finita y con modulación uniforme del índice de refracción, presenta una serie de lóbulos laterales en longitudes de onda adyacentes a la longitud de onda central o de máxima reflexión. En diversos casos es muy importante reducir al mínimo y si es posible eliminar la reflectividad de estos lóbulos laterales. Esto se logra con una técnica denominada “apodización”.

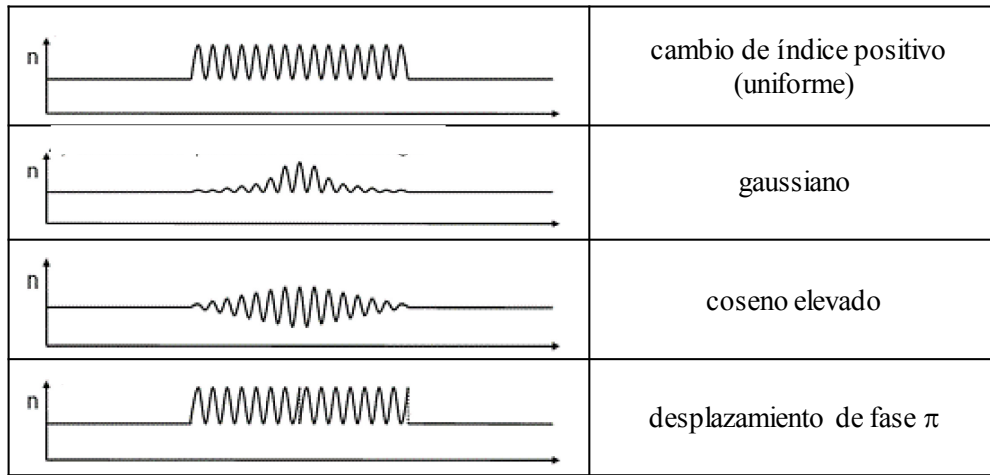


Fig. 2. 2 Tipos de variación de índice

**Redes Apodizadas**, la amplitud de la modulación de índice de refracción varía gradualmente para acercarse a cero al final de la red. Una red apodizada ofrece una mejora significativa en la supresión de lóbulos laterales mientras se mantiene la reflectividad y el ancho de banda estrecho. Las funciones comúnmente usadas para apodizar son las gaussianas y el coseno elevado [5].

## 2.2 Redes de Bragg uniformes

La Fig. 2.3 muestra una sección de fibra de unos pocos mm o cm de longitud, con una modulación periódica en dirección axial del índice de refracción efectivo del núcleo (red de Bragg uniforme o FBG).

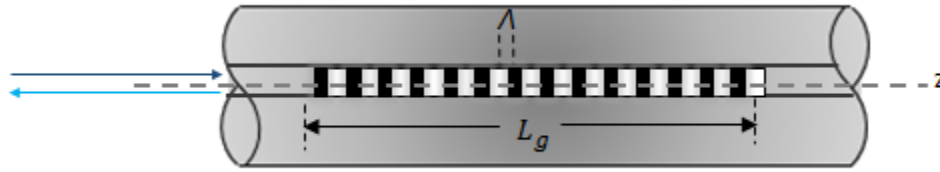


Fig. 2.3 Esquema de una red de Bragg

Cuando un haz de luz ( $A_i$ ) de cierto ancho espectral se propaga por la fibra y alcanza la red, una banda espectral muy angosta (centrada en la longitud de onda de Bragg,  $\lambda_B$ ) es reflejada ( $A_r$ ), mientras que las demás componentes espectrales la atraviesan sin sufrir modificación ( $A_T$ ) (Fig. 2.4). Es decir, la red acopla la luz del modo fundamental que se propaga por el núcleo hacia adelante, con el modo que se propaga por el núcleo hacia atrás (acopla modos contra-propagantes en el núcleo de la fibra). Este acoplamiento sólo ocurre para un rango muy angosto de longitudes de onda centrado en la longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ), por lo que la respuesta espectral de estos dispositivos es muy selectiva.

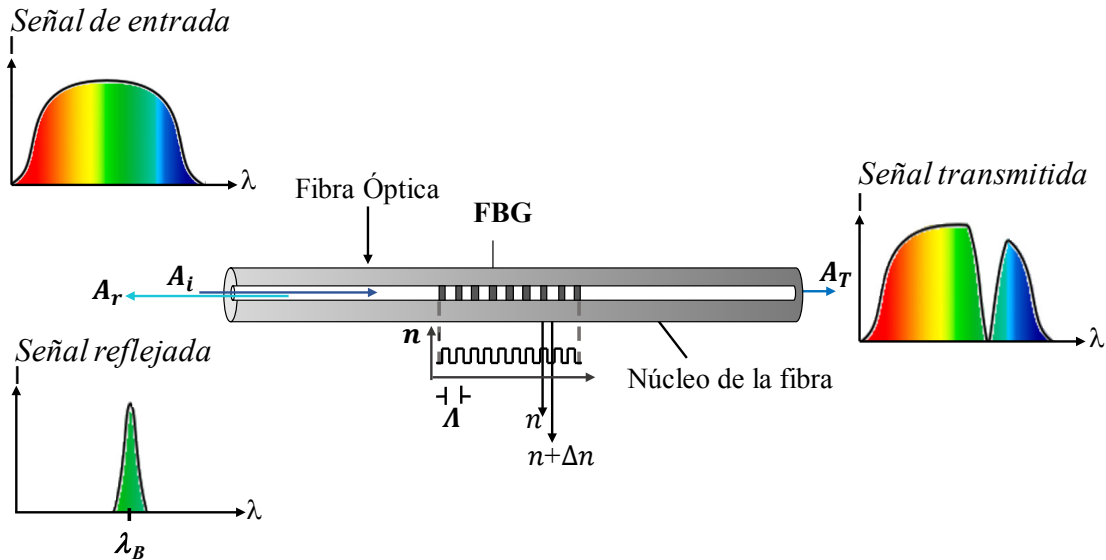


Fig. 2.4 Principio de funcionamiento de una FBG

Los parámetros que determinan las propiedades de transmisión y reflexión de una FBG son: el contraste de la variación de índice de refracción ( $\Delta n$ ) y la longitud de la red ( $L_g$ ) que es igual a un número entero de veces el período de la modulación ( $\Lambda$ ) (constante para una red uniforme). La longitud de onda de Bragg o de máxima reflexión está dada por [21], [22]:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (2.1)$$

donde  $n_{eff}$  es el índice refracción efectivo del núcleo. Normalmente, las FBG tienen períodos de pocos cientos de nm (por ej. para  $\lambda_B$  en la banda de 1550 nm,  $\Lambda$  es del orden de los 500 nm).

La Fig. 2.5 muestra esquemáticamente la respuesta espectral de una FBG medida por reflexión, donde se indican algunos parámetros de interés. El pico de máxima reflectividad

se mide con referencia a la longitud de onda central de la red ( $\lambda_B$ ) y el ancho de banda se mide a 3dB del pico de máxima reflectividad.

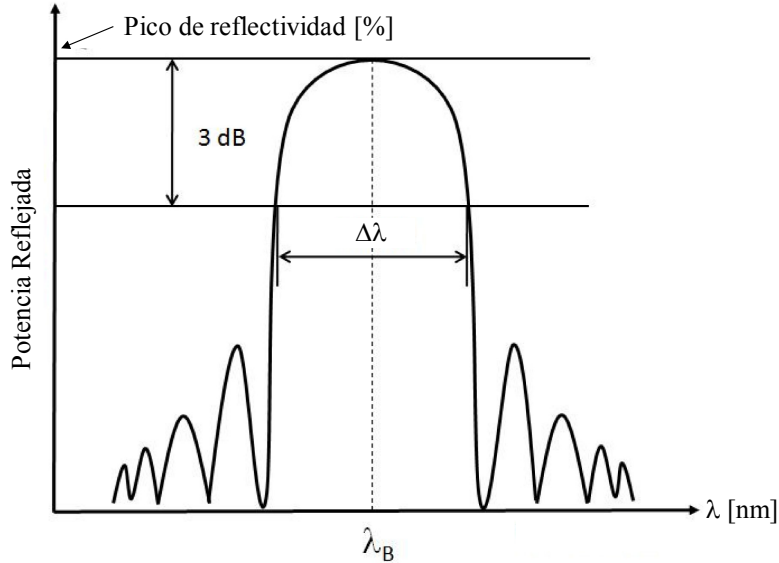


Fig. 2. 5 Parámetros relevantes del espectro de reflexión de una FBG

### 2.3 Red de Bragg con “Chirp” lineal

Las redes con Chirp son aquellas que tienen un periodo no uniforme a lo largo de la longitud de la red. El período puede variar de forma simétrica o asimétrica, ya sea aumentando o disminuyendo su valor alrededor de un paso en medio de la red. El chirp en las redes puede tomar diferentes formas: puede ser lineal, es decir, que el periodo varía linealmente con la longitud de la red, puede ser cuadrático, o incluso puede tener saltos en el periodo. Una red podría también tener un periodo que varía aleatoriamente a lo largo de su longitud [21].

En la Fig. 2.6 se muestra el esquema de una red con chirp lineal, de longitud  $L_g$  y ancho de banda  $\Delta\lambda_c$  que se define como:

$$\Delta\lambda_c = 2n_{eff} |\Lambda_{Corto} - \Lambda_{Largo}| \quad (2.2)$$

$$\Delta\lambda_c = 2n_{eff} \Delta\Lambda_c \quad (2.3)$$

donde  $\Lambda_{Corto}$  y  $\Lambda_{Largo}$  son los períodos menor y mayor de la red de índice, respectivamente.

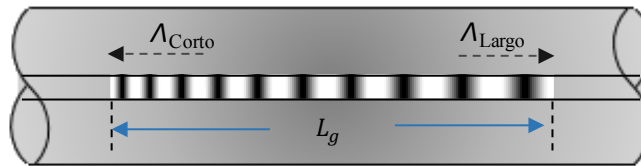


Fig. 2. 6 Esquema de una red de Bragg con Chirp lineal

Cuando un haz luminoso de cierto ancho espectral incide sobre una red de Bragg con chirp (CFBG), cada componente espectral se reflejará en un punto diferente de la red, es decir, la longitud de onda reflejada (o de Bragg) cambia con el periodo de la red, ensanchando el espectro de reflexión. Esto hace que diferentes longitudes de onda experimenten diferentes retardos al reflejarse. Por lo tanto, la reflexión de una red con chirp es una función de la longitud de onda y cuando la luz que entra en una red con chirp positivo (el período aumenta desde el extremo de entrada) sufre un retardo de grupo  $\tau_g(\lambda)$  dado por:

$$\tau_g(\lambda) \approx \frac{(\lambda_0 - \lambda) 2L_g}{\Delta\lambda_c v_g} \quad (2.4)$$

donde  $\lambda_0$  es la longitud de onda de Bragg en el centro del ancho de banda de la red con chirp y  $v_g$  es la velocidad de grupo promedio de la luz en la fibra, es decir:

$$v_g = c/n_g \quad (2.5)$$

siendo  $n_g$  el índice de refracción de grupo, que se relaciona con las variaciones de  $n_{eff}$  en función de la longitud de onda de la siguiente manera:

$$n_g = n_{eff} - \lambda \frac{dn_{eff}}{d\lambda} \quad (2.6)$$

La expresión 2.4 es válida para  $2n_{eff} \Lambda_{Corto} < \lambda < 2n_{eff} \Lambda_{Largo}$

El efecto de una red con chirp es dispersar la luz al introducir un retardo máximo de  $2L_g/v_g$  entre las longitudes de onda más corta y más larga que componen el pulso luminoso. Por ello, las CFBG se utilizan para compensar la dispersión cromática en enlaces de comunicaciones por fibra óptica. Existen varios parámetros que afectan el desempeño de una red de Bragg con chirp, como son la pérdida de inserción (debida a una reflectividad menor al 100%), dispersión, ancho de banda, dispersión de los modos por polarización y desviaciones de la linealidad del retardo de grupo y rizado (*ripple*) del retardo de grupo.

Las redes con chirp también se usan en la compresión de pulsos como ocurre en los sistemas CPA (Chirped-Pulse Amplification), o para sensado distribuido (por ej. para monitorear temperatura a lo largo de un dispositivo).

Las redes de Bragg con modulación de índice aperiódica pueden tener propiedades interesantes, tales como curvas de reflectividad sin lóbulos laterales, múltiples bandas de reflexión o perfiles de dispersión cromática especiales.

## 2.4 Propagación de la luz en una FBG. Métodos de simulación

Existen diferentes técnicas para simular el comportamiento de redes de Bragg en fibra óptica, una de ellas basada en el *método de dispersión inversa Gel'-Fand-Levitan-Marchenko*. Esta técnica se basa en ecuaciones integrales acopladas, pero tiene la desventaja de que su solución es muy compleja, aunque permite diseñar redes con características particulares. También está la técnica desarrollada para el análisis de guías de onda metálicas por *Rouard*. Esta técnica, ampliada por *Weller-Brophy y Hall* [23], se fundamenta en el principio de que la guía de ondas puede ser segmentada en películas delgadas de sub-longitudes de onda y luego se propagan los campos reflejados y transmitidos en las diferentes interfaces. Sin embargo, requiere mucho tiempo de cálculo y

sus resultados están limitados por errores de redondeo. Por último, cabe destacar los dos métodos utilizados para simular redes de Bragg uniformes y no uniformes en el desarrollo del presente trabajo de Tesis. Uno de ellos es la *Integración Numérica de las Ecuaciones Diferenciales de Modos Acoplados*, que es el más directo y preciso, pero no es el más rápido. Además, sólo permite simular redes uniformes. El otro, es el *Método de la Matriz de Transferencia*, que es preciso, rápido en el proceso de cálculo y flexible, ya que también permite analizar redes no uniformes [21], [23].

### 2.4.1 Simulación de redes de Bragg uniformes mediante la integración numérica de las ecuaciones de modos acoplados

Para analizar cómo afecta la realimentación distribuida que se produce desde una FBG a la propagación de la luz en una fibra óptica, hay que considerar el acoplamiento de los campos electromagnéticos transmitidos y reflejados, por lo que hay que utilizar la Teoría de los Modos Acoplados. El acoplamiento de modos se debe a la modulación periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra en la región de la FBG, que puede expresarse como [24]:

$$n(\omega, z) = n(\omega) + n_2 |E|^2 + \delta n_g(z) \quad (2.7)$$

donde  $n(\omega)$  es el valor promedio,  $n_2 |E|^2$  representa el efecto de las no linealidades de la fibra y  $\delta n_g(z)$  (típicamente  $\sim 10^{-5} - 10^{-3}$ ) representa la variación del índice en la red a lo largo del eje  $z$  de propagación, la cual puede ser expandida en una serie de Fourier como:

$$\delta n_g(z) = \sum_j^{\infty} \delta n_j \exp[i2\pi j(z/\Lambda)] \quad (2.8)$$

siendo  $\Lambda$  el periodo de la modulación de índice. Sin embargo, para las potencias ópticas utilizadas en estas aplicaciones, los cambios de índice no lineales pueden ser despreciados ( $|E|^2 = \text{Intensidad} = P A_{\text{eff}}$ ,  $n_2 \approx 3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $A_{\text{eff}} = 50-80 \mu\text{m}^2$  en la región de 1550 nm).

Para describir cualitativa y simplificada la propagación luminosa en la red, supongamos un campo incidente ( $A_i$ ) que encuentra un cambio local en el índice de refracción de la fibra por la presencia de la FBG (Fig. 2.7). Parte de la energía se refleja en un campo  $A_r$  mientras que otra parte de la energía difractada sigue su camino por la red (se transmite). Como la FBG es periódica, parte de la energía del modo propagado encuentra una nueva perturbación del índice de refracción por lo que el proceso se repite. Al final de la red, se tendrá o no energía dependiendo de cómo sea la interacción entre las ondas transmitidas y reflejadas. Cuando la onda incidente está en fase con las ondas reflejadas en cada periodo de la red, se dice que se produce la condición de ajuste o igualación de fase, para la cual se producirá un máximo en el espectro de reflexión de la red en la longitud de onda de Bragg. En síntesis, el funcionamiento de la red de difracción de Bragg consiste en la suma sucesiva de reflexiones coherentes en los saltos de índice de refracción (la luz viaja en el modo fundamental en sentido direccional y cuando se refleja lo hace en sentido contra-direccional).

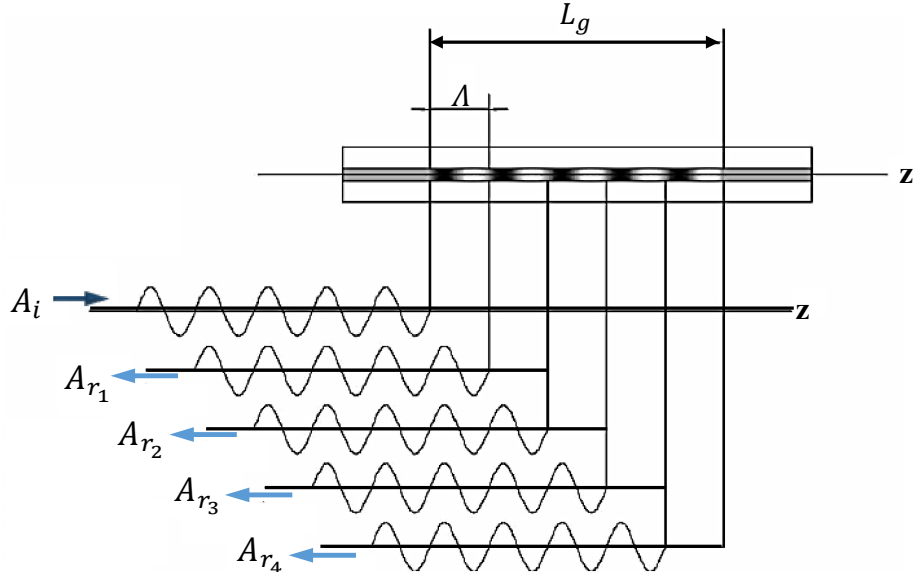


Fig. 2. 7 Condición de ajuste o igualación de fase en una FBG uniforme

Suponiendo una aproximación ideal de la teoría de modos acoplados, se asume que la componente transversal del campo eléctrico puede ser escrita como una superposición de modos correspondientes a la propagación de las ondas hacia adelante  $A_i$  y hacia atrás  $A_r$  (Ec. (2.9)).

$$E(r) = F(x, y)[A_i(z) \exp(i\beta_r z) + A_r(z) \exp(-i\beta_r z)] \quad (2.9)$$

donde  $F(x, y)$  es la distribución transversal modal en el núcleo de la fibra,  $A_i$  y  $A_r$  son amplitudes con variaciones lentas viajando en la dirección  $+z$  y  $-z$ , y  $\beta_r = m\pi/\Lambda$  es el número de onda de la red ( $m$  se elige para que  $\beta_r$  se aproxime a  $\beta$  (la constante de propagación del modo)).

Reemplazando el campo  $E(r)$  en la solución de la Ecuación de Helmholtz

$$\nabla^2 E + n^2(z)k_0^2 E = 0 \quad (2.10)$$

y considerando una red uniforme a lo largo del eje  $z$ , bajo condiciones de contorno apropiadas ( $A_i(L_g) = 1$  y  $A_r(L_g) = 0$ ), despreciando la segunda derivada  $d^2 A(z, \delta)/dz^2$  (ya que  $A(z, \omega)$  se asume como una función de variación lenta en  $z$ ), y despreciando las no linealidades, se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales de modos acoplados que satisfacen las distribuciones modales de los campos incidente y reflejado:

$$\frac{dA_i(z, \delta)}{dz} = i \delta_\beta A_i + i \kappa A_r \quad (2.11)$$

$$-\frac{dA_r(z, \delta)}{dz} = i \delta_\beta A_r + i \kappa A_i \quad (2.12)$$

donde  $\delta_\beta$  es el desajuste o desintonía respecto de la condición de Bragg:

$$\delta_\beta = \beta - \beta_B = (\omega - \omega_B) \frac{n_{eff}}{c} = 2\pi n_{eff} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (2.13)$$

Resolviendo estas ecuaciones lineales, se obtiene la función de transferencia de la red o coeficiente de reflexión  $r_g$ :

$$r_g = \frac{A_r(0)}{A_i(0)} = \frac{ik \operatorname{sen}(qL_g)}{q \cos(qL_g) - i\delta_\beta \operatorname{sen}(qL_g)} \quad (2.14)$$

donde “ $k$ ” es el coeficiente de acoplamiento  $k = \pi n_{eff} / \lambda_B$  (2.15), “ $q$ ” es la relación de dispersión  $q = \sqrt{|k|^2 - \delta_\beta^2}$  (2.16) y  $L_g$  es la longitud de la red.

El cuadrado del valor absoluto de  $r_g$  da como resultado la reflectividad de la red, detalladamente calculada a continuación.

$$|r_g|^2 = \frac{i^2 k^2 \operatorname{sen}^2(qL_g)}{q^2 \cos^2(qL_g) - i^2 \delta_\beta^2 \operatorname{sen}^2(qL_g)} \quad (2.17)$$

$$|r_g|^2 = \frac{-k^2}{q^2 \cot^2(qL_g) + \delta_\beta^2} \quad (2.18)$$

Teniendo en cuenta que la máxima reflectividad ocurre en el centro de la banda de parada, o sea, para  $\delta_\beta = 0$ , ella estará dada por

$$R_{m\acute{a}x} = |r_g|^2 = \tan^2(kL_g) \quad (2.19)$$

#### 2.4.1.1 Ejemplo de simulación de una red de Bragg uniforme mediante integración de ecuaciones de modos acoplados

Partiendo de la función de transferencia antes mencionada (Ec. 2.14), se simulará el funcionamiento una red de Bragg uniforme. Los parámetros utilizados en la simulación son el índice efectivo  $n_{eff} = 1.47$  y la longitud de onda de Bragg  $\lambda_B = 1550\text{nm}$ . Se analizará el efecto de variar la longitud de la red ( $L_g$ ) y el contraste del cambio en el índice de refracción ( $dn$ ) (que indica que tan intensa es la modulación de índice en la red).

En la Fig. 2.8 (a y b) se muestran los espectros de reflectividad obtenidos de la simulación, manteniendo constante el cambio de índice de refracción ( $dn = 1\text{e-}4$ ) y variando el largo de la red (por claridad de las figuras, se muestran dos rangos de variación de  $L_g = 1\text{-}8\text{mm}$  y  $10\text{-}50\text{mm}$ ). En la Fig. 2.9 (a) se observa que inicialmente la reflectividad aumenta con la longitud de la red, sin embargo, a partir de unos 20 mm aproximadamente (para el valor de  $dn$  utilizado), la reflectividad máxima alcanza un valor de 100%. Por otro lado, en la Fig. 2.9 (b) se puede notar cómo disminuye el ancho espectral FWHM a medida que aumenta la longitud física de la FBG.

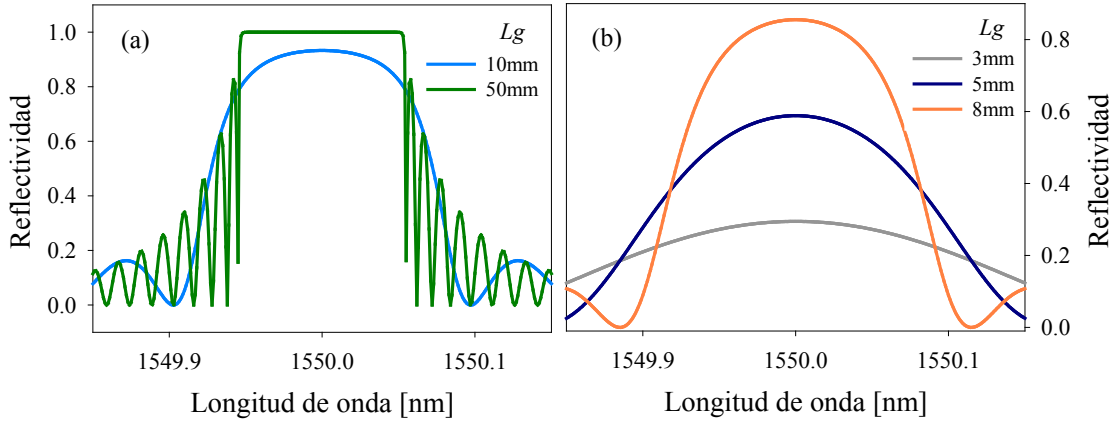


Fig. 2. 8 Reflectividad de una FBG uniforme para diferentes valores de su longitud

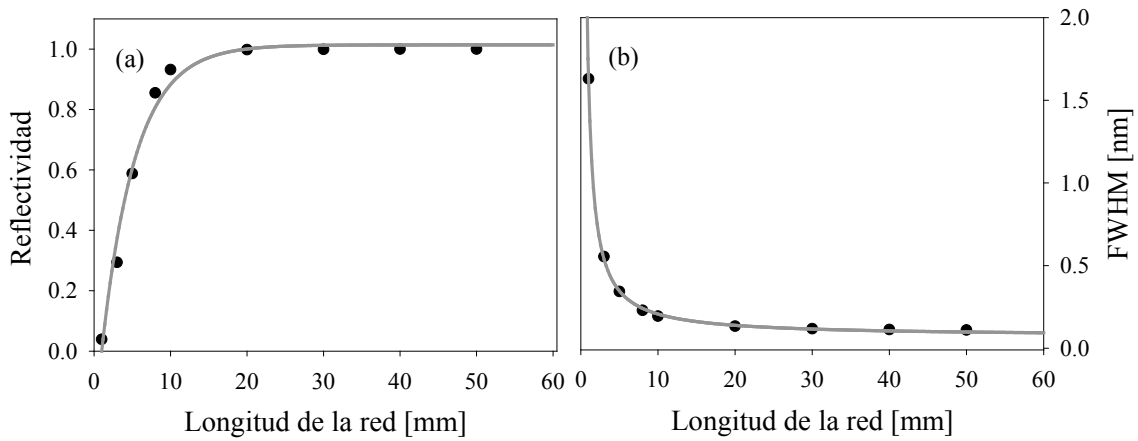


Fig. 2. 9 Reflectividad y ancho espectral para diferentes longitudes de una FBG

En la Fig. 2.10 (a) se muestra el espectro de reflexión de una red de 10mm de longitud simulada con diferentes valores de  $dn$  ( $5e-4$ ,  $1e-4$ ,  $5e-5$  y  $1e-5$ ) y en la Fig. 2.10 (b) se ilustra el espectro de reflexión, pero esta vez para una red de 50mm con diferentes  $dn$  ( $1e-4$ ,  $5e-5$  y  $1e-5$ ). Comparando las dos figuras se nota que cuanto mayor es el  $dn$  mayor es la reflectividad y cuanto menor es  $Lg$  mayor es el ancho espectral.

En las siguientes figuras (Fig. 2.11 (a y b)) se muestra el comportamiento de la reflectividad, la fase y el retardo de grupo para una red de 10mm de largo.

En esta simulación se le realizan dos variaciones del  $dn$  ( $1e-4$  y  $5e-4$ ) cuyos valores correspondientes de KL son  $KL=2$  y  $KL=10$ . En las figuras es evidente que al cambiar el “ $dn$ ” por un valor menor, se ven afectados la reflectividad y el cambio de fase, aunque las redes tengan el mismo largo.



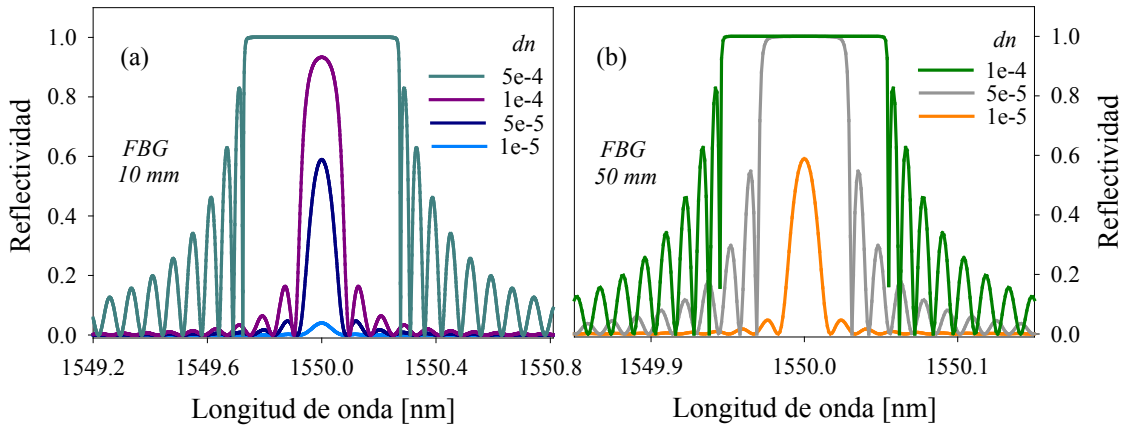


Fig. 2. 10 Espectro de reflexión de dos FBG evaluando la variación del  $dn$

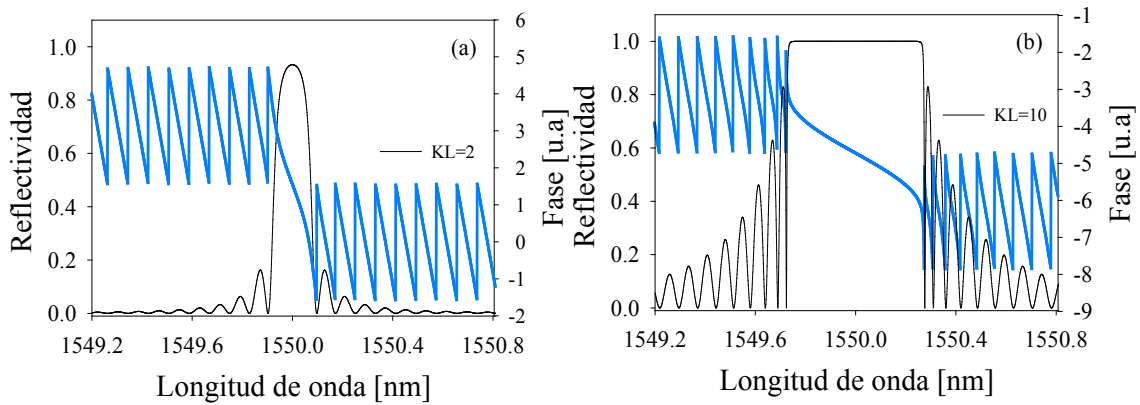


Fig. 2. 11 Espectros de reflectividad y fase

En las Figs. 2.12 (a y b) un  $dn$  menor implica menor reflectividad, menor ancho espectral y menor retardo de grupo. También es evidente una característica desfavorable en los espectros de reflexión de las redes simuladas y es la presencia de múltiples lóbulos a ambos lados de la banda de parada. Estas bandas laterales proceden de reflexiones débiles producidas en los extremos de la red, debido a un cambio repentino del índice de refracción ( $dn$ ) en relación con un valor fuera de la región de la red. Más adelante se discutirán técnicas para disminuir la presencia de los mismos.

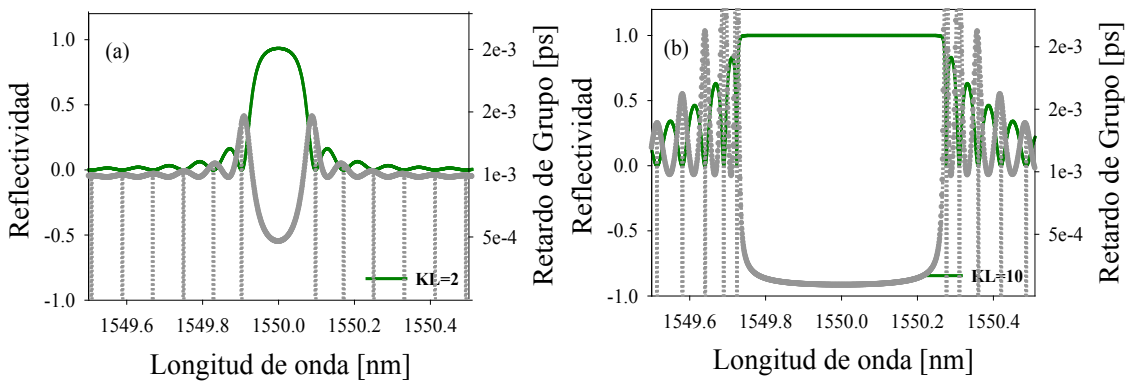


Fig. 2. 12 Espectros de reflectividad y retardo de grupo

### 2.4.2 Simulación de redes con el Método de la Matriz de Transferencia (MMT)

Este método de la matriz de transferencia es ideal para modelar *redes de Bragg uniformes y no uniformes*. El método permite calcular la reflexión o transmisión de una FBG, dividiéndola en secciones más pequeñas de tamaño  $\delta l_j$ , utilizando una matriz cuadrada y las ecuaciones de modos acoplados para calcular los campos de salida de la sección de red analizada, donde se suponen constantes tanto el período como el coeficiente de acoplamiento. Las salidas de la primera matriz  $T^1$  son usadas como campos de entrada de la matriz adyacente  $T^2$ . El proceso se continúa hasta modelar el perfil completo de la red. Cada sección considerada debe tener un número entero de períodos y la solución analítica permite obtener la amplitud de la reflectividad y de la transmisión, y la fase. No es necesario que las secciones tengan la misma longitud. Este método permite simular tanto redes débiles como intensas, con o sin chirp y apodización (o suavizado de la variación de índice en los extremos de la red).

La Fig. 2.13 muestra una sección de la red ( $\delta l_1$ ) que puede considerarse como un dispositivo de cuatro puertos, donde  $A_i(-\delta l_1/2)$  y  $A_r(-\delta l_1/2)$  son los campos de entrada, y  $A_i(\delta l_1/2)$  y  $A_r(\delta l_1/2)$  son los campos de salida.

Para una red corta y uniforme, los campos del lado derecho de la siguiente expresión son transformados por la matriz  $T^1$  en los campos del lado izquierdo [21], [25]–[28]:

$$\begin{bmatrix} A_i(-\delta l_1/2) \\ A_r(-\delta l_1/2) \end{bmatrix} = [T^1] \begin{bmatrix} A_i(\delta l_1/2) \\ A_r(\delta l_1/2) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Para una red de reflexión, la amplitud del campo de entrada  $A_i(-\delta l_1/2)$  se normaliza a la unidad, y la amplitud del campo reflejado a la salida de la red  $A_r(\delta l_1/2)$  es cero, ya que no hay perturbaciones más allá del final de la red (Ec. 2.21).

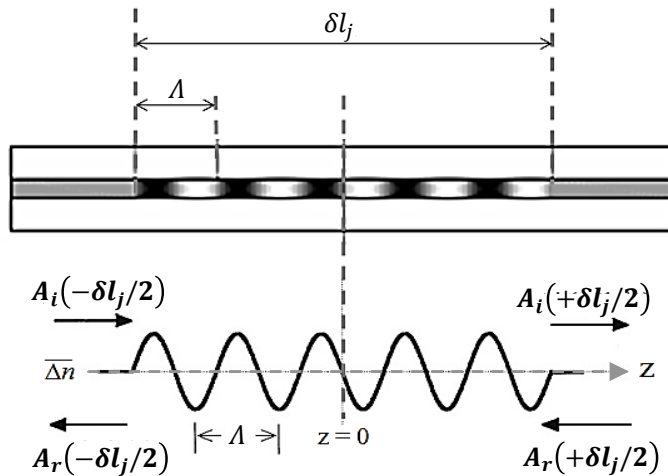


Fig. 2. 13 Variación del índice de refracción en una sección de FBG

$$\begin{bmatrix} 1 \\ A_r(-\delta l_1/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i(\delta l_1/2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Para la solución de los campos de salida a través de los modos acoplados, los elementos de la matriz para la  $j$ -ésima sección son:

$$T^j = \begin{bmatrix} \cosh(q\delta l_j) - \frac{i\delta_B \sinh(q\delta l_j)}{q} & -\frac{ik \sinh(q\delta l_j)}{q} \\ \frac{ik \sinh(q\delta l_j)}{q} & \cosh(q\delta l_j) + \frac{i\delta_B \sinh(q\delta l_j)}{q} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

donde  $\delta l_j$  es la longitud de la  $j$ -ésima sección uniforme,  $k$  es el coeficiente de acoplamiento,  $\delta_B$  es el corrimiento en frecuencia (Ec. 2.23) y  $q$  es la relación de dispersión (Ec. 2.24).

$$\delta_B = 2\pi n_{eff} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (2.23) \quad y \quad q = \sqrt{|k|^2 - \delta_B^2} \quad (2.24)$$

Después de tener en cuenta las condiciones de contorno, la amplitud transmitida para una sección de la red es  $A_i(\delta l_1/2)$ :

$$A_i(\delta l_1/2) = \frac{1}{T_{11}} \quad (2.25)$$

y la amplitud reflejada para una sección de la red es  $A_r(-\delta l_1/2)$ :

$$A_r(-\delta l_1/2) = \frac{T_{21}}{T_{11}} \quad (2.26)$$

Hasta ahora se mencionó *el caso de una sección corta de la red*, si se considera *la red completa*, los campos a la derecha pueden ser transformados de nuevo por una matriz,  $T^2$  y así sucesivamente, hasta considerar una red completa de  $N$  secciones, con  $L_g = \sum_{j=1}^N \delta l_j$

$$\begin{bmatrix} A_i(-L_g/2) \\ A_r(-L_g/2) \end{bmatrix} = [T^N] \dots [T^3][T^2][T^1] \begin{bmatrix} A_i(L_g/2) \\ A_r(L_g/2) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

En un caso general, las  $N$  secciones pueden ser de distinta longitud y periodo. Reemplazando las  $N$  multiplicaciones de las matrices  $2 \times 2$ , se obtiene la matriz de transferencia de una red:

$$\begin{bmatrix} A_i(-L_g/2) \\ A_r(-L_g/2) \end{bmatrix} = [\mathbf{T}] \begin{bmatrix} A_i(L_g/2) \\ A_r(L_g/2) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

siendo  $[\mathbf{T}] = \prod_{j=1}^N [T^j]$

La reflectividad  $\rho$  (Ec. 2.29) y la transmisión  $\Gamma$  (Ec. 2.30) para la red completa son:

$$\rho = \frac{A_r(-L_g/2)}{A_i(-L_g/2)} = \frac{T_{21}}{T_{11}} \quad (2.29) \quad \Gamma = (1 - \rho) = \frac{A_i(L_g/2)}{A_i(-L_g/2)} = \frac{1}{T_{11}} \quad (2.30)$$

Fase y retardo de grupo

El retardo de grupo  $\tau_g$  se calcula a partir de la variación de la fase  $\varphi(\omega)$  con la longitud de onda (Ec. 2.31). El retardo de grupo, del orden de los picosegundos, representa la desviación en frecuencia de las componentes espectrales de la señal debido a la red.

$$\tau_g = \frac{d\varphi}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (2.31)$$

La dispersión (GVD) (Ec. 2.32) es la razón de cambio entre la variación del retardo de grupo y la longitud de onda:

$$GVD = \frac{1}{2L_g} \frac{d\tau_g}{d\lambda} \quad (2.32)$$

2.4.2.1 Simulación de una red de Bragg uniforme utilizando el MMT

En el caso de una red uniforme cada sección de tamaño “ $\delta l_j$ ” es idéntica. El ancho de banda para una sección de una red uniforme es el siguiente:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{eff} \delta l_j} \sqrt{(k\delta l_j)^2 + \pi^2} \quad \text{se asume} \quad (k\delta l_j)^2 \ll \pi^2 \quad (2.33)$$

Dado que la condición de ajuste de fase que se requiere para cada sección es  $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda_j$  y como  $\delta l_j = L_g/N$  resulta:

$$\frac{N}{L_g} = \frac{2n_{eff} \Delta\lambda}{\pi \lambda_B^2} \quad (2.34)$$

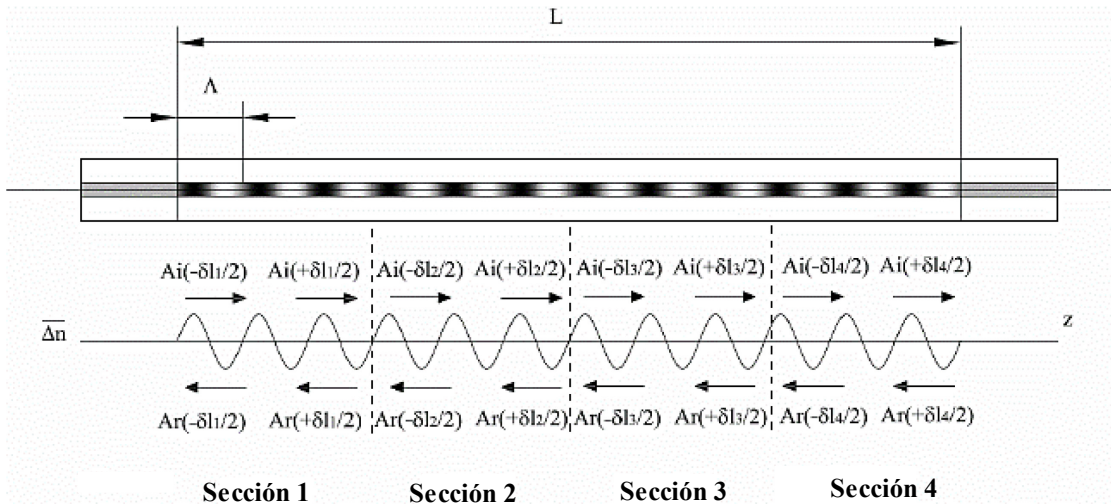


Fig. 2.14 Modelado de una red de Bragg uniforme

En la Fig. 2.14 se ilustra la división de la red uniforme en secciones. Se muestra que parte de la energía que se refleja en los sucesivos cambios de índice de refracción vuelve encontrando en fase a la onda incidente.

Dado que la red es uniforme, todas las secciones resultan iguales, por lo que es indistinto dividir la red en una o varias secciones.

En la Fig. 2.15 (a y b) se muestra la simulación de una red uniforme con su respectivo retardo de grupo para una red de 10 mm –  $KL = 2$  y otra de 50 mm,  $KL = 10$ , ambas con el mismo cambio de índice  $dn = 1e-4$ . Como se puede notar en esta figura hay total coherencia con la simulación de la Fig. 2.12 (a y b) que se realizó utilizando la técnica de integración numérica de las ecuaciones de modos acoplados.

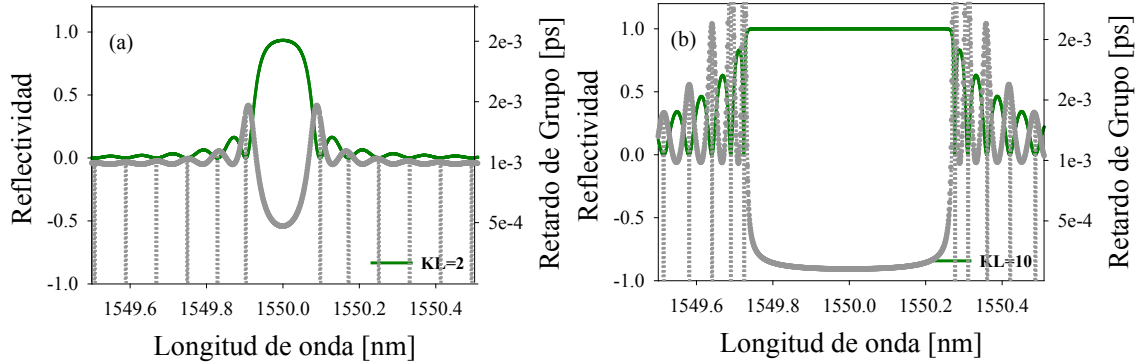


Fig. 2. 15 Simulación de una FBG uniforme para dos KL distintos

#### 2.4.2.2 Simulación de una red con Chirp utilizando el MMT

En el caso de la simulación de una red con chirp el ancho de banda ( $\Delta\lambda_c$ ) es mayor que el de una red uniforme y el periodo va variando de forma asimétrica. Con una expresión análoga a la (Ec. 2.34) antes mencionada (donde se establece la relación entre el número de pasos por unidad de longitud y el ancho de banda de la red), se pueden obtener los mínimos requerimientos para la simulación de una CFBG [21].

Al aplicar el MMT para simular las redes con chirp, nuevamente se define “ $N$ ” como el número de secciones en las que se divide la red de longitud “ $L_g$ ”, donde cada sección tiene un tamaño “ $\delta l_j$ ” que va variando a lo largo de la red, cada una con un periodo “ $\Lambda_j$ ” constante pero distinto para cada sección:  $\Lambda_1 \neq \Lambda_2 \neq \Lambda_n$  como se muestra en la Fig. 2.16.

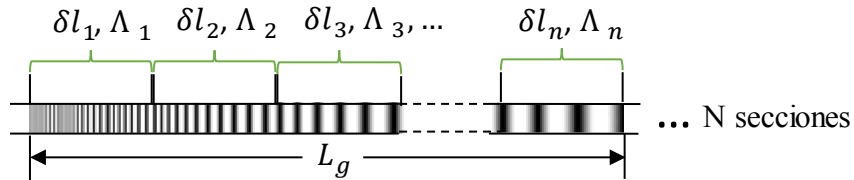


Fig. 2. 16 Modelado de redes de Bragg con Chirp

En las siguientes figuras se muestran redes de Bragg simuladas con en el método de la matriz de transferencia. Se consideran cuatro redes con chirp, cuyas longitudes son 30 mm, 50 mm, 80 mm y 100 mm,  $N = 100$  secciones,  $\Delta\lambda_c = 1$  nm, índice de refracción = 1.5, variación del índice  $dn = 11e-5$ , longitud de onda central de  $\lambda_c = 1543.81$  nm. En la Fig. 2.17 (a y b) se muestran los espectros de reflexión y transmisión para las cuatro redes y en la Fig. 2.18 (a y b) se muestran sus respectivos retardos de grupo y fase.

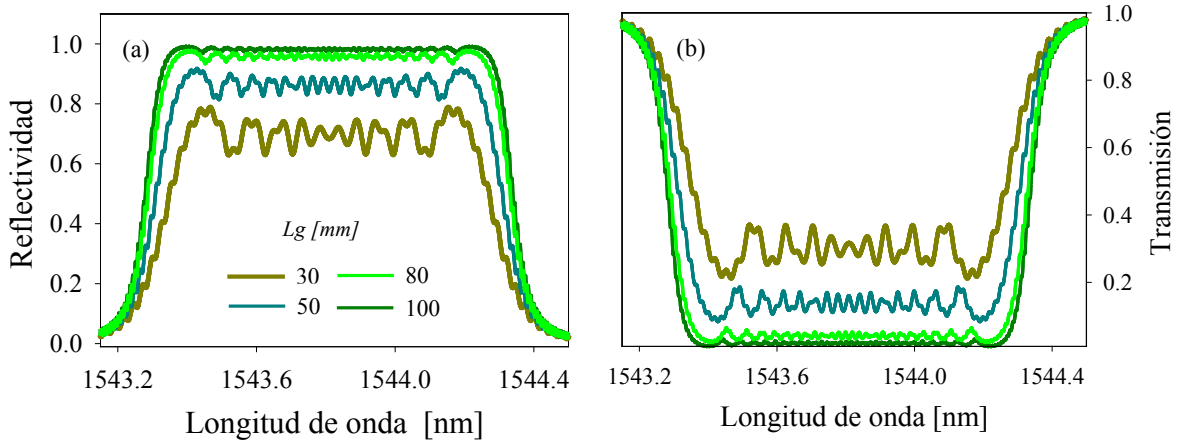


Fig. 2. 17 (a y b) Espectros de reflexión y transmisión de una CFBG para diferentes longitudes de la red

Como puede observarse, a medida que aumenta la longitud física de la red ( $L_g$ ), la reflectividad es cada vez mayor, el retardo de grupo se hace cada vez más negativo y la fase también aumenta.

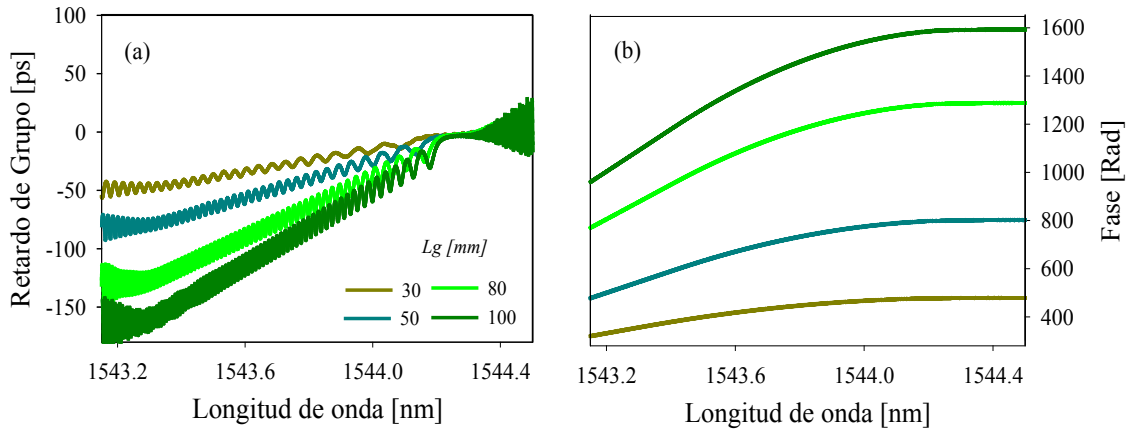


Fig. 2. 18 (a y b) Retardo de grupo y fase de una CFBG para diferentes longitudes de la red

## 2.5 Caracterización experimental de redes de Bragg

Las redes de Bragg pueden ser monitoreadas durante el proceso de grabado y además también es posible caracterizarlas según la aplicación en la que van a ser utilizadas. Las características de transferencia de una red son de gran importancia para una gran variedad de aplicaciones, como por ej. en comunicaciones, donde puede ser necesario saber si la red producirá dispersión adicional y eventualmente poder cuantificarla. El uso a largo plazo de una red, implica un compromiso esencial de evaluar si la red mantiene sus características de diseño, por esto es importante prestar atención a la integridad de su resistencia mecánica. La sensibilidad de la longitud de onda de Bragg con la temperatura y la tensión debe tenerse en cuenta para su aplicación como filtro de paso de banda, con el objeto de asegurar el cumplimiento de las prestaciones para las que fue diseñada y que la mencionada sensibilidad no afecte su desempeño. Las redes tienen que ser recocidas (es decir, aplicarles

calor y bajar la temperatura de manera controlada para contrarrestar tensiones internas) a fin de estabilizar sus propiedades a largo plazo. El ancho de banda, el perfil de reflexión, y la respuesta en fase de las redes requieren técnicas especiales de medición para la caracterización adecuada.

### 2.5.1 Definición de parámetros

Los parámetros que definen la característica en transmisión (reflexión) de una FBG son:

- Longitud de onda de Bragg: Definida como la longitud de onda a la cual se produce el pico mínimo de transmisión (o el máximo de reflexión).
- Reflectividad: Se define como la fracción de la luz de entrada que se refleja a la longitud de onda de Bragg. Suele expresarse de manera porcentual. Hay que hacer notar que, para dispositivos ideales sin pérdidas, la reflectividad (medida en potencia) es igual a uno menos la transmisividad (medida en potencia).
- Ancho de banda a 3 dB: Se define como el rango de longitudes de onda para el cual la reflectividad cae 3 dB respecto de su valor máximo.
- El cambio de índice de refracción y el coeficiente de la modulación de índice de refracción.
- La uniformidad de la red y la calidad de apodización
- Relación de supresión de lóbulos secundarios o laterales: es la diferencia (en dB) entre el mínimo de transmisividad (máximo de reflectividad) y el siguiente mínimo relativo.
- Las pérdidas de inserción y de radiación.
- El retardo de grupo.

### 2.5.2 Medida del espectro de transmisión y reflexión de las redes de Bragg

A continuación, se van a describir algunas técnicas que se utilizaron para *caracterizar la respuesta en amplitud* de las redes de Bragg, medidas que se pueden realizar tanto por reflexión como por transmisión. Estas técnicas permiten obtener la mayoría de los parámetros descritos anteriormente.

Para caracterizar en amplitud una red de Bragg en fibra se utilizaron básicamente dos equipos comerciales convencionales que son, un interrogador de redes y un analizador de espectros ópticos.

#### 2.5.2.1 Medida de una FBG con un interrogador de redes comercial

El interrogador es un instrumento de medición cuya finalidad es caracterizar especialmente diferentes componentes ópticos pasivos tales como FBG, redes de período largo, sensores interferométricos, etc., permitiendo realizar tanto mediciones de longitud de onda como de potencia óptica. Un interrogador consta de una fuente de iluminación, un detector, un sistema de discriminación de longitud de onda y un conjunto de funciones para procesamiento de señales.

En la Fig. 2.19 se describe el esquema de medida de una red de Bragg por reflexión utilizando un interrogador de redes comercial, en este caso el *Micron Optics modelo sm125* [29]. Este instrumento está diseñado para la medición de fenómenos estáticos o

moderadamente dinámicos. Incluye un *láser de fibra sintonizable* en la región 1510-1590 nm cuyas principales características son: potencia de salida CW – min. > 0.06mW y máx. < 0.25mW, diámetro del haz 9 mm, apertura numérica 0.1. La sintonización se realiza mediante un filtro óptico *Fabry-Perot* de espaciado variable, que permite obtener una emisión de muy bajo ancho espectral y lograr resoluciones en longitud de onda de 1pm. Posee además un fotodetector de alta sensibilidad y rango dinámico. Puede operarse remotamente desde una PC vía una interface Ethernet y emplea una utilidad basada en un entorno LABVIEW, que permite la visualización del espectro del dispositivo bajo monitoreo.



Fig. 2. 19 Esquema de medida por reflexión de una FBG con interrogador de redes

En la Fig. 2.20 se muestra la emisión láser a medida que éste barre el rango de sintonía, registrada mediante un analizador de espectro óptico (OSA). Dado que la velocidad de adquisición de este instrumento es mucho más lenta que la velocidad a la que se puede mover el filtro F-P del láser sintonizable, el OSA registra varios barridos del mismo, encontrándolo en diferentes posiciones espectrales (los pasos del barrido son menores a 0.05 nm por lo que es prácticamente continuo en la escala del OSA).

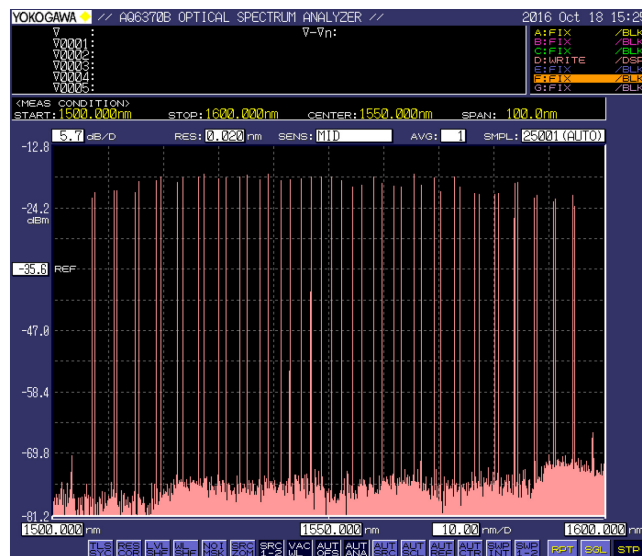


Fig. 2. 20 Espectro del barrido del láser sintonizable utilizado por el interrogador de redes

En la Fig. 2.21 se ilustra el esquema de medida por transmisión de una FBG. En este caso es necesario conectar los dos extremos de la misma en dos de los canales del interrogador e



incluir un aislador, logrando tener con esta configuración un espectro de transmisión de la red en el segundo canal del instrumento.

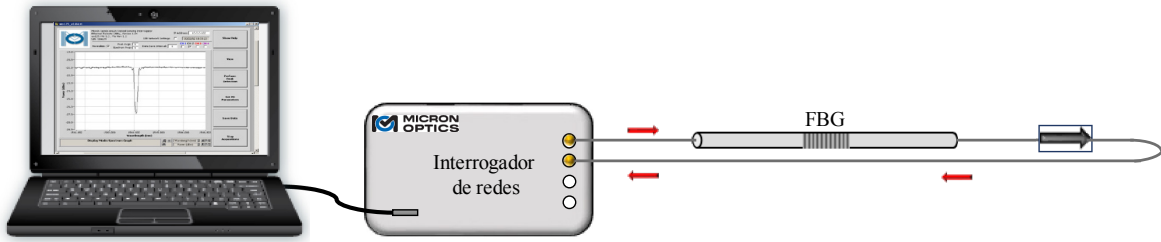


Fig. 2. 21 Esquema de medida por transmisión de una FBG con interrogador de redes

En la Fig. 2.22 (a y b) se muestran los espectros de una FBG medidos por transmisión y reflexión con el interrogador Micron Optics.

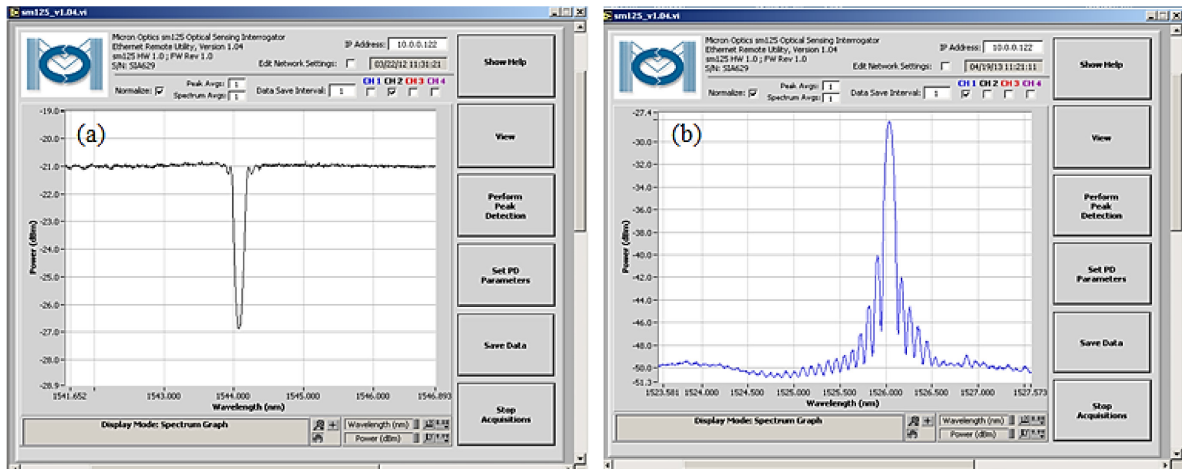


Fig. 2. 22 (a y b) Espectros de transmisión y reflexión de una FBG medidos con un interrogador

### 2.5.2.2 Medida de una FBG con un analizador óptico de espectros

Un analizador de espectro óptico (OSA) es un instrumento de precisión diseñado para medir y visualizar la distribución de la energía de una fuente óptica sobre un rango de longitud de onda especificado. El OSA utilizado (marca Yokogawa, modelo AQ6370B) consta de un monocromador de alto rendimiento con alta resolución de longitud de onda (0,02 nm) y amplio rango dinámico (~70 dB) logrando medir potencias de hasta 20dB en un rango de longitudes de onda comprendido entre 600 y 1700nm [30]. El OSA proporciona la medida de la caracterización de potencia en transmisión, pero para ello es necesario excitar la FBG mediante una fuente de luz de banda ancha, que emita en las longitudes de onda en las cuales quiere realizarse la medida. En general, se utiliza una fuente de luz blanca, caracterizada por proporcionar una densidad espectral de potencia óptica aproximadamente constante para todas las longitudes de onda. Sin embargo, la densidad de potencia que entrega a su salida es muy baja, con lo que para algunas aplicaciones suelen utilizarse otras fuentes de luz que estimulen a los dispositivos pasivos, como los diodos superluminiscentes y las fuentes ASE (o de emisión espontánea amplificada) de fibra dopada con erbio.

## Capítulo 2. Redes de Bragg en fibra óptica

En las medidas realizadas se utilizó un diodo superluminiscente (SLED) centrado en 1550nm, cuyo espectro de emisión se muestra en la Fig. 2.23. La Fig. 2.24 muestra el esquema de medida utilizado para medir la potencia reflejada por la red, cuyo espectro se aprecia en el OSA. En el caso de la medida por transmisión, el esquema de medida puede observarse en la Fig. 2.25.

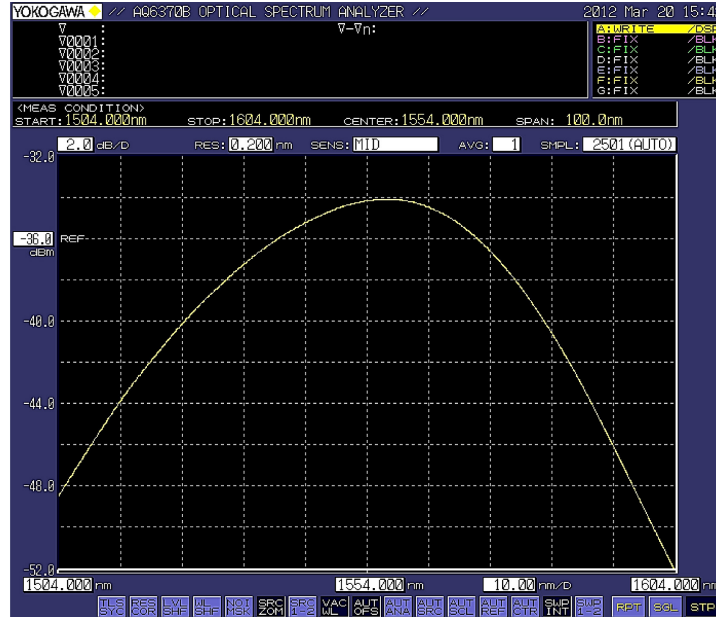


Fig. 2. 23 Espectro de emisión del SLED utilizado en las mediciones de FBG con OSA

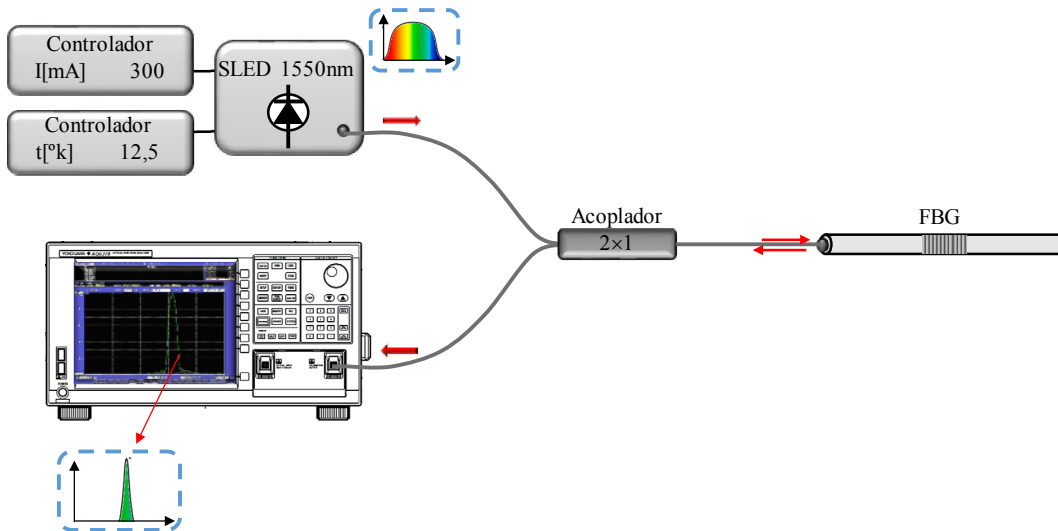


Fig. 2. 24 Esquema de medida de una FBG por reflexión con el OSA

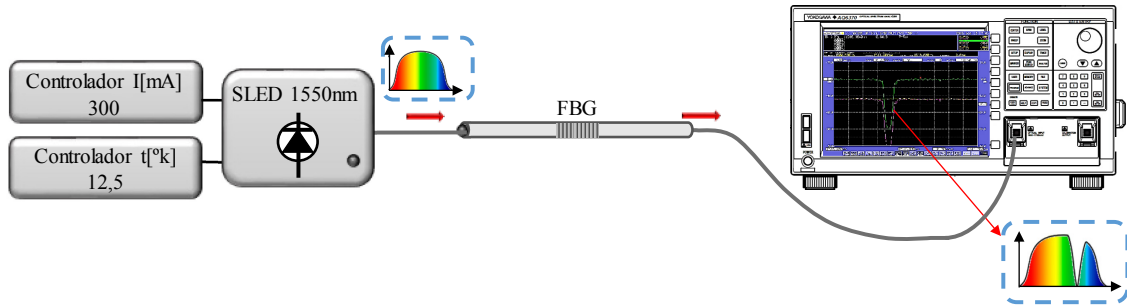


Fig. 2. 25 Esquema de medida de una FBG por transmisión con el OSA

En la Fig. 2.26 se muestran dos trazos, el amarillo corresponde al espectro del SLED-1550nm mostrado anteriormente y el verde corresponde a la medida de la FBG por transmisión, cuya longitud de onda de Bragg o de máxima reflexión se sitúa en 1544nm aproximadamente. En la Fig. 2.27 se muestra una ampliación de la zona donde se puede apreciar el mínimo de transmisión generado por la presencia de la FBG.

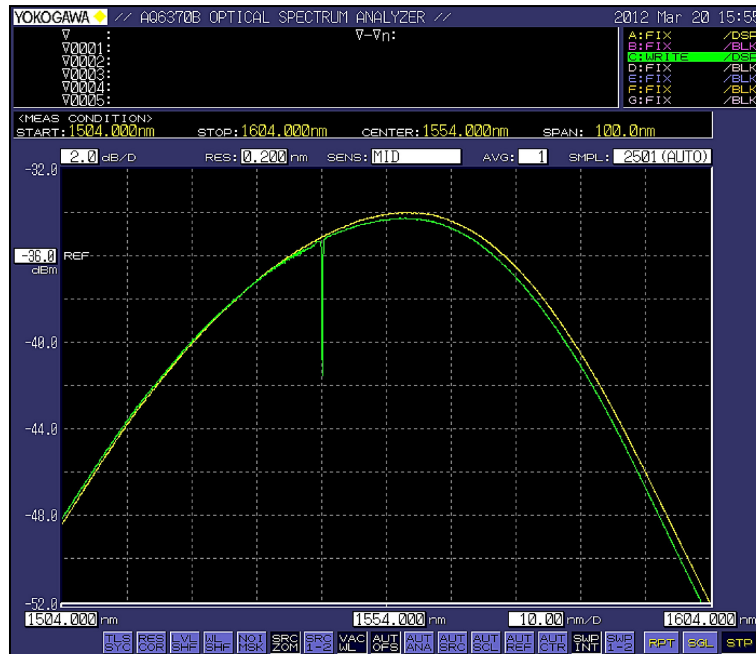


Fig. 2. 26 Espectro del SLED (trazo amarillo) y FBG medida por transmisión (trazo verde)

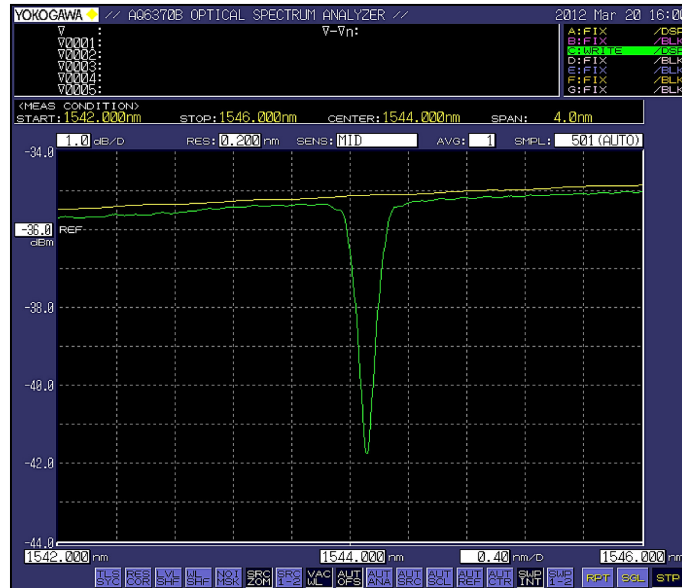


Fig. 2. 27 FBG medida por transmisión

### 2.5.2.3 Cálculo de parámetros relevantes a partir de la respuesta en amplitud de una FBG

La longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) o de máxima reflexión, se determina en forma directa midiendo la posición del pico en el espectro (sea de reflexión o de transmisión).

Para determinar la reflectividad de una FBG es necesario medir su espectro de transmisión y de allí deducir el mencionado parámetro, ya que la medida por reflexión no es apropiada pues es dependiente de la intensidad de la fuente de luz. En la Fig. 2.28 se muestra una medida de transmisión obtenida con el OSA, así como los niveles de potencia óptica mínima y máxima, necesarios para calcular la reflectividad de la siguiente manera:

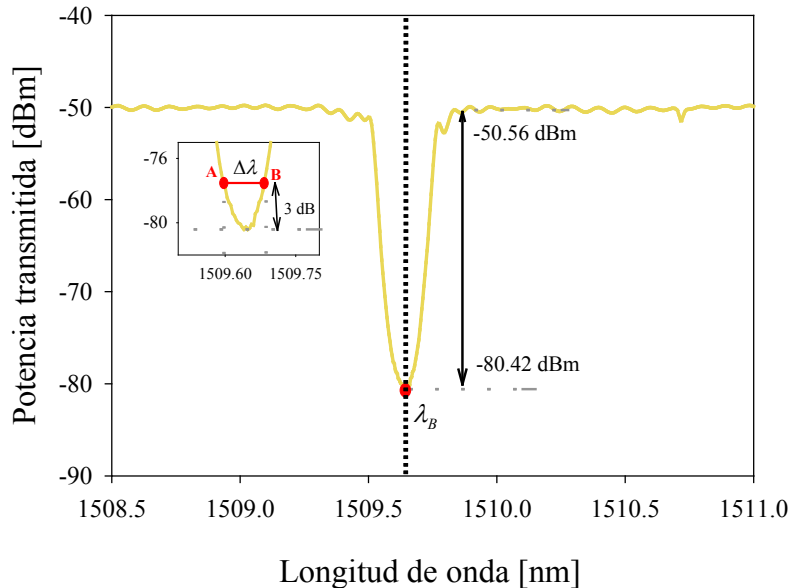


Fig. 2. 28 Determinación de la reflectividad de una FBG a partir de su espectro de transmisión

$$T = T_{max} - T_{min} = -50.56 - (-80.42) = 30.16 \quad (2.35)$$

$$R = 1 - 10^{-T/10} \quad (2.36)$$

$$R = 1 - 10^{-30.16/10} = 0.9989 \quad \text{es decir, } R[\%] = 99.89 \% \quad (2.37)$$

$$\Delta\lambda = (1509.68 - 1509.6) \text{ nm} = 0.08 \text{ nm} \quad (2.38)$$

En la Fig. 2.28 se muestra el espectro de transmisión de una red con una longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) de 1509.65 nm, cuyos parámetros se calculan a partir de la figura como indican las Ecs. 2.35 – 2.38. Así resulta un ancho espectral de 0.08 nm y una reflectividad máxima de 99.89 %.

En este caso la red tiene una alta reflectividad, lo que resulta útil por ejemplo en aplicaciones en comunicaciones y láseres de fibra. Cabe mencionar que las redes con reflectividades bajas son útiles en el area de los sensores por ejemplo cuando se requiere multiplexar en longitud de onda una cadena de varios sensores colocados a lo largo de una estructura civil.

## 2.6 Grabado de redes de Bragg. Fotosensibilidad en fibras ópticas

La fotosensibilidad en fibra óptica se refiere a un cambio permanente en el índice de refracción del núcleo de fibra cuando se expone a luz con una longitud de onda e intensidad características que dependen del material en el núcleo. Inicialmente, se ha pensado que la fotosensibilidad es un fenómeno asociado sólo con fibras ópticas que tienen una gran concentración de germanio en el núcleo y que son foto-excitadas con luz UV de 240-250 nm. Sin embargo, la fotosensibilidad se ha observado con excitación a diferentes longitudes de onda UV (por ejemplo, 157, 193, 325 y 351 nm) en una amplia variedad de fibras diferentes, muchas de las cuales tienen otros dopantes (por ejemplo, boro, erbio, estaño y fósforo), además del germanio y algunas de las cuales no contienen germanio en absoluto (por ejemplo, las fibras dopadas con tierras raras, fibra de aluminio-silicato, fibra de fluoro-zirconato dopado con cerio / erbio) [5].

Tanto teórica como experimentalmente se han planteado mecanismos para comprender el cambio del índice de refracción inducido por radiación UV en las fibras de germano-silicato. Se han propuesto numerosos modelos para entender el mecanismo de la foto-inducción refractiva, es decir, los cambios de índice en las fibras de silicato dopadas con germanio. Estos modelos pueden clasificarse en dos categorías: los modelos electrónicos que tratan de conectar la fotosensibilidad con los defectos que están inherentemente presentes en el vidrio, formados durante el proceso de estiramiento de fibras y los modelos estructurales que asocian la fotosensibilidad con cambios estructurales locales en el vidrio que ocurren durante la iluminación. Más concretamente, se ha identificado que dos modelos principales, a saber, el *modelo de centro de color* y el *modelo de compactación*, son la causa principal de que las fibras de germanosilicato exhiban fotosensibilidad a longitudes de onda de alrededor de 240 nm [5].

Se han realizado esfuerzos para mejorar la fotosensibilidad en las fibras ópticas mediante la introducción de técnicas como la carga de hidrógeno, el barrido con llama (flame brushing) y el agregado de codopantes. La más usada es la hidrogenación, que consiste en poner la fibra óptica en una cámara con hidrógeno a alta presión durante un periodo de tiempo determinado. Como resultado de este proceso, cuando el núcleo de la fibra se expone a la luz ultravioleta, enlaces Si-Si y Si-Ge, y otros defectos producto del proceso de fabricación de las fibras ópticas se rompen y se produce una reagrupación de los elementos junto con el hidrógeno. Esta reagrupación deja defectos o centros deficientes de GeO<sub>2</sub>, que son los que provocan el cambio localizado de índice de refracción observado en las fibras ópticas [31]. Particularmente, la técnica de hidrogenación fue utilizada en el desarrollo de este trabajo de tesis para aumentar aún más la sensibilidad de fibra óptica fotosensible. La misma fue utilizada para grabar redes de Bragg con chirp mediante el procedimiento que se describirá más adelante.

En la Fig. 2.29 se ilustra el sistema de hidrogenado, que consta de un tubo de hidrogeno con un conjunto de válvulas para controlar la presión y la cámara de hidrogenación. Esta cámara de almacenamiento de la fibra puede ser un cilindro delgado o estar formada por un par de discos o platos donde se aloja la fibra. El sistema usado consta de dos discos con unas canaletas que permiten enrollar la fibra y preservarla mientras es mantenida en una atmosfera de hidrogeno a alta presión (2000 psi o 136 atmósferas) durante aproximadamente 30 días. Este sistema de hidrogenado esta implementado en el *Laboratorio de Fibras Ópticas del Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo de la Universidad de Valencia – España*, y fue utilizado durante la estadía realizada en dicho laboratorio. Luego las fibras son luego empalmadas y se llevan al montaje de grabado detallado en la sección 2.6.7 (d).

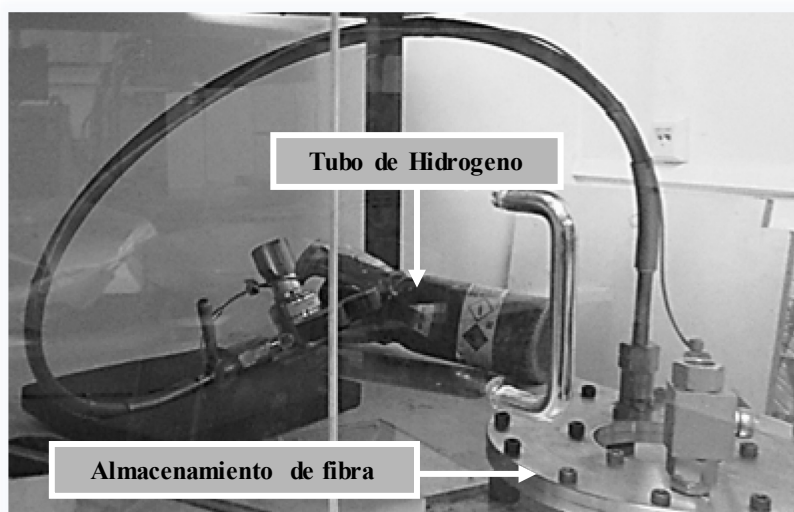


Fig. 2. 29 Sistema de hidrogenado de fibra óptica

### 2.6.1 Láseres utilizados para el grabado de redes de Bragg

Existen varias fuentes de radiación laser UV que pueden ser utilizadas para grabar redes en fibra óptica. Estas pueden ser de *baja coherencia espacial/temporal* o fuentes *espacialmente coherentes*. En el caso de las primeras, es posible disponer de altos valores de potencia pico y promedio en el UV. Algunas fuentes se basan en el mezclado de frecuencias para generar radiación UV de alta coherencia espacial y temporal, y resultan idealmente apropiadas para la formación de redes. Estas tienen alta potencia promedio, pero una densidad de potencia pico baja. A pesar de esto introducen grandes cambios de índice mientras se mantiene una excelente calidad de la red generada.

Algunos de los láseres utilizados para el grabado de redes son: KrF (248 nm), ArF (193 nm), Nd:YAG cuadruplicado (266 nm), Nd:YAG triplicado (355 nm), XeCl (308 nm), ion argón (488 nm), entre otros. En el desarrollo del presente trabajo de tesis, se utilizaron *el láser de Nd:YAG cuadruplicado en frecuencia y el láser de Titanio-Zafiro de pulsos ultracortos (800 nm) triplicado en frecuencia* para el grabado de redes uniformes, mientras que *el láser de iones de Argón doblado en frecuencia* fue utilizado para el grabado de redes con Chirp [21].

### 2.6.2 Grabado de redes uniformes

La primera red de difracción en fibra óptica fue creada en 1978 por Hill haciendo incidir en el interior de una fibra de sílice dopada con germanio un haz de un láser de Argón operando entorno a los 488 nm. La formación de la red se inicia con la luz reflejada en el extremo al final de la fibra y propagándose hacia atrás, de forma que cuando interfieren las dos ondas que evolucionan en sentidos contrarios se crea un patrón de interferencia. El índice de refracción del núcleo se va modificando poco a poco en las regiones de alta intensidad, de forma que al final se obtiene una variación periódica del índice a lo largo de la fibra. El proceso se detiene cuando el cambio de índice satura. Como el periodo de la red es el mismo que el del patrón de interferencia, la longitud de onda del láser condiciona la longitud de onda que reflejará la red. Es decir, las redes obtenidas sólo pueden operar en una longitud de onda de Bragg coincidente con la de grabado. Este es el principal inconveniente de esta técnica (considerada de escritura interna), pues las redes generadas no pueden ser usadas en el rango de 1500-1600 nm que es el rango de interés en comunicaciones. Sin embargo, un trabajo pionero en el Centro de Investigación de Tecnología de Estados Unidos, que se considera como un hito para los sensores de fibra con redes de Bragg (FBG), fue publicado once años más tarde (Meltz et al 1989). La técnica desarrollada (de escritura lateral) permite el grabado de redes de Bragg directamente en el núcleo de la fibra, utilizando un interferómetro holográfico iluminado con una fuente de luz ultravioleta coherente. Permite la fabricación de FBGs donde la longitud de onda de Bragg es independiente de la longitud de onda del láser de grabado.

Hoy en día, los patrones de variación de intensidad que son necesarios para grabar redes en las fibras, se generan mediante técnicas que se dividen en holográficas o interferométricas y los no interferométricas, basadas en la simple exposición de manera periódica de un trozo de fibra a la radiación UV (o grabado punto a punto) [21], [32], [33].

### 2.6.3 Método interferométrico u holográfico

Este método fue demostrado por Melz [18]. Consiste en dividir la luz UV de entrada en dos haces que luego son recombinados para generar un diagrama de interferencia que irradia lateralmente a la fibra e induce una modulación del índice de refracción en el núcleo de la misma. El ángulo entre los haces permite controlar el período del patrón de interferencia y por lo tanto, la longitud de onda de Bragg o de máxima reflexión, por lo que ésta resulta independiente de la longitud de onda UV utilizada para el grabado. Suelen utilizarse interferómetros que dividen la amplitud del haz o el frente de onda, pero se requiere que la fuente láser posea suficiente coherencia temporal y buena coherencia espacial [18], [34]. Este método fue originalmente utilizado con éxito para grabar redes en longitudes de onda en el visible. El interferómetro es ideal para grabar redes cortas con un solo pulso. Entre sus limitaciones está que se debe prestar gran cuidado en el diseño de los soportes ópticos debido a que es sensible a las vibraciones mecánicas, además que la longitud del camino óptico es muy larga en el aire limitando este método solo para exposiciones cortas.

### 2.6.4 Método de grabado punto por punto

La técnica de fabricación “punto por punto” consiste en enfocar lateralmente un único pulso de radiación UV dentro del núcleo de la fibra óptica, de modo de modificar localmente el índice de refracción. La fibra es luego trasladada en la dirección de su eje, una distancia correspondiente al período de la red y nuevamente irradiada. Repitiendo este proceso se logra formar la estructura de la red de Bragg en el núcleo de la fibra. Naturalmente, el método se beneficia de la utilización de un láser pulsado, ya que el movimiento de la fibra puede ser a pasos sin la necesidad de controlar la operación del láser también [21]. Es esencial en esta técnica disponer de un sistema submicrométrico de traslación estable y preciso, por lo que solo es útil para grabar redes de corta longitud debido al gran tiempo que se invierte y a que es difícil de controlar el movimiento de traslación de forma lo suficientemente precisa sobre tramos extensos. Además, resulta muy complicado enfocar el haz a una superficie cuyo tamaño es solo una fracción del periodo de la red, por esto el método es conveniente para fabricar redes de periodo largo ( $\Lambda_{red} > 100 \mu\text{m}$ ).

### 2.6.5 Método de la máscara de Fase

Un paso importante para el grabado de redes fue la utilización de la máscara de fase (MF) como componente del interferómetro. Utilizada en transmisión, una MF es una red grabada en relieve en una placa de sílice, con una relación de marca-espacio cuidadosamente controlada, así como la profundidad del tallado. El principio de operación es basado en la difracción de un haz UV incidente en varios órdenes  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Los órdenes incidente y difractados satisfacen la ecuación de difracción, con periodo  $\Lambda_{mf}$  de la máscara de fase [21].

En el esquema de difracción (Fig. 2.30), el haz luminoso UV incide sobre la máscara y es difractado en diferentes órdenes, siendo  $\theta_m/2$  el ángulo del  $m$ -ésimo orden difractado,  $\lambda_{uv}$



la longitud de onda y  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia. Entonces, el periodo de la máscara de fase se describe así:

$$\Lambda_{mf} = \frac{m\lambda_{uv}}{\left(\sin\frac{\theta_m}{2} - \sin\theta_i\right)} \quad (2.39)$$

En los casos donde el periodo de la red cae entre  $\lambda_{uv}$  and  $\lambda_{uv}/2$ , la onda incidente es difractada en un solo orden ( $m = -1$ ) con el resto de la energía restante en la onda transmitida ( $m = 0$ ).

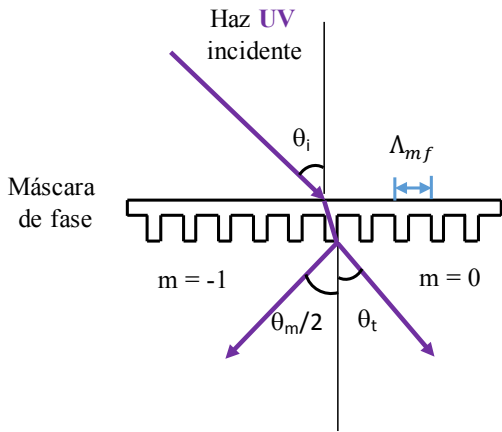


Fig. 2. 30 Difracción de un haz incidente en las ranuras de una MF

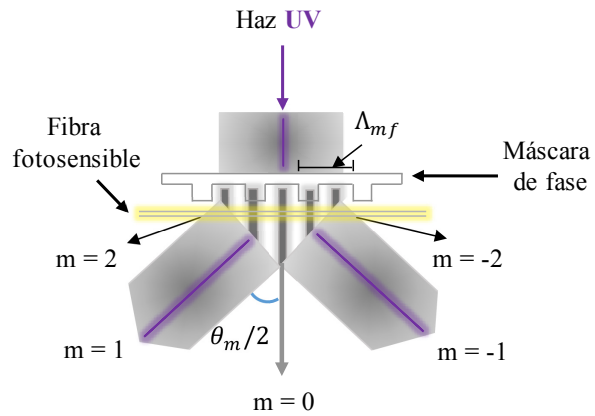


Fig. 2. 31 Difracción de un haz UV incidente de manera perpendicular sobre la MF

Para la aplicación de la técnica en el grabado de redes en fibra (Fig. 2.31), el haz UV incide perpendicularmente y los órdenes difractados son solamente  $m = 0$  y  $\pm 1$ . El patrón de interferencia en la fibra de los haces de órdenes  $\pm 1$  tiene un periodo  $\Lambda_r$  relacionado con el ángulo de difracción  $\theta_m/2$  de la siguiente manera:

$$\Lambda_r = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin(\theta_m/2)} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.40)$$

El periodo  $\Lambda_{mf}$  de la red grabada en la máscara de fase, se elige en función de la longitud de onda de Bragg  $\lambda_{Bragg}$  requerida para la red en la fibra. Usando la Ec. 2.40 se llega a la siguiente Ec. 2.41 que relaciona dicho periodo con el de la modulación de índice ( $\Lambda_r$ ), donde  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra:

$$\Lambda_r = \frac{N\lambda_{Bragg}}{2n_{eff}} = \frac{\Lambda_{mf}}{2} \quad (2.41)$$

donde  $N \geq 1$  es un entero que indica el orden del periodo de la red. Normalmente el haz incidente UV se refracta en dos órdenes ( $-1$  y  $+1$ ). La radiación remanente sale de la

máscara en el orden cero ( $m = 0$ ), aunque ellas se fabrican para minimizar dicho orden pues reduce la visibilidad o contraste de la modulación de índice en la fibra. El orden cero puede hacerse nulo para una única longitud de onda. Si es necesario cambiar la longitud de onda de la fuente láser, una alternativa sería bloquear el orden cero físicamente siempre que el montaje experimental lo permita. Cabe destacar la ventaja de esta técnica y es que no son necesarios requisitos de coherencia espacial y temporal del haz demasiado restrictivos [35], [36].

Ventajas de utilizar la máscara de Fase:

- Permite definir con precisión la longitud de onda de Bragg de la red en fibra y poder replicarla. La producción en masa de FBGs idénticas, es posible.
- Otra ventaja de la máscara de fase es que una función predeterminada puede estar inscrita en ella para replicarla en la fibra.
- La máscara de fase forma un interferómetro muy estable ya que no existen partes ajustables, permitiendo tiempos de grabado largos.
- También es insensible a la traslación del grabado del haz UV y tolerante a la inestabilidad del enfoque haz de láser. La ventaja de la insensibilidad a la traslación es que permite que las redes de fibra largas sean grabadas por la técnica de escaneo.

La desventaja de utilizar la máscara de fase en contacto con la fibra, son los peligros de contaminación y el daño permanente de la máscara de fase. Además, para cada longitud de onda de Bragg se requiere una máscara de fase específica. Alternativamente, un interferómetro sintonizable puede ser utilizado con una sola máscara de fase, sin embargo, se requiere una cuidadosa calibración y alineación.

### 2.6.6 Implementación del método de grabado de redes de Bragg uniformes en fibras fotosensibles utilizando máscaras de fase

A continuación, se va a describir el sistema de grabado implementado en el CIOp para el grabado de redes uniformes usando la técnica de la máscara de fase. Este sistema se implementó con dos esquemas que se diferenciaban principalmente por la fuente de radiación UV utilizada: un láser de Nd-YAG cuadruplicado en frecuencia o un láser de pulsos ultracortos (fs) de Ti-Za triplicado, ambos emitiendo en 266 nm [21], [37].

#### ***(a) Grabado de redes de Bragg uniformes con la técnica de máscara de fase usando como fuente de radiación UV un láser de Nd-YAG***

El método consiste en irradiar una fibra óptica fotosensible con un patrón de interferencia adecuado de luz ultravioleta, generado por una máscara de fase. El esquema de grabado cuenta con un sistema de microposicionamiento que permite ubicar adecuadamente la fibra óptica y los demás componentes. Dicho esquema está conformado por un láser pulsado de Nd-YAG, capaz de entregar pulsos de 650 mJ en 1064 nm, con una frecuencia de repetición máxima de 10 Hz. Este láser genera el haz UV al ser cuadruplicado en frecuencia mediante dos cristales dobladores por efectos no-lineales que permiten generar una emisión en 266nm. Como la eficiencia de conversión de los cristales no es 100%, es necesario

desechar la radiación remanente tanto en IR como en la región visible. Para ello se emplea un prisma Pellín-Brocca que separa angularmente la radiación UV de la correspondiente al IR (1064 nm) y al visible (532 nm). Una vez aislado el haz centrado en el UV, éste pasa por una óptica de expansión y colimación para luego enfocarlo mediante una lente cilíndrica sobre la máscara de fase, que tiene un período uniforme de 1054,79 nm y una supresión de orden cero menor al 4 %. Sobre la fibra fotosensible se graba una modulación espacial periódica del índice de refracción del núcleo de la fibra formando la red altamente reflectiva, cuya longitud de onda de Bragg se centra  $\sim 1526$  nm con un ancho espectral de 0.1-0.2 nm. La evolución del proceso de grabado se monitorea en forma dinámica con un interrogador de redes de 4 canales que permite realizar mediciones de potencia óptica en el rango espectral 1510-1590 nm con una resolución en longitud de onda de 1 pm. En la Fig. 2.32 se muestra esquemáticamente el sistema de grabado descrito, en la Fig. 2.33 se muestra una foto del montaje experimental implementado y en la Fig. 2.34 se ilustra un detalle donde se aprecian en una pantalla los órdenes difractados. Este tipo de redes de Bragg resultan apropiadas tanto para el desarrollo de dispositivos aplicables en el campo de las telecomunicaciones, como para la implementación de sensores utilizables por la ingeniería civil y por las industrias del petróleo, automotriz, aeroespacial, etc. En esta tesis fueron particularmente usados en el monitoreo del curado de resinas dentales y el fraguado de materiales cementicios [37].

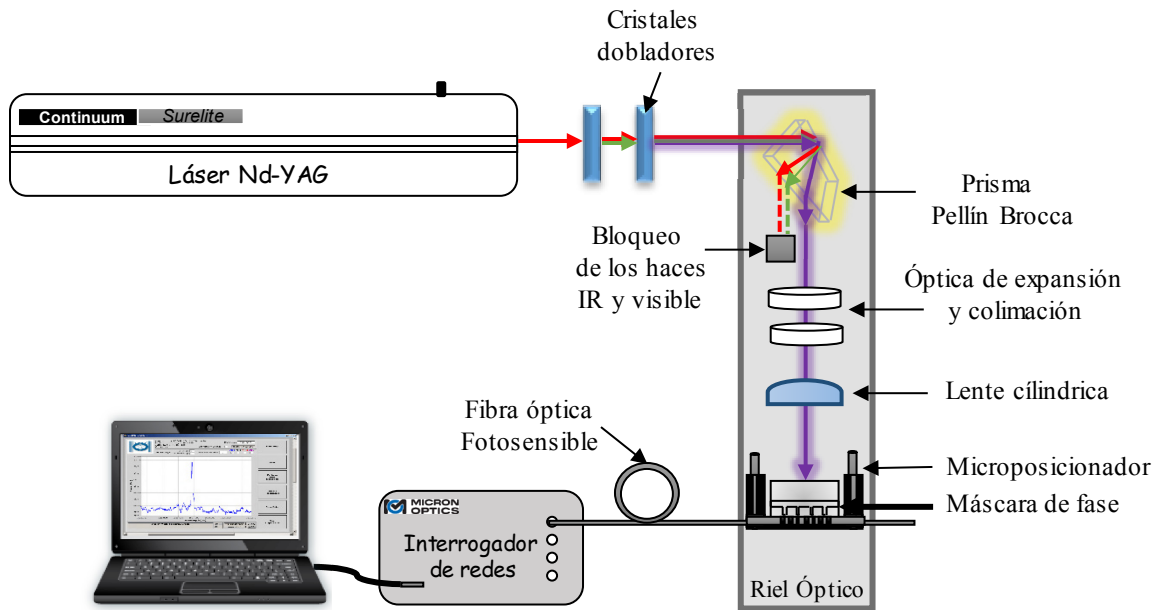


Fig. 2. 32 Esquema de grabado con el láser de Nd-YAG

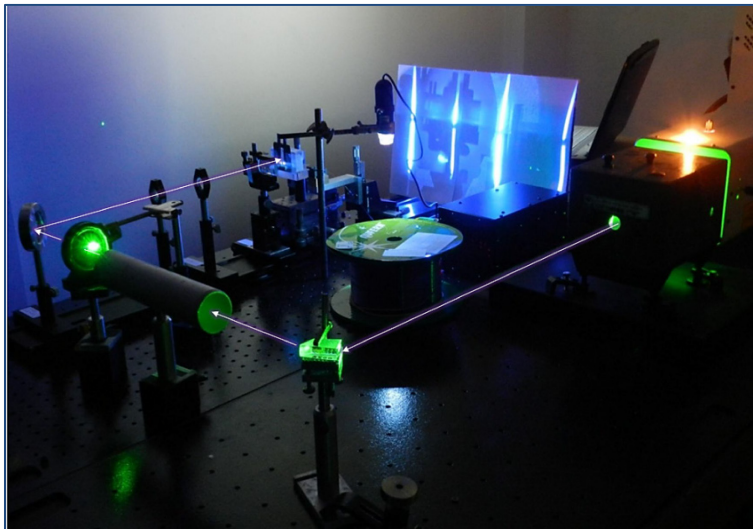


Fig. 2. 33 Montaje experimental de grabado utilizando el láser de Nd-YAG

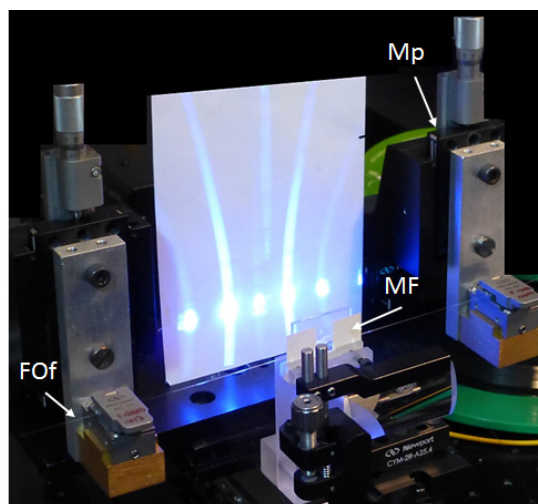


Fig. 2. 34 Detalle del sistema de grabado mostrando la máscara de fase (MF), la fibra óptica fotosensible (FOF) y el microposicionador (Mp)

La técnica y sistema descriptos permitieron fabricar redes con un alto grado de repetibilidad, buena reflectividad ( $> 90 \%$ ), con un ancho espectral angosto ( $\sim 0,1 \text{ nm @ } -3\text{dB}$ ) y buena simetría. Cambiando levemente el spot de iluminación, se obtuvieron redes bastante apodizadas con espectros de reflexión como el mostrado en la Fig. 2.35, donde la longitud de onda central o de máxima reflexión es de  $1526.15 \text{ nm}$  y su ancho espectral a  $-3\text{dB}$  es de  $0.14 \text{ nm}$ .

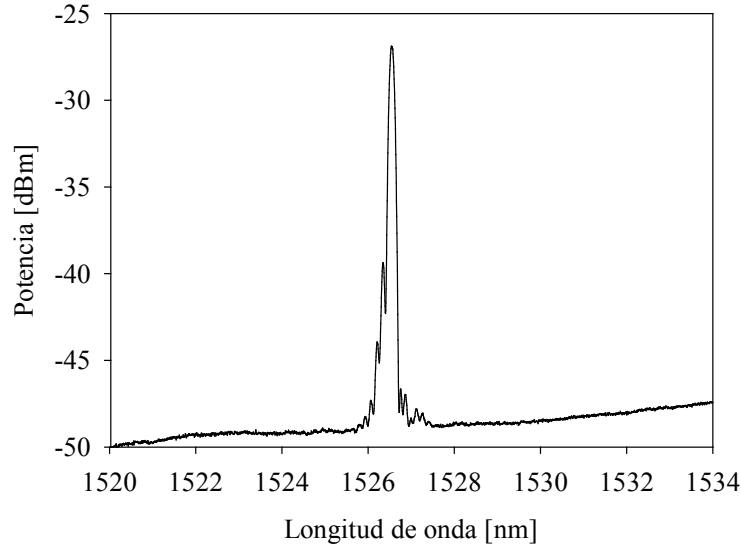


Fig. 2. 35 Red Uniforme grabada empleando la técnica de MF y un láser Nd-YAG cuadruplicado

**(b) Grabado de redes de Bragg uniformes con la técnica de la máscara de fase usando como fuente de radiación UV un láser de Ti-Za triplicado.**

En este caso se emplea radiación proveniente de un láser de pulsos ultracortos (fs) triplicado en frecuencia, en conjunción con la técnica de la máscara de fase para generar el patrón de interferencia que incide sobre la fibra fotosensible y produce la modulación de índice de refracción (Fig. 2.36). El oscilador (láser mode-locked de Titanio-Zafiro marca Spectra Physics) emite pulsos de 100 fs en la región espectral de 800 nm, con una tasa de repetición de 80 MHz. Estos son amplificados mediante la técnica CPA (Chirped Pulse Amplification) para obtener pulsos de 1 mJ a 1 kHz [38].

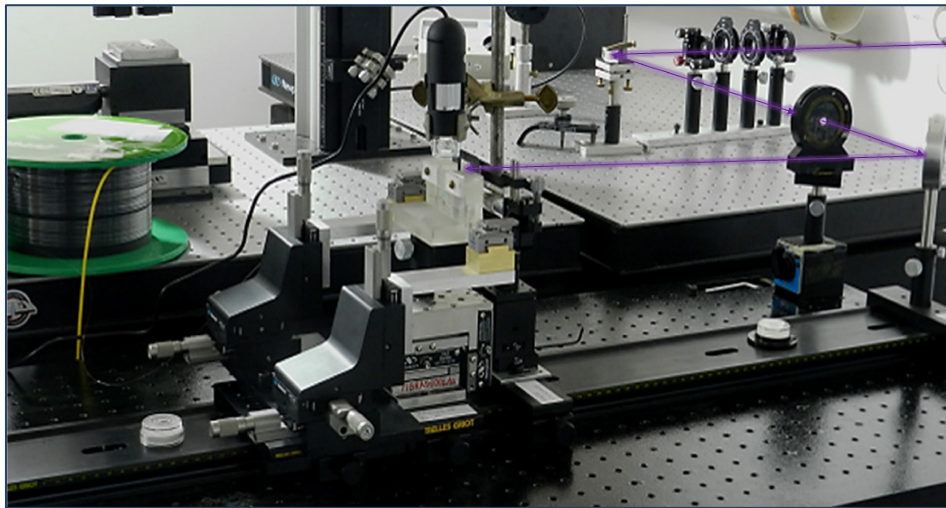


Fig. 2. 36 Esquema experimental de grabado de redes con el láser de pulsos de fs

Para generar la triplicación en frecuencia de manera eficiente, se emplean dos cristales no-lineales (doblador y triplicador), una placa de media onda colocada entre ambos para corregir la polarización, y una placa de calcita para compensar las diferencias entre la

velocidad de grupo de la fundamental y de la segunda armónica. En la Fig. 2.37 se muestra un esquema y una foto donde se ilustra cómo se genera dicha triplicación.

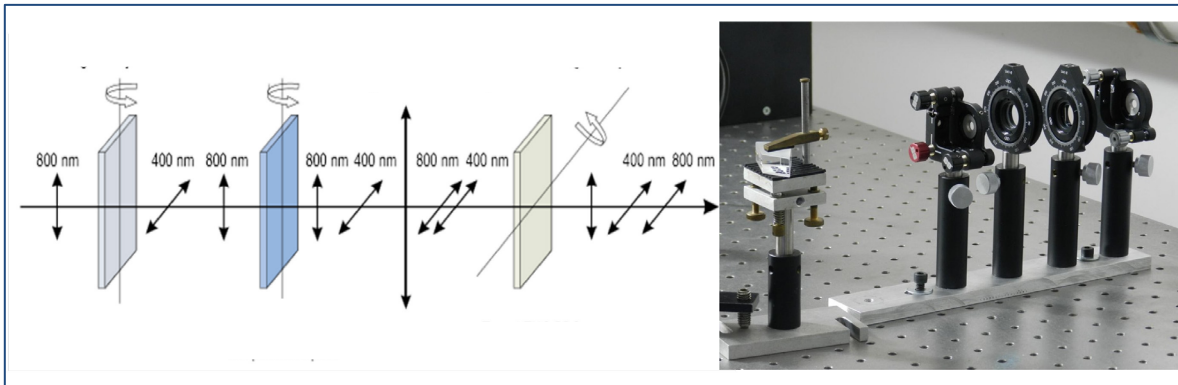


Fig. 2. 37 Ilustración de la triplicación en frecuencia para producir radiación UV en 266 nm

La ventaja fundamental de este procedimiento radica en la sencillez del montaje experimental utilizado, que no requiere la estabilidad mecánica necesaria en los interferómetros implementados con elementos discretos, ni las exigentes prestaciones del sistema de posicionamiento y traslación que debe emplearse para grabar redes punto a punto. En la Fig. 2.38 se muestra una red de Bragg grabada con este sistema, la cual presenta un perfil espectral de muy buenas características, con una importante supresión de lóbulos laterales.

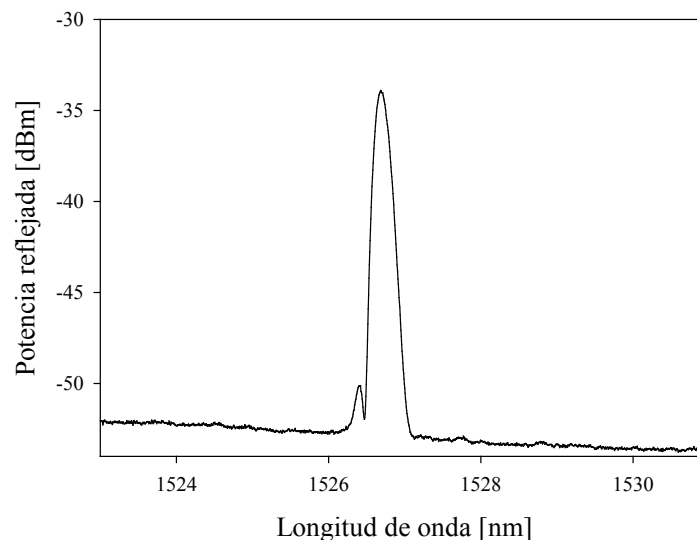


Fig. 2. 38 Red de Bragg grabada con máscara de fase y laser de Ti-Za triplicado

### 2.6.7 Grabado de redes de Bragg con chirp

Los métodos de grabado de redes con *chirp* son adaptaciones de las dos técnicas básicas que han sido las más relevantes para el grabado de redes uniformes: el método interferométrico y el de la máscara de fase, ambos fundamentados en la irradiación de patrones periódicos de luz UV sobre fibra fotosensible. Para el grabado de redes con chirp pueden emplearse diferentes estrategias, a saber:

**(a) Grabación considerando los efectos del movimiento relativo de la fibra respecto al láser UV.** Esta técnica consiste en modificar la relación entre la velocidad de desplazamiento del haz UV y la fibra. El periodo de la modulación varía debido a la relación de dependencia mencionada  $\Delta\lambda = \lambda_0 v_f/v_{haz}$ . La fibra fotosensible es montada en un motor piezo-eléctrico controlado por un ordenador permitiendo un movimiento relativamente lento en relación con la máscara de fase, incorporando entonces, cambios de fase en la red durante el grabado. Programando diferentes movimientos en el motor es posible grabar redes apodizadas, redes con chirp auto-apodizadas y redes desfasadas, que pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones, en especial en el área de comunicaciones [39], [40].

**(b) Obtención de chirp aprovechando las variaciones del patrón de difracción en las proximidades de la máscara y por deformación elástica de la fibra.** Se considera un plano de longitud de onda  $\lambda$  incidente en una máscara de fase de periodo  $\Lambda$  con un ángulo arbitrario  $\varphi$ , considerando que la fibra está en un ángulo  $\alpha$  con respecto a la máscara de fase. Entonces, el periodo puede variarse si la fibra se gira un pequeño ángulo respecto a el plano de la máscara, otra alternativa es la tensión mecánica de la fibra durante el proceso de grabado [39], [41].

**(c) Redes de Bragg grabadas en fibras ahusadas.** Esta técnica consiste en utilizar fibras una vez que han sido ahusadas (estrechadas) por fusión y estiramiento, para luego grabar redes de Bragg sobre ellas, dado que el índice modal varía con el factor de reducción de la fibra.

El índice de refracción modal de una fibra ahusada se reduce a medida que el diámetro del núcleo de la fibra se hace más pequeño. Para una fibra de baja apertura numérica, pueden producirse variaciones de índice del orden de varias milésimas, reduciendo el diámetro del núcleo en un factor dos. Así, la longitud de onda reflejada por una red grabada en una fibra ahusada disminuirá a lo largo de la transición desde el diámetro mayor al menor [42].

**(d) Técnica de grabado de redes de Bragg usando el movimiento relativo de la máscara de fase respecto al láser UV.** Esta técnica de grabado de redes de Bragg con chirp fue utilizada durante la estadia realizada en el *Laboratorio de Fibras Ópticas del Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo de la Universidad de Valencia - España*. En este sistema de grabado se emplea la técnica de máscara de fase y el método utilizado para obtener el chirp es el *movimiento relativo de la máscara respecto al haz de iluminación* (Fig. 2.39 - Fig. 2.41). La fibra fotosensible es tensionada mediante dos soportes fijos que la mantienen estable. También se utilizan dos motores piezoeléctricos que se mueven en sentidos opuestos. Uno de ellos (PZ1) garantiza el movimiento, dirección y velocidad de barrido del haz UV ( $v_{haz}$ ) y está ubicado debajo de la lente cilíndrica. El otro motor (PZ2) está colocado debajo de la máscara de fase y es controlado por un software, que a su vez controla el generador de señales de manera remota para excitar dicho piezoeléctrico. Este introduce pequeños desplazamientos a la máscara con una velocidad  $v_f$ , incorporando cambios de fase en la red durante el grabado. En estas circunstancias, el período de la modulación grabada en la fibra cambia, resultando que la longitud de onda de Bragg difiere de la original en  $\Delta\lambda = \lambda_0 v_f/v_{haz}$ . Para el grabado de redes con chirp se utilizó un láser UV de Argón Innova® 300C FreD™ con dos cristales dobladores que generan una salida del láser de 244 nm, con una potencia continua de 100 mW. Para obtener una mayor densidad de energía, se focaliza el haz con una lente cilíndrica, y la velocidad de



desplazamiento del láser sobre la fibra es del orden de 1mm/min. Para monitorizar el grabado se utiliza como fuente un SLED de 1550nm y un analizador de espectros OSA [39].

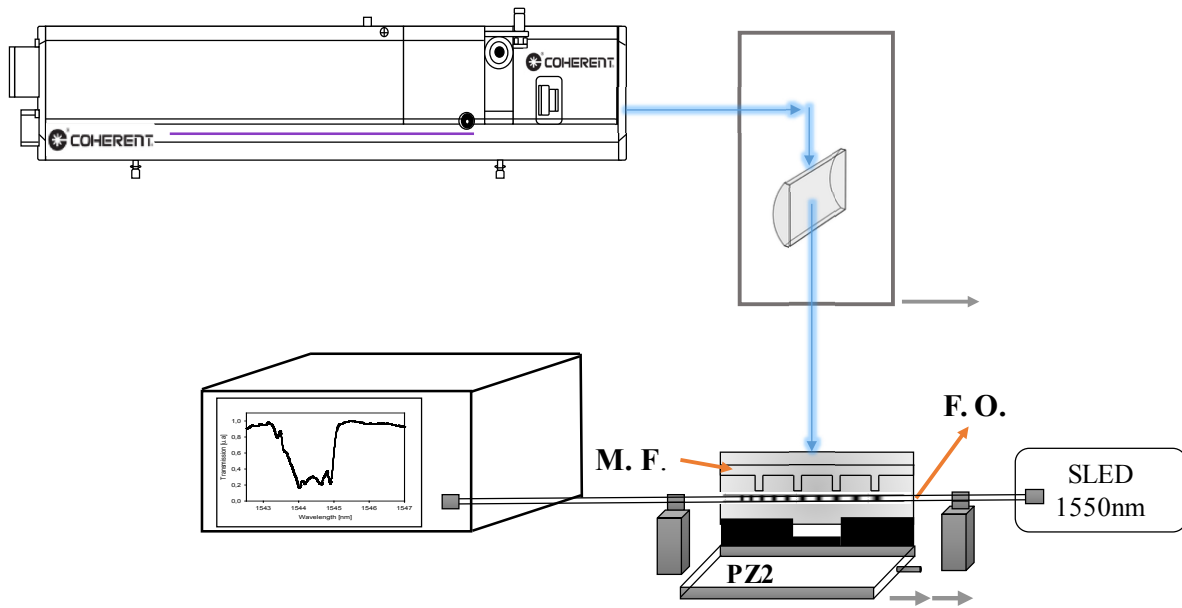


Fig. 2. 39 Esquema de grabado de redes de Bragg con Chirp (técnica (d))

Además, en la Fig. 2.40 se muestra el montaje experimental del sistema de grabado de redes con chirp y en la Fig. 2.41 se observa el monitoreo realizado durante el grabado de una CFBG, de la cual se puede apreciar su espectro en el OSA.



Fig. 2. 40 Montaje experimental del sistema de grabado de redes CFBG



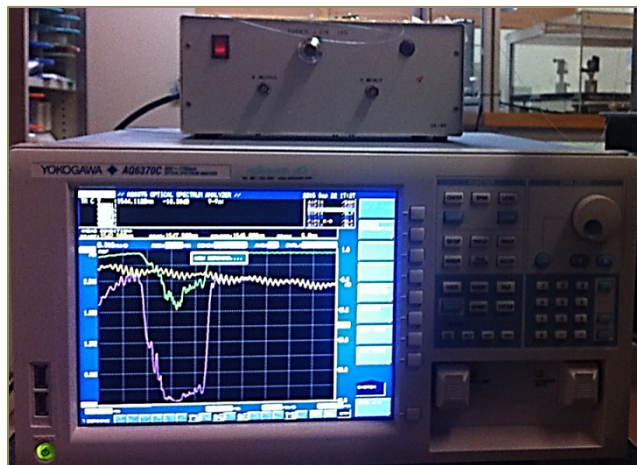


Fig. 2. 41 Monitoreo del grabado de una CFBG

En la Fig. 2.42 se puede ver la posición de los PZ1 y PZ2, la máscara de fase y la lente cilíndrica en el montaje de laboratorio y en la Fig. 2.43 se muestra la respuesta espectral en amplitud de una red de Bragg con chirp grabada con el esquema descrito anteriormente. La misma tiene 50 mm de largo, una reflectividad del 77.93% y un ancho de banda espectral  $\Delta\lambda_c=1.36$  nm.

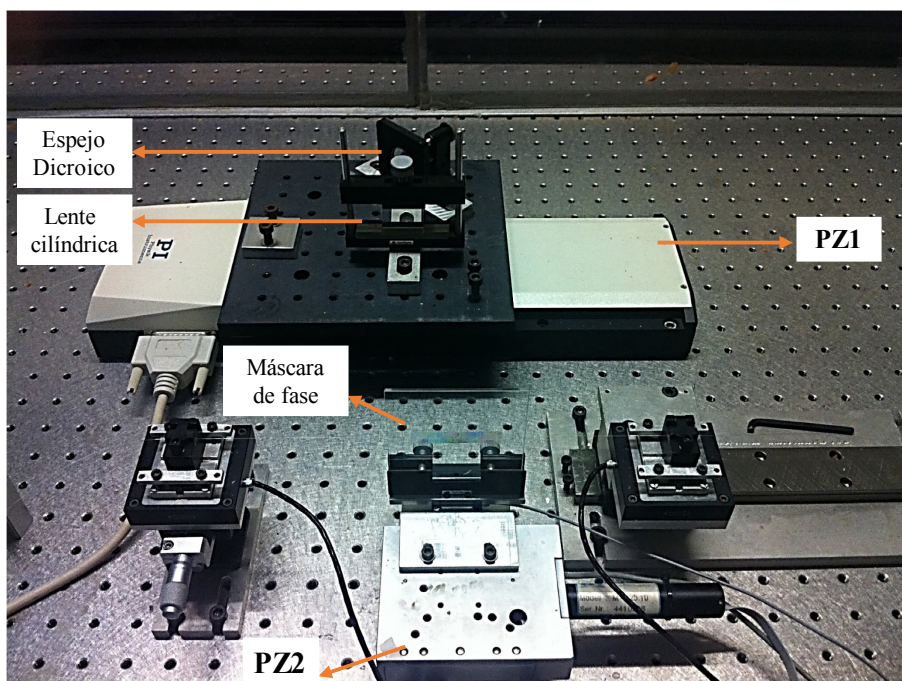


Fig. 2. 42 Posicionamiento de los PZ en el esquema de grabado

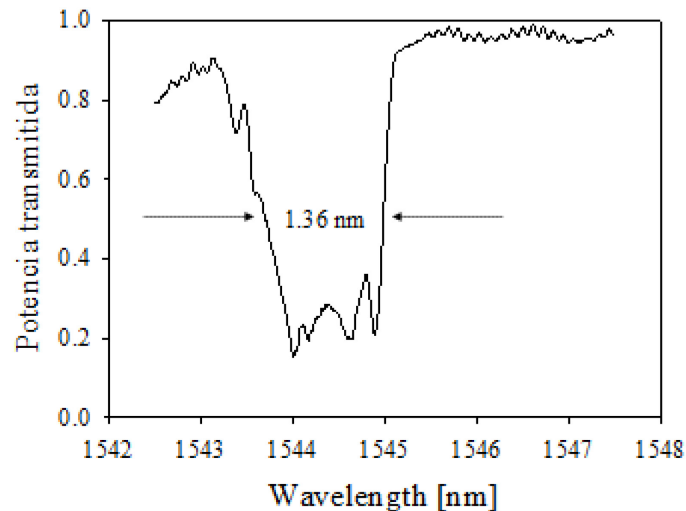


Fig. 2. 43 Respuesta espectral en amplitud de una red de Bragg con chirp grabada con el sistema descrito en (d)

## 2.7 Red de Bragg como sensor

Como ya se mencionó, las FBG funcionan como filtros de rechazo de banda que reflejan unas longitudes de onda específicas y dejan pasar el resto. Estas propiedades espectrales de las redes de Bragg en fibra permiten utilizarlas como sensor. Las señales de salida de los sensores de Bragg están codificadas en longitud de onda y por lo tanto su respuesta es independiente de la atenuación de la amplitud de la señal óptica.

### 2.7.1 FBG como sensor de deformación

Si la fibra se estira o se comprime (Fig. 2.44), la red puede medir la deformación que experimenta. Al aplicar tensión sobre la fibra óptica se produce un cambio en el periodo de la red y, en consecuencia, también en la longitud de onda de Bragg. Es decir, se observa un corrimiento o desplazamiento del pico de reflexión acorde al esfuerzo aplicado. Si el esfuerzo fue de tracción, el periodo de la red y la longitud de onda de Bragg aumentan, por lo que el máximo se desplaza hacia longitudes de onda mayores. Si el esfuerzo fue de compresión, ocurre el fenómeno inverso. Una red de Bragg utilizada como sensor de deformación tiene resoluciones típicas de  $1\mu\epsilon/\text{pm}$  dependiendo del espectrómetro que se utilice [43].

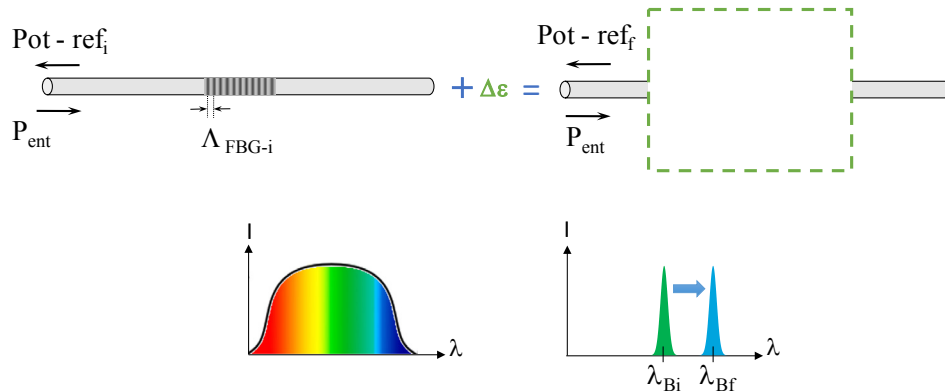


Fig. 2. 44 FBG como sensor de deformación

### 2.7.2 FBG como sensor de temperatura

Una red de Bragg en fibra tiene, igualmente, una sensibilidad intrínseca a los cambios de temperatura (Fig. 2.45), los cuales generan un corrimiento en la longitud de onda de Bragg (si la temperatura aumenta, la  $\lambda_B$  también, y viceversa). En este caso, la principal contribución al cambio en la longitud de onda de Bragg es la variación en el índice de refracción del silicio, inducido por el efecto termo-óptico. También hay una contribución derivada de la dilatación térmica, que altera el periodo de la red, pero este efecto es despreciable, debido al bajo coeficiente de dilatación del silicio. Los valores estándar de sensado de temperatura dependen del material con el que se recubre la red y fundamentalmente de la resolución del espectrómetro utilizado. Permiten obtener una resolución típica de  $\sim 0.1^\circ\text{C}$  [43].

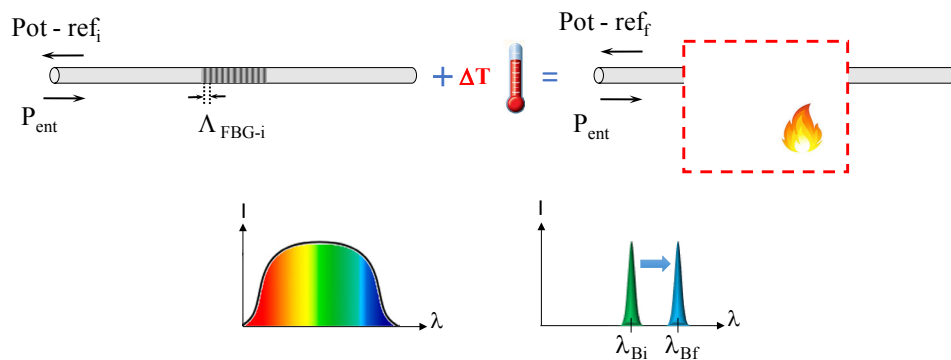


Fig. 2. 45 FBG como sensor de temperatura

Como ya se ha señalado la red es sensible a la deformación y a los cambios de temperatura, pero puede ser utilizada para medir otras magnitudes como (campo magnético, presencia de gases como el hidrogeno, entre otros). Para ello es necesario que se utilice además de las redes de Bragg un material que no altere el parámetro a medir pero que involucre algún tipo de reacción que genere una deformación o cambio en la temperatura, permitiendo que la red pueda actuar como sensor de dicha magnitud.

### 2.7.3 Dependencia de la longitud de onda de Bragg con la deformación y los cambios de temperatura en la red

El cambio de la longitud de onda de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) de la red puede ser causado por la deformación del material (debido a la aplicación de un esfuerzo o strain) ( $\varepsilon$ ), o debido a variaciones de la temperatura, ya que tanto el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra ( $n_{eff}$ ) como el periodo de la modulación de índice ( $\Lambda$ ) son funciones de las mencionadas variables. Para analizar esta dependencia hay que recordar que  $\lambda_B=2n_{eff}\Lambda$  y derivar respecto a las dos variables: la deformación ( $\varepsilon$ ) y la temperatura (T) [5], [44].

$$\Delta\lambda_B = 2 \underbrace{\left[ \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right]}_{\text{Deformación}} \Delta\varepsilon + 2 \underbrace{\left[ \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right]}_{\text{Temperatura}} \Delta T \quad (2.42)$$

Expresando el periodo  $\Lambda$  y el  $n_{eff}$  en términos  $\lambda_B$  resulta:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[ \left[ \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \left( \frac{1}{n_{eff}} \right) + \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right] \Delta\varepsilon + \left[ \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \left( \frac{1}{n_{eff}} \right) + \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right] \Delta T \right] \quad (2.43)$$

Definiendo los siguientes parámetros [5], [44]:

$$p_e = -\frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \left( \frac{1}{n_{eff}} \right), \quad \xi = \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \left( \frac{1}{n_{eff}} \right), \quad y \quad \alpha_f = \left( \frac{1}{\Lambda} \right) \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \quad (2.44)$$

- $p_e$  es el *coeficiente fotoelástico o coef. óptico de strain* ( $p_e = 0.22$ )
- $\xi$  es la *constante termo óptica* ( $\xi = 5.77 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),
- $\alpha_f$  es el *coeficiente de dilatación térmica* de la fibra ( $\alpha_f = 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Considerando la definición de strain como el cambio de longitud relativo a su valor inicial:  $\partial\varepsilon = \frac{\partial\Lambda}{\Lambda}$  y reemplazando las Ec. (2.44) en la Ec. (2.43) se obtiene:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\varepsilon + \lambda_B(\xi + \alpha_f)\Delta T \quad (2.45)$$

Definiendo  $S_e$  como la sensibilidad de la red a la deformación y  $S_T$  como la sensibilidad de la red al cambio de temperatura, se llega a las siguientes expresiones que expresan la dependencia de la longitud de onda de Bragg con estas magnitudes:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta\varepsilon} = S_e\lambda_B = 0.78 \lambda_B, \quad S_e = 1 - p_e \quad (2.46)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = S_T\lambda_B = 6.32 \lambda_B, \quad S_T = \xi + \alpha_f \quad (2.47)$$

Para una FBG en 1550nm  $\Delta\lambda_B/\Delta\varepsilon = 1.2 \text{ pm}/\mu\varepsilon$  y  $\Delta\lambda_B/\Delta T = 9.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$

En síntesis, la *deformación* de la fibra produce un cambio en el período de la microestructura ( $\Lambda$ ) y por lo tanto en  $\lambda_B$ . También hay una contribución debida a la variación del índice de refracción por efecto fotoelástico. En cuanto al efecto del cambio de temperatura, la principal contribución al cambio en  $\lambda_B$  es la variación en el índice de refracción del silicio, inducido por el efecto termo-óptico. También hay una contribución derivada de la dilatación térmica, que altera el periodo de la microestructura, pero su efecto es marginal debido al bajo coeficiente de dilatación del silicio. La expresión general de la sensibilidad de la red a la deformación y a los cambios térmicos es:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon \Delta\varepsilon + S_T \Delta T \quad (2.48)$$

### 2.7.3.1 Medición de deformación de una FBG

Para medir deformación empleando redes de Bragg hay dos posibilidades: que los sensores se adhieran a la superficie de la muestra o, como en el caso de materiales compuestos, embeberlos en la estructura misma. Cuando la fibra es embebida (rodeada), o cubierta con un material diferente, la Ec. 2.48 debe ser modificada para tener en cuenta la deformación axial inducida térmicamente ( $\varepsilon_T$ ) por el desajuste entre la expansión o contracción de la fibra óptica y la del material circundante, es decir, por el diferente coeficiente de expansión térmica de ambos. Si llamamos  $\Delta\varepsilon_T$  a la transferencia de strain de la estructura huésped a la fibra:

$$\Delta\varepsilon_T = (\alpha_{mat} - \alpha_f)\Delta T \quad (2.49)$$

donde

- $\alpha_{mat}$  es el coeficiente de dilatación del material huésped.
- $\alpha_f$  es el coeficiente de dilatación de la fibra.

Una ecuación generalizada puede ser dada, suponiendo que la transferencia de tensión de la estructura del material huésped a la fibra óptica es ideal:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = S_\varepsilon \Delta\varepsilon + S_\varepsilon \Delta\varepsilon_T + S_T \Delta T \quad (2.50)$$

### 2.7.3.2 Modificación de la respuesta de la FBG cuando son despreciables los cambios térmicos

Si el cambio de temperatura es despreciable, la Ec. 2.48 se puede simplificar como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p)\Delta\varepsilon \quad (2.51)$$

El cambio en la tensión mecánica aplicada al sensor FBG está relacionado con la deformación del material (expansión o contracción) a través de la expresión:

$$\Delta L_{FBG\_abs} [\mu m] = \Delta \varepsilon [\mu \varepsilon] L_{0r} [\mu m] \quad (2.52)$$

Donde  $\Delta \varepsilon$  es la deformación unitaria o por unidad de longitud y  $L_{0r}$  es la longitud inicial de la red en contacto con el material y, por tanto, la longitud de la muestra medida. Entonces, se puede calcular el porcentaje de deformación relativa del material como:

$$\Delta L_{FBG\_rel} [\%] = \frac{\Delta L_{FBG\_abs}}{L_{0r}} \times 100 \quad (2.53)$$

## 2.8 Ejemplo de la aplicación de redes de Bragg en medidas de vibraciones

Un sensor de vibraciones es un dispositivo que convierte un movimiento vibratorio a una señal, ya sea óptica, mecánica o más comúnmente eléctrica, que es proporcional a algún parámetro del movimiento, por ejemplo, al desplazamiento. En principio, las vibraciones son medidas con referencia a un punto fijo en el espacio y están definidas en términos de frecuencia y amplitud. Los sensores de vibraciones pueden ser:

*Sensores con referencia fija*, un terminal del sensor se fija a un punto fijo en el espacio y el otro terminal se fija (ópticamente, mecánicamente o electrónicamente, por ejemplo) al punto cuya vibración será medida.

*Sensor de tipo Masa-Resorte* (instrumento sísmico), el único terminal es la base del sistema masa-resorte; esta base se fija en el punto donde las vibraciones serán medidas. La vibración en ese punto es transmitida a la masa, produciéndose un movimiento que se determina en relación a la base del sistema [45].

El tipo de sensor que se implementó en el desarrollo del presente trabajo es un sensor con referencia fija. La implementación del sensor de vibraciones se realizó tanto con redes de Bragg como con un interferómetro de Fizeau, evaluando primero las técnicas por separado y luego midiendo en simultáneo para comparar las respuestas obtenidas.

### 2.8.1 Sensor de vibraciones empleando redes de Bragg con detección temporal

Se implementó un sensor de vibraciones conformado principalmente por dos redes de Bragg, donde una de ellas es la referencia y la otra se adhiere a un cantiléver (viga o lámina de acero fija en uno de los extremos y libre de oscilar en el otro) para acompañar las deformaciones que son monitoreadas por el sistema. Las vibraciones del cantiléver, cuya frecuencia natural de oscilación es de 29.4Hz, son generadas por un parlante y la amplitud de la señal aplicada por el generador es de 100mVpp. Sobre dicho cantiléver se adhiere la red RB. Completan el montaje experimental una segunda red RA en reposo, cuyo espectro de reflexión solapa en parte el de la anterior, una fuente de luz de banda ancha en 1550 nm (SLED), dos circuladores y un detector de InGaAs de 1 GHz de ancho de banda. En la Fig. 2.46 se ilustra en detalle el montaje del cantiléver y en la Fig. 2.47 se muestra el esquema experimental anteriormente detallado [46].

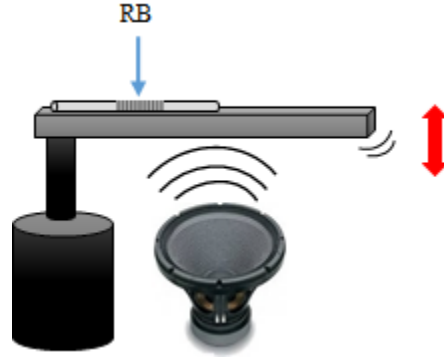


Fig. 2. 46 Detalle del cantiléver

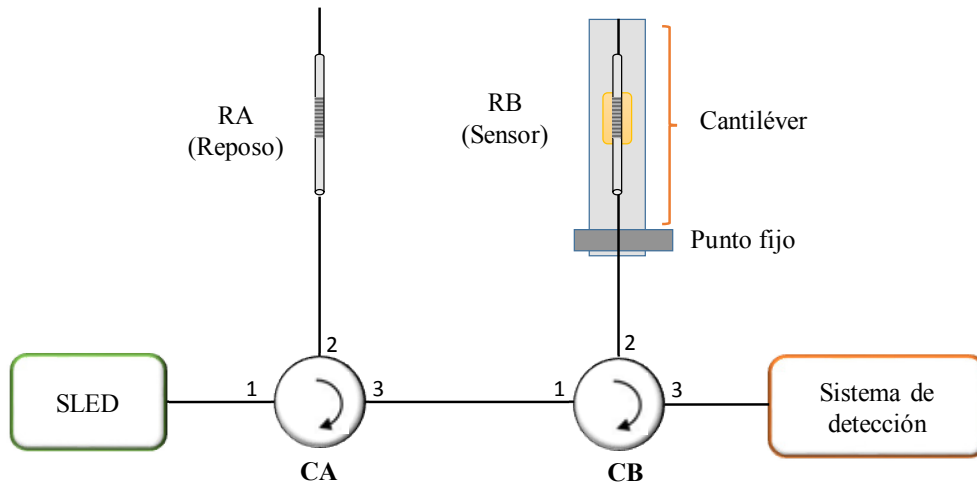


Fig. 2. 47 Esquema general del sensor de vibraciones

### 2.8.2 Modelado del sensor de vibraciones basado en FBGs

Para modelar el sensor de vibraciones se consideran dos redes de Bragg con distribuciones de reflectividad gaussianas, donde una de ellas se considera como la referencia del sistema y la otra cambia la longitud de onda de Bragg por la vibración externa. La integral del producto de las dos distribuciones instantáneas modela la salida del sistema de detección. Las reflectividades de cada una de las redes pueden expresarse de la siguiente manera [46]:

$$R_A = P_A e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{0A})^2}{2\Delta\lambda_A^2}} \quad \text{y} \quad R_B = P_B e^{-\frac{(\lambda - \lambda_{0B})^2}{2\Delta\lambda_B^2}} \quad (2.54)$$

donde  $R_A$  es la reflectividad de la red en reposo,  $R_B$  la reflectividad de la red móvil,  $P_A$  y  $P_B$  representan la potencia máxima para la longitud de onda de Bragg  $\lambda_{0A}$  y  $\lambda_{0B}$ , respectivamente (con  $\lambda_{0B} = \lambda_{0B}(t)$ ) y  $\Delta\lambda_A$  y  $\Delta\lambda_B$  indican el ancho espectral de cada una de las redes. La respuesta del sensor puede entonces expresarse como:

$$D = \int_a^b R_A R_B d\lambda \quad (2.55)$$

En la posición inicial del sistema de sensado, las distribuciones espectrales de las dos redes deben estar solapadas en uno de sus extremos. Se realizó el modelado para dos casos: uno en el cual el sistema estaba conformado por dos redes idénticas y otro en el cual, las redes difieren en sus características. En el primer caso la red FBGA es la de referencia y la red que acompaña la vibración es la FBGB. Cuando se genera una vibración hay un desplazamiento espectral de FBGB, pues se produce una deformación que cambia el grado de superposición entre ambas. A partir del modelado se puede establecer el rango de desplazamiento que experimenta la red que acompaña la vibración del sistema. Primero se consideran dos redes con las mismas características espectrales: longitud de onda de Bragg 1526.5786 nm, la potencia reflejada en  $\lambda_{0\text{Bragg}}$  es 2.4590e-4 nW, con un ancho espectral de 0.0595 nm. En la Fig. 2.48 se ilustra el solapamiento de las dos redes, donde se supone la posición de la red de referencia FBGA tal que  $\lambda_{0A}$  es cero, y también se señala la posición inicial de FBGB, solapada sobre FBGA en uno de los extremos e idealmente centrada en la zona lineal de la reflectividad de la FBGA. Además, se muestra el producto de las dos curvas (FBGA\*FBGB) (traza roja). En la Fig. 2.49 se muestra la salida D del sistema que es la integral del producto de las dos gaussianas en función de la longitud de onda y por ende respecto de la deformación generada sobre el cantiléver por la vibración, mientras dicha variación espectral no supere el semi-ancho de la red. La zona lineal resaltada con una recta representa la zona de operación, observándose además la dirección del movimiento, dependiendo si el cantiléver expande (derecha (+)) o contrae (izquierda (-)) a la red. Con líneas punteadas se indica el rango de desplazamiento de la red FBGB con respecto a la FBGA de referencia, que en este caso es de 0.06 nm.

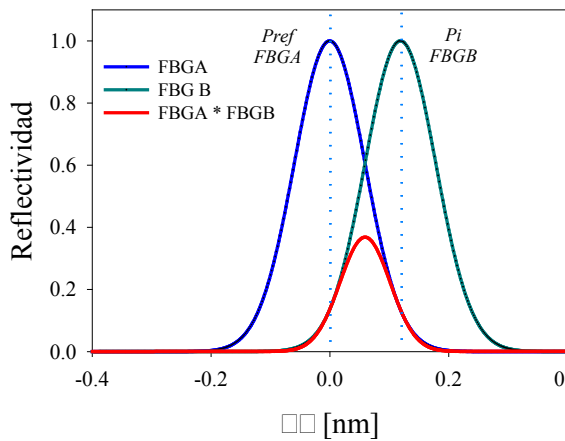


Fig. 2. 48 Producto de las reflectividades de FBGA y FBGB

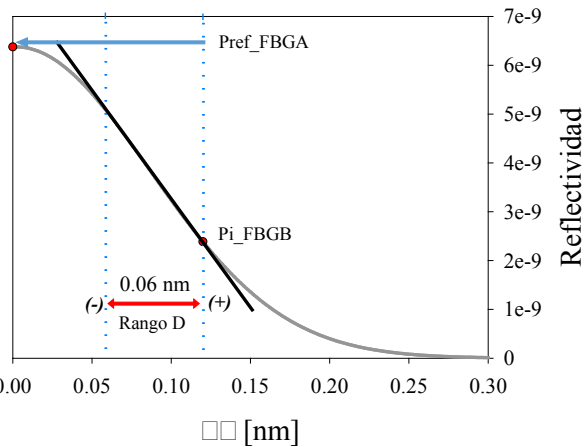


Fig. 2. 49 Integral del producto de reflectividades, indicando la zona de operación del sensor

Ahora se considera el caso en el que las dos redes tienen características espectrales diferentes que se especifican en la Tabla 2.1, y que corresponden a las redes que se utilizaron en la implementación experimental del sistema. En la Fig. 2.50 se pueden apreciar las redes FBGC, FBGD y el producto de ambas, tanto la medida de las redes experimentales (línea llena) como las simuladas (línea punteada). Se observa que ambos trazos, los medidos y los simulados, tienen una buena correspondencia. En la Fig. 2.51 se muestra la salida del sistema que da el rango de desplazamiento de la red FBGD (en este



caso fue de 0.03 nm) y se detallan la posición de la  $\lambda_{0C}$  de la red de referencia (Pref\_FBGC) y la posición inicial  $\lambda_{0D}$  de la red móvil (Pi\_FBGD). Como se puede apreciar en la figura, esta vez las dos redes están inicialmente más solapadas, por esto el rango de desplazamiento de FBGD es menor que en el caso de la Fig. 2.49.

Características de FBGC y FBGD	
$\lambda_B$ – FBGC [nm]	1526.5786
$\lambda_B$ – FBGD [nm]	1526.6466
Amplitud FBGC	0.0595
Amplitud FBGD	0.0527
Ancho espectral $\Delta\lambda_C$ [nm]	2.4590e-4
Ancho espectral $\Delta\lambda_D$ [nm]	1.8030e-4

Tabla 2. 1 Características de las redes de la implementación experimental

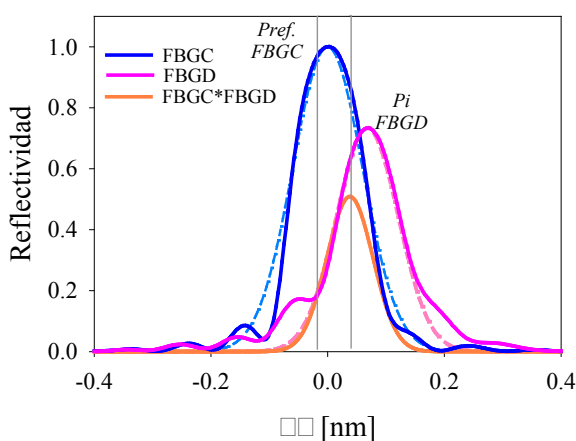


Fig. 2. 50 Producto de las reflectividades de FBGC y FBGD

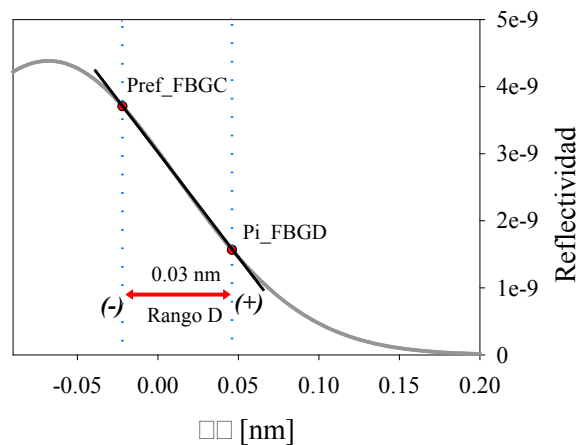


Fig. 2. 51 Integral del producto de reflectividades (FBGC y FBGD), indicando la zona de operación del sensor

### 2.8.3 Medidas experimentales del sensor de vibración

En la Fig. 2.52 se detallan las dimensiones y posición de la FBG en la chapa de aluminio que se puso a vibrar. Donde “dc-FBG” es la distancia desde el punto fijo al centro de la FBG oscilante, “Lv” es la longitud de la varilla. En la Tabla 2.2 se muestran las cuatro variaciones que se realizaron a la longitud de la lámina con el objeto de obtener distintas frecuencias naturales de oscilación, las cuales estuvieron entre 7 y 22 Hz.

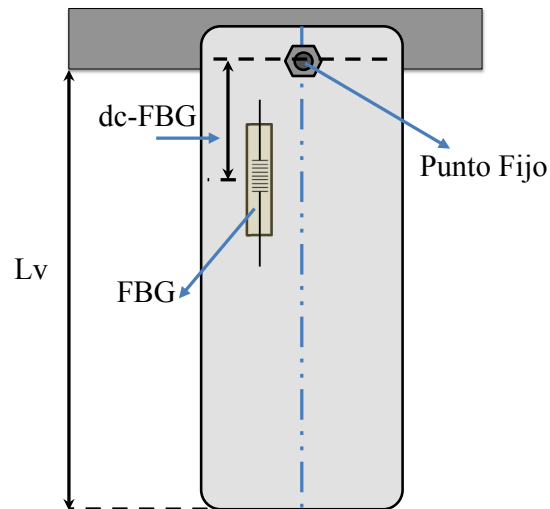


Fig. 2. 52 Ubicación de la FBG en la chapa de aluminio que se hizo oscilar

Medida	dc-FBG [cm]	$L_v$ [cm]	Frecuencia [Hz]
a	9.2	30	7.2
b	4.5	22	12.6
c	4.7	19	17.7
d	4.3	17.5	21.6

Tabla 2. 2 variaciones de la longitud de la lámina

A continuación, en las Fig. 2.53 a Fig. 2.56 se muestran la señal temporal proveniente de la red sensora y la transformada de fourier (FFT) correspondiente, que indica la frecuencia de vibración, para cada una de las condiciones especificadas en la Tabla 2.2. Se observa que cuanto mayor es  $L_v$  menor resulta la frecuencia de resonancia de la lámina metálica.

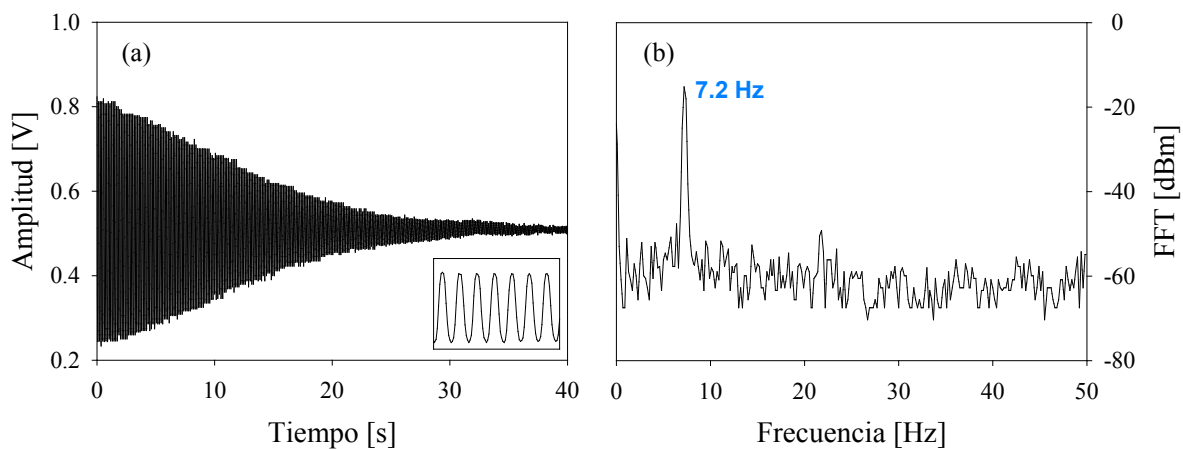


Fig. 2. 53 a) Señal Temporal – Medida a y b) FFT – Medida a

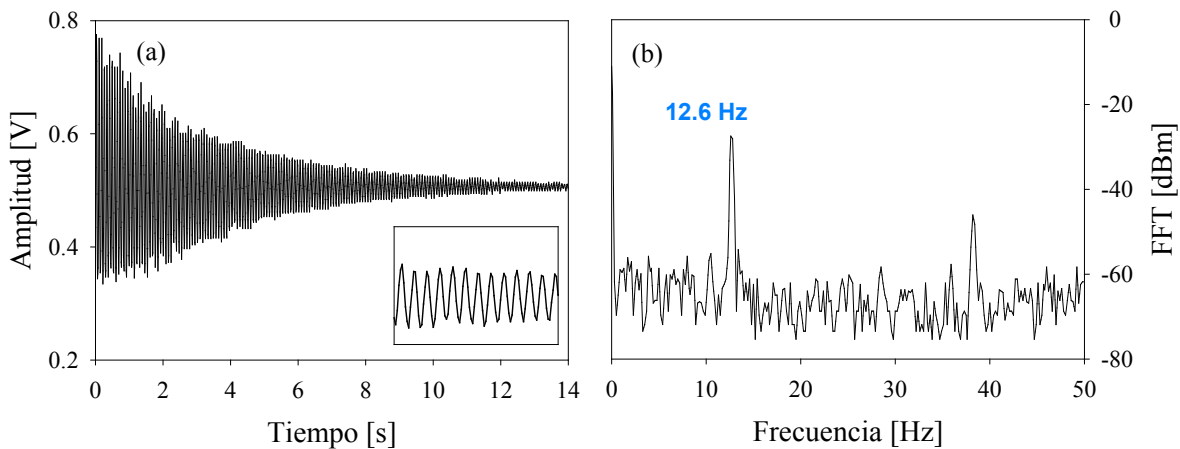


Fig. 2. 54 a) Señal temporal – Medida b y b) FFT Medida b

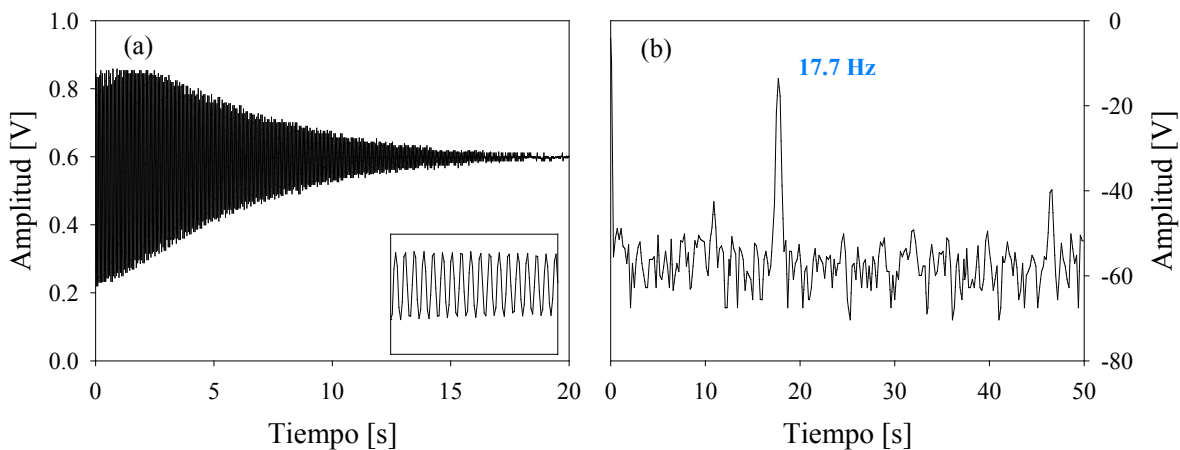


Fig. 2. 55 a) Señal Temporal – Medida c y b) FFT – Medida c

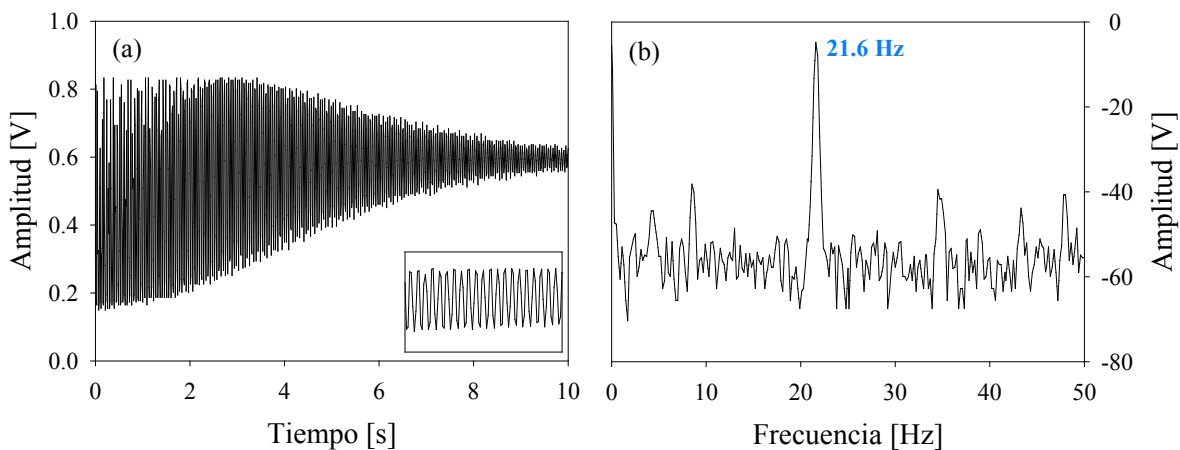


Fig. 2. 56 a) Señal Temporal – Medida d y b) FFT – Medida d

## *Resumen del Capítulo 2*

En este capítulo se brindaron las herramientas teóricas que describen las características de las redes de Bragg y su uso como sensor de deformaciones y cambios de temperatura. Se describieron también las técnicas de simulación de redes y se compararon los resultados obtenidos al simular redes uniformes, tanto aplicando la integración numérica de las ecuaciones de modos acoplados como el método de la matriz de transferencia. Con este último se modelaron también redes con Chirp, destacando que es un método muy eficiente a nivel computacional. Este método fue utilizado en la tesis para la implementación de las aplicaciones discutidas en los capítulos siguientes, particularmente el referido a la utilización de redes de Bragg con chirp para la detección de cracks o fisuras en materiales (Capítulo 6). Se incluyó además la descripción detallada de varios esquemas de grabado utilizados para la generación de redes uniformes y con chirp. Finalmente, se modeló e implementó experimentalmente un sensor de vibración que utiliza dos redes de Bragg con perfil de reflectividad gaussiano, estableciendo una de ellas como referencia fija y la otra como sensora.

## Capítulo 3

### *Interferómetro Fizeau de fibra óptica*

#### 3.0 Introducción

La interferometría se basa en la superposición de dos o más haces de luz para medir la diferencia de fase entre ellos. Estos haces tienen la misma frecuencia. Normalmente, un haz de luz incidente en un interferómetro se divide en dos o más y se recombinan para crear el patrón de interferencia (distribución modulada de intensidad). Para generar las franjas de interferencia, al menos dos caminos ópticos son necesarios. La propagación de los haces luminosos puede producirse en el aire o alternativamente en la fibra. En dichos casos, la diferencia de camino óptico entre las dos ramas que producen dos máximos o mínimos consecutivos de intensidad corresponden a media longitud de onda.

Los sensores interferométricos son dispositivos basados en modulación de la fase de la luz. Estos ofrecen altas sensibilidades de hasta  $10^{-13}$  m. La luz es proporcionada por una fuente de luz coherente y generalmente se inyecta en dos fibras monomodo (una de referencia y otra de sensado). La diferencia de camino óptico en que el efecto puede ser observado depende de la longitud de coherencia de la fuente ( $L_c = \lambda^2/2\Delta\lambda$ , donde  $\Delta\lambda$  es el ancho espectral de la fuente). Si una fibra es perturbada respecto a la otra, al volver a combinar los haces, se produce un cambio de fase dependiente de la interacción. Cuando una onda de luz de una longitud de onda  $\lambda$  dada se propaga dentro de una fibra óptica de longitud  $L$ , el ángulo de fase  $\varphi$  en el extremo de la fibra está dada por [5], [47] :

$$\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} = \frac{4\pi n_n}{\lambda_0} \quad (3.1)$$

donde  $n_n$  es el índice de refracción en el núcleo de la fibra,  $\lambda_0$  es la longitud de onda de la luz en el vacío. La suma de las dos señales genera básicamente una respuesta del tipo:

$$I = I_0(1 + \cos(\Delta\varphi)) \quad (3.2)$$

Si una perturbación externa provoca un cambio en el índice de refracción del núcleo de la fibra ( $\Delta n_n$ ) o en la longitud de la fibra ( $\Delta L$ ), se produce un cambio de fase ( $\Delta\phi$ ) que puede ser definido como:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_n\Delta L + L\Delta n_n) \quad (3.3)$$

Algunas configuraciones de interferómetros diseñados en fibra óptica se discutirán a continuación, a saber: *Mach-Zehnder*, *Michelson*, *Sagnac* y *Fabry-Perot*. Una variación particular de este último es el *Interferómetro de Fizeau*, el cual fue el empleado para aplicaciones de sensado en materiales en el desarrollo de esta tesis.

### 3.1 Tipos de Interferómetros

#### 3.1.1 Interferómetro Mach-Zehnder

El interferómetro Mach-Zehnder se muestra en la Fig. 3.1 cuyo esquema de medida se compone de dos acopladores (AC) de 3 dB, separados por dos fibras ópticas, donde una es la referencia y la otra es la fibra de prueba. En el primer acoplador, el 50% de la potencia se acopla a cada fibra, y las fibras se recombinan en el segundo acoplador. Si los dos tramos de fibra son iguales o difieren en un número entero de longitudes de onda, las ondas de luz se recombinan en fase y la intensidad de salida estará en su valor máximo. Sin embargo, si las longitudes de fibra difieren en media longitud de onda, los haces recombinados estarán en oposición de fase y la intensidad de salida será mínima [48], [49]. Este tipo de interferómetro se utiliza en diferentes aplicaciones tales como la perfilometría de superficies, medida de cambios de índice de refracción, medida de voltaje, corriente, etc.



Fig. 3. 1 Esquema del interferómetro Mach- Zehnder

#### 3.1.2 Interferómetro Michelson

La configuración de un interferómetro de Michelson puede ser considerada como una forma invertida de la versión del interferómetro Mach-Zehnder. Esta configuración (Fig. 3.2) utiliza un único acoplador de fibra óptica y fibras con extremos espejados que retro-reflejan los haces del láser, el cual es recombinado en el acoplador y dirigido al detector. El interferómetro Michelson es utilizado por ejemplo para medir espesores e índice de refracción, vibraciones y dilataciones, también como un sensor de desplazamiento nanométrico, entre otros.

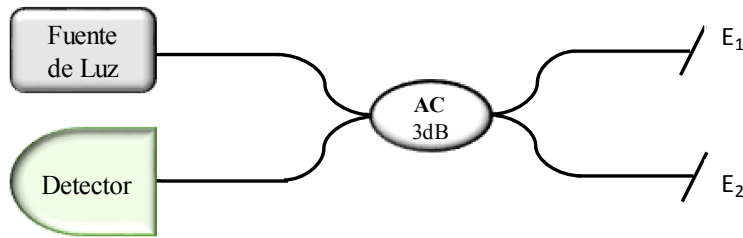


Fig. 3. 2 Esquema del interferómetro Michelson

### 3.1.3 Interferómetro Sagnac

En la configuración del interferómetro Sagnac se suele utilizar como fuente de luz un láser de semiconductor de modo único estabilizado o un láser de fibra óptica dopada con erbio. El haz láser se divide en dos haces con igual intensidad, mediante un acoplador de fibra de 3 dB. Los dos haces de luz viajan entorno de una bobina de fibra óptica monomodo en direcciones opuestas. A la salida de la bobina, ambos haces están en fase en un interferómetro sin rotación, mientras que, en una bobina en rotación, debido a que la velocidad de rotación de la trayectoria óptica de uno de los haces es más corta que la otra, se genera una diferencia de fase entre ellos. El espectro de interferencia depende de la frecuencia angular determinada por el interferómetro. Este tipo de interferómetro se utiliza para la determinación de velocidades angulares (giróscopo de fibra óptica) cuya aplicación es usada para la detección y control de inestabilidades en vehículos (aviones, barcos, cohetes, satélites, etc.) [50].

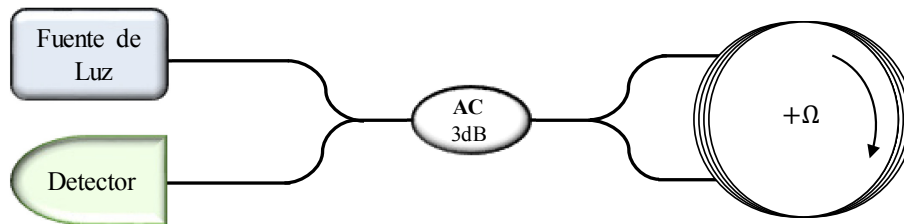


Fig. 3. 3 Esquema del interferómetro Sagnac

### 3.1.4 El Interferómetro Fabry-Perot (IFP)

El primer Interferómetro Fabry-Perot (IFP) de fibra se reportó a principios de 1980. En estos primeros experimentos la cavidad del interferómetro estaba formada por una fibra monomodo con espejos dieléctricos. La reflectancia y la transmitancia fue monitoreada con la luz de un láser de He-Ne enfocado en el interferómetro de fibra. Además, se confirmó la alta sensibilidad a la tensión y a la temperatura. Actualmente es utilizado para diferentes aplicaciones, como por ejemplo para sensar temperatura, vibraciones mecánicas, ondas acústicas, voltaje ac, campos magnéticos, etc.

Los sensores de fibra Fabry-Perot se clasifican generalmente como intrínsecos o extrínsecos. Una fibra (en la mayoría de los casos monomodo) transporta la luz desde un emisor al interferómetro y desde el interferómetro a un fotodetector.

En un *sensor interferométrico Fabry-Perot intrínseco*, los dos espejos están separados por un trozo de fibra monomodo y las medidas afectan la longitud del camino óptico de la luz propagándose dentro de la misma.

En el caso del *sensor extrínseco*, los dos espejos están separados por un espacio de aire. Las medidas del sensor afectan la longitud del camino óptico en otro medio que no es la fibra. Ambos sensores están diseñados de tal manera que la medida afecta a la longitud de la cavidad óptica, y la luz reflejada o transmitida por el interferómetro es convertida por un fotodetector en una señal eléctrica que posteriormente es procesada y traducida en la magnitud a medir [47].

En la Fig. 3.4 se ilustran cuatro diferentes configuraciones del interferómetro Fabry-Perot intrínseco, la Fig. (a) es la configuración más simple, un extremo pulido de la fibra forma un espejo y el segundo espejo es un espejo interno que puede ser por empalme de las fibras o fibras con revestimiento pulidas. La Fig. (b) tiene dos espejos internos en la fibra, la Fig. (c) son redes reflectivas (FBGs) y la Fig. (d) es un “loop de fibra” en donde el acoplador actúa en forma unidireccional.

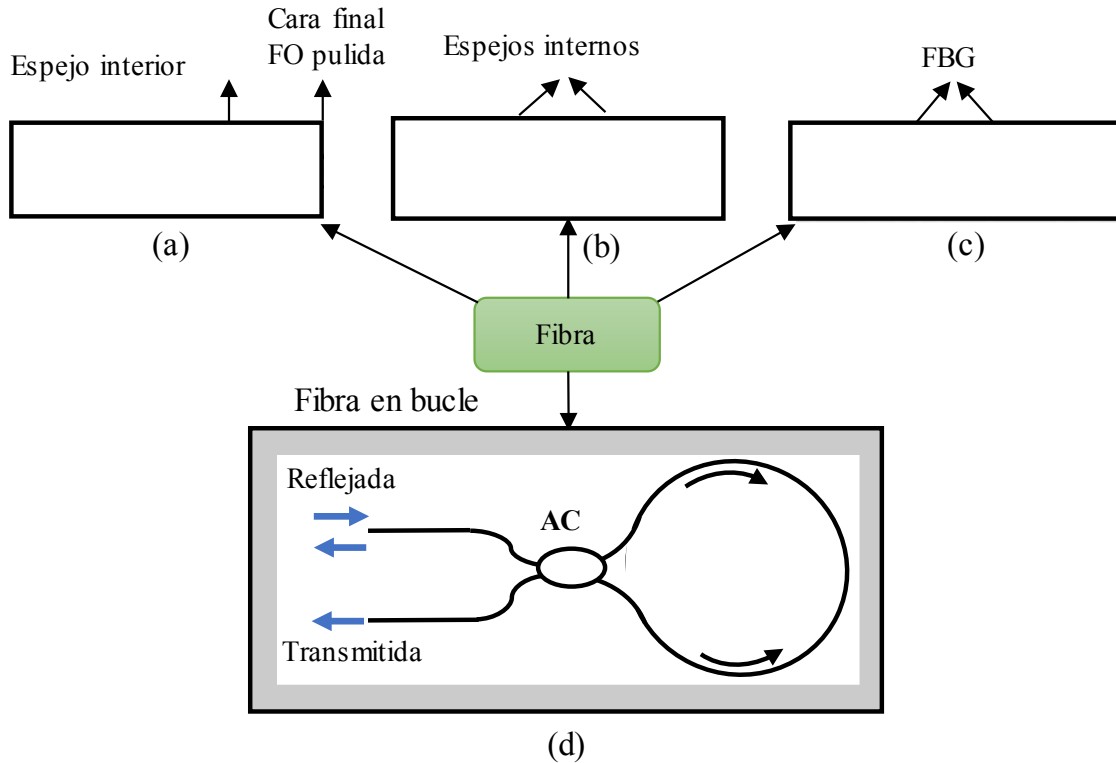


Fig. 3. 4 Distintas configuraciones del Interferómetro Fabry-Perot Intrínseco

En la Fig. 3.5 se ilustran cuatro diferentes configuraciones del interferómetro Fabry-Perot extrínseco. En la configuración de la parte (a) hay una cavidad de aire en medio de una fibra pulida y un espejo con diafragma, la longitud de la cavidad es del orden de varios micrones y puede ser modificada por un espejo convexo con diafragma. Esta configuración opera con las medidas del coeficiente de reflexión al igual que en la parte (c). En la parte (b) la cavidad de aire está formada entre la superficie de dos fibras pulidas cuyas caras son



alineadas en un tubo hueco (capilar). Finalmente, en la parte (d) se muestra la estructura del etalón de fibra en línea, que utiliza una fibra de núcleo hueco empalmada entre dos fibras monomodo.

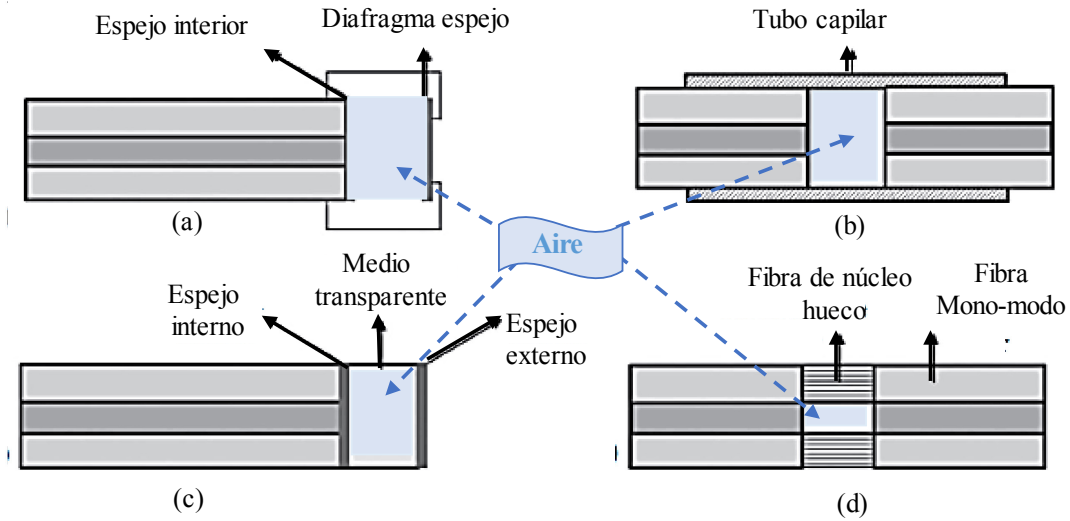


Fig. 3. 5 Esquemas de Interferómetros Fabry-Perot Extrínsecos

La intensidad reflejada por un Fabry-Pérot de caras reflectantes paralelas surge de la siguiente expresión general, conocida como función de Airy:

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{F \operatorname{sen}^2(\delta/2)}{1 + F \operatorname{sen}^2(\delta/2)} \quad (3.4)$$

donde  $\delta$  representa la diferencia de fase de las dos ondas que interfieren, y  $F$  es el coeficiente de fuerza de Airy o “fineza” del interferómetro, que depende de la reflectividad  $R$  de las caras [51].

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (3.5)$$

En la Fig. 3.6 se observa la función de transferencia del interferómetro. La misma presenta picos cuya forma depende de la reflectividad de las superficies que forman la cavidad resonante, y su separación es un parámetro típico de estos interferómetros que se denomina rango espectral libre (FSR – free spectral range).

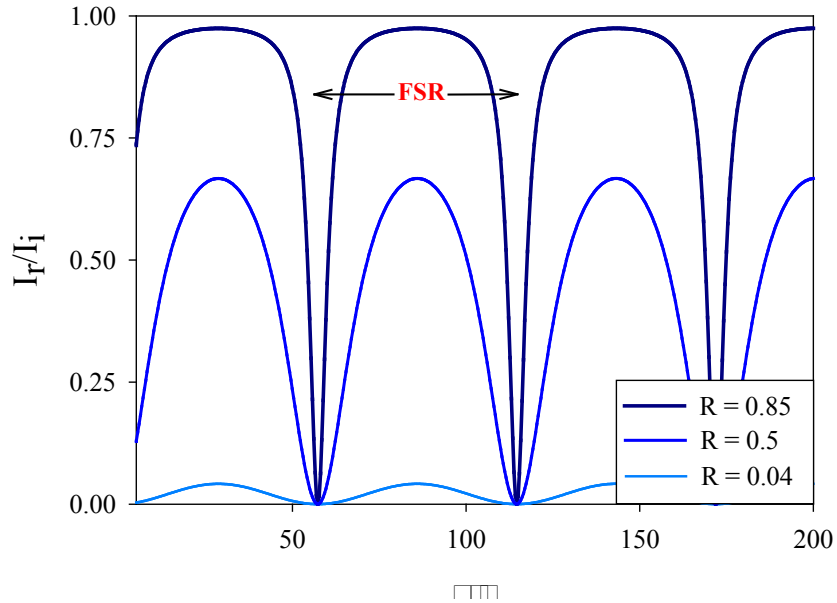


Fig. 3. 6 Función de Airy para tres reflectividades diferentes

### 3.1.5 Interferómetro de Fizeau

El interferómetro Fabry-Perot es uno de los sensores de fibra óptica más utilizados, debido a su exactitud sub-micrométrica en la medición de parámetros tales como temperatura, presión, desplazamiento o vibración [52]–[55]. Cuando la fineza de la cavidad Fabry-Pérot hecha con componentes de fibra óptica es baja, o la longitud de la cavidad formada por las superficies de los elementos reflectantes es mucho mayor que el diámetro del núcleo de la fibra utilizada, el interferómetro Fabry-Perot puede ser llamado Interferómetro de Fizeau (IF) [56], [57]. En este trabajo de tesis fue uno de los dispositivos más empleados, por lo que seguidamente será detallado en extenso.

En la Fig. 3.7 se ilustra un esquema general del interferómetro de Fizeau basado en fibra óptica, que será utilizado más adelante como sensor. El mismo está formado por dos superficies paralelas: la cara pulida de la fibra (de reflectividad  $R_1$ ) y una superficie reflectante que cierra la cavidad (de reflectividad  $R_2$ ). La longitud de dicha cavidad es  $d$ , con índice de refracción  $n_0 \approx 1$  (ya que se considera que es aire). Si se considera la intensidad del haz incidente  $I_0$ , parte de él se refleja  $I_{r1}$  al interior de la fibra y la otra parte se transmite a la cavidad  $I_{t1}$ . Cuando este haz transmitido llega a la segunda superficie reflectante, es parcialmente reflejado  $I_{r2}$  (como el interferómetro se estudia en reflexión, no se considera la transmisión de esa superficie). Parte de esta luz se acopla nuevamente a la fibra y parte es reflejada otra vez hacia la cavidad, generando así una sucesión de haces reflejados y transmitidos dentro de la misma. Debido a la baja reflectividad de las caras, solo es necesario considerar dos de ellos.

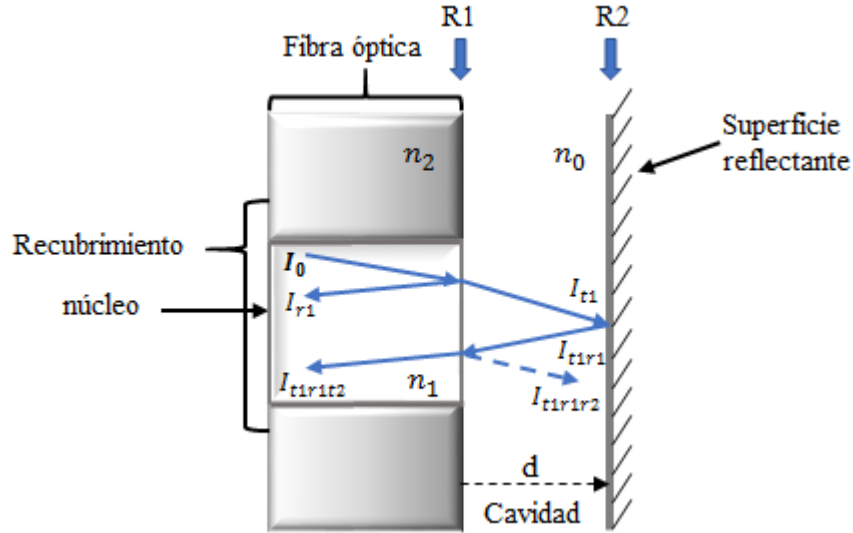


Fig. 3. 7 Esquema del funcionamiento del interferómetro de Fizeau

Teniendo en cuenta la interferencia de los haces reflejados antes mencionados, la función de transferencia normalizada del interferómetro Fizeau está dada por:

$$\frac{I_R}{I_0} = 1 + \frac{2\sqrt{R_1 R_2} \beta (1 - R_1)}{R_1 + (1 - R_1)^2 R_2} \cos \varphi \quad (3.6)$$

donde  $I_0$  es la intensidad media,  $R_1$  y  $R_2$  son las reflectividades de las superficies,  $\beta$  es un valor dependiente de la cavidad y  $\varphi$  es el desplazamiento de fase. El parámetro  $\beta$ , comúnmente conocido como la eficiencia de acoplamiento óptico, es función de la longitud de la cavidad  $d$ , el radio del núcleo de fibra óptica  $a$ , la longitud de onda de trabajo  $\lambda$  y la frecuencia normalizada  $\nu$ , y está dado por:

$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{d}{k\omega^2}\right)^2} \quad \text{con} \quad \begin{cases} \omega = \frac{a}{\ln(\nu)} \\ k = \frac{2\pi n}{\lambda} \end{cases} \quad (3.7)$$

El argumento  $\varphi$  de la modulación tiene en cuenta el desplazamiento de fase causado por la diferencia de camino de los haces y se define como:

$$\varphi = \frac{4\pi n_0 d}{\lambda} \quad (3.8)$$

donde  $n_0$  es el índice de refracción del medio en el interior de la cavidad (aire). Por lo tanto, resulta clara la dependencia con la longitud de la cavidad, de la señal generada por el interferómetro. Esto permite su utilización como sensor de la mencionada variable. La separación de frecuencia  $\Delta\nu$  (constante a lo largo del espectro) entre los dos máximos consecutivos de intensidad correspondiente a dos máximos consecutivos de interferencia, se puede expresar como:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2d} \quad (3.9)$$

Considerando que  $|\Delta\nu| = (c / \lambda^2) \Delta\lambda$ , se puede expresar la separación espectral de los picos (FSR - Free Spectral Range) como:

$$FSR = \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (3.10)$$

De aquí es posible obtener la relación entre la separación de dos picos consecutivos y la longitud de la cavidad  $d$  como:

$$d = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda} \quad (3.11)$$

donde  $|\Delta\lambda| = |\lambda_n - \lambda_{n-1}|$  y  $\lambda_n, \lambda_{n-1}$  son las longitudes de onda de dos máximos espectrales consecutivos. Debido a esto, la precisión de la técnica puede alcanzar valores bajos que dependen de las especificaciones del analizador óptico empleado. El contraste de la señal obtenida con este interferómetro, está dado por un parámetro conocido como visibilidad, que describe la calidad de las franjas producidas por el sistema, como:

$$V = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}} \quad (3.12)$$

donde  $I_{m\acute{a}x}$  e  $I_{m\acute{i}n}$  son los valores de intensidad máximo y mínimo respectivamente, correspondientes al diagrama de franjas.

### 3.1.6 Sistemas de detección del IF

Es posible plantear dos sistemas de detección de la señal de salida del Interferómetro de Fizeau, una *Medida Temporal* o una *Medida Espectral*. Es bueno aclarar que la detección espectral permite realizar tanto la medida de una situación estática como dinámica. Es decir, puede medirse tanto una separación constante entre las superficies que forman la cavidad, como una separación que varía a medida que transcurre el tiempo. En cambio, el esquema temporal sólo puede aplicarse para realizar la medida de una situación dinámica (donde “ $d$ ” cambia con el tiempo). Si la longitud de la cavidad permanece constante, sólo se detectará un nivel de intensidad luminosa constante a medida que pasa el tiempo.

#### 3.1.6.1 Sistema de detección del IF con una medida temporal

Se simulará un incremento monótono de la distancia  $d$  entre espejos para ilustrar una señal temporal típica del IF. El movimiento de la superficie reflectante respecto del conector de FO se supone que ocurre a una velocidad constante dada por  $V = \Delta d / \Delta t$ , donde  $\Delta d$  es el cambio de longitud de la cavidad interferométrica. En la simulación se adopta una velocidad  $V = 1.1$  mm/s. En la Fig. 3.8 se muestra una señal modelada a partir de la Ec. (3.6) cuya variable en este caso es la distancia “ $d$ ” que influye directamente en el parámetro  $\beta$  descrito por la Ec. (3.7) y en la fase. Se toman como constantes el radio del núcleo  $a = 5$

$\mu\text{m}$ , la frecuencia normalizada es tomada como  $\nu = 2.404$  en la región espectral de trabajo (1550 nm), el índice de refracción del material de la fibra  $n = 1.5$ , las reflectividades de las superficies  $R_1 = R_2 = 0.6$  y la longitud de onda de la fuente luminosa  $\lambda = 1550$  nm. Para reproducir la señal detectada temporalmente se considera  $\Delta t = \Delta d / V$ .

La separación entre máximos (o mínimos) de la señal resultante ocurre cuando  $\Delta d = \lambda/2$ . En este caso el cambio de fase es proporcional al cambio de longitud de la cavidad ( $\Delta\varphi \propto \Delta d$ ), donde  $\varphi$  es definido por la Ec. (3.8). La caída en la visibilidad de la señal es debida a la divergencia del haz que sale de la fibra y hace que se recolecte menos luz reflejada al incrementarse la separación entre las superficies que forman la cavidad.

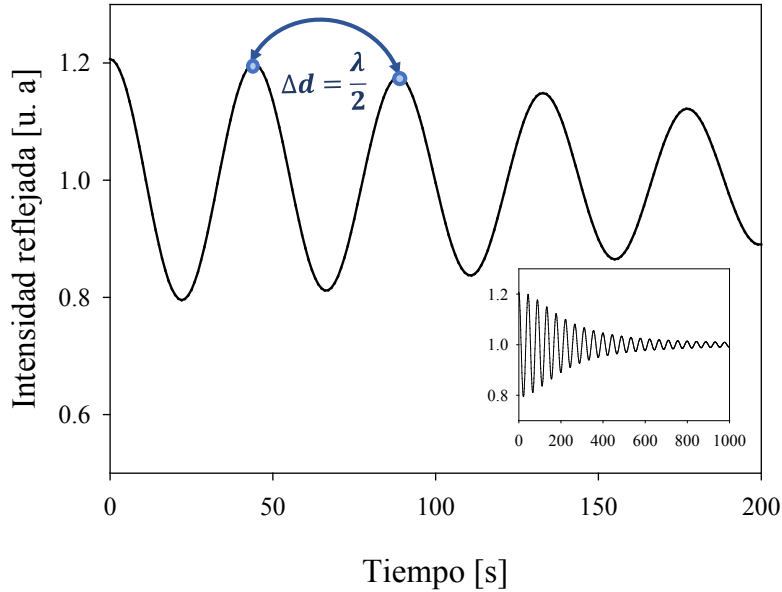


Fig. 3. 8 Señal temporal típica del IF

### 3.1.6.2 Sistema de detección del IF con una medida espectral

En la Fig. 3.9 se muestra una señal espectral típica del IF, modelada considerando la Ec. (3.6) y los mismos valores de los parámetros constantes utilizados en la Fig. 3.8 pero en este caso, por tratarse de una señal espectral, la variable es la longitud de onda. En la Fig. 3.9 se muestran dos trazos, uno de ellos va a ser el punto de referencia o *condición inicial* (Trazo 1) y el otro trazo va a indicar como es el *cambio de longitud de la cavidad* (Trazo 2) en una situación dinámica. Entonces si la superficie reflectante *se aleja* de la cara del conector, la cavidad aumenta su longitud y el segundo trazo va a tener *mayor número de franjas* y amplitud algo menor, ya que llega menos luz a la fibra. Por el contrario, si la superficie reflectante *se acerca* a la cara del conector el segundo trazo va a tener *menor número de franjas* y amplitud algo mayor. Este es el caso mostrado en la Fig. 3.9, donde se pasa de una situación de aproximadamente 13.5 a 2 franjas, que corresponde a un cambio en la longitud de la cavidad de unos 0.1334 mm.

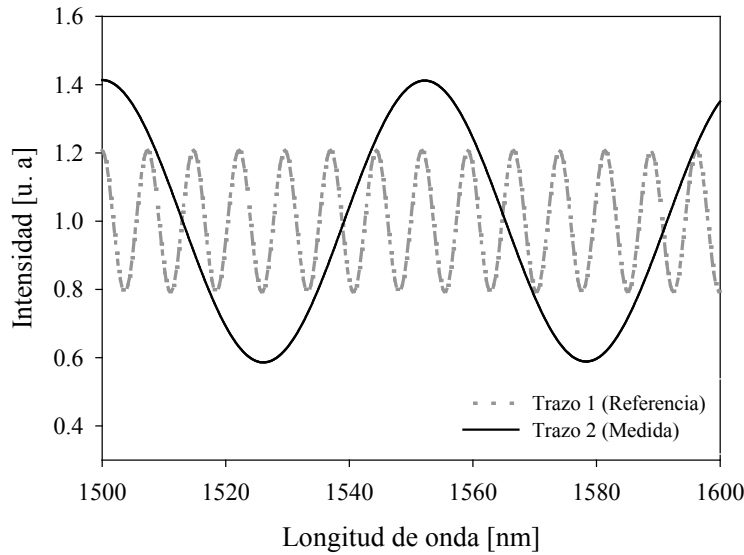


Fig. 3. 9 Señal espectral de un IF

### 3.1.7 Medida de vibraciones con el Interferómetro de Fizeau

Se utilizó un interferómetro de Fizeau para medir vibraciones generadas en una lámina metálica fijada en uno de sus extremos. El interferómetro consiste en una cavidad óptica generada entre el extremo de la fibra y la superficie vibrante a analizar. Al iluminar la superficie a través de la fibra empleando una *fuentes de luz coherente*, se da lugar a la aparición de franjas de interferencia que son registradas a medida que la lámina oscila. Como se mencionó anteriormente, la distancia de separación entre dos franjas de interferencia consecutivas corresponde a un cambio en la posición de la lámina de media longitud de onda de la radiación coherente empleada [45], [58].

En la Fig. 3.10 se muestra el esquema de medida utilizado, que incluye una fuente láser estabilizada en potencia con emisión en 1310 nm y un acoplador de fibra (Ac) 50/50. Una de las ramas de salida del acoplador se utilizó para iluminar la superficie y recoger la señal de interferencia producida en la cavidad, mientras que en la otra se colocó gel adaptador de índice para evitar reflexiones espurias. La cuarta rama del acoplador permitió enviar la señal de salida del IF a un detector de InGaAs para su posterior procesamiento. La oscilación del cantiléver se generó colocando un parlante por debajo y excitándolo con una señal sinusoidal, cuya frecuencia se varió hasta alcanzar la frecuencia natural de oscilación del cantiléver. En el experimento, la ubicación del sensor fue modificada a lo largo del cantiléver con el objeto de medir la amplitud de la oscilación en diferentes puntos del mismo (Fig. 3.10).

En la Fig. 3.11 se señalan cada una de las posiciones de medida del interferómetro de Fizeau (puntos A, B, C, D y E), ya que el dispositivo no es deformado en todos lados por igual, sino que obviamente, a mayor distancia al punto de fijación mayor será la amplitud del movimiento. También se indica la posición de una FBG que luego se usó para hacer una medida simultánea con ambas técnicas.

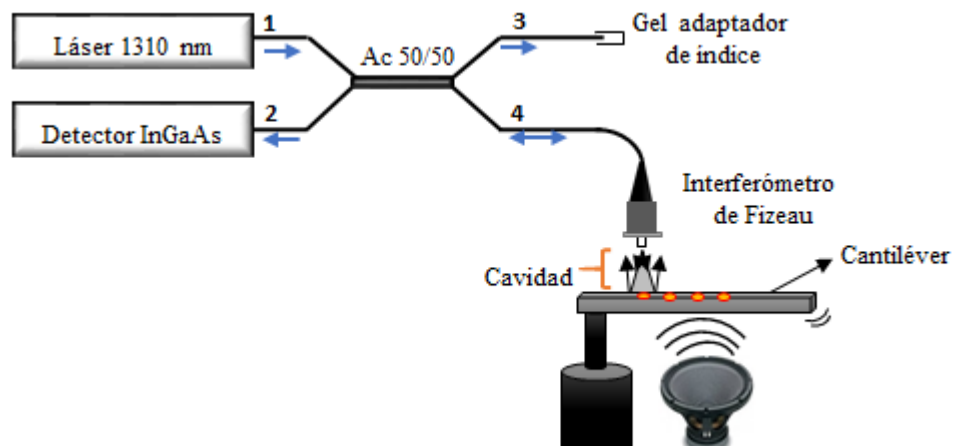


Fig. 3. 10 Esquema de medida de vibraciones con el IF

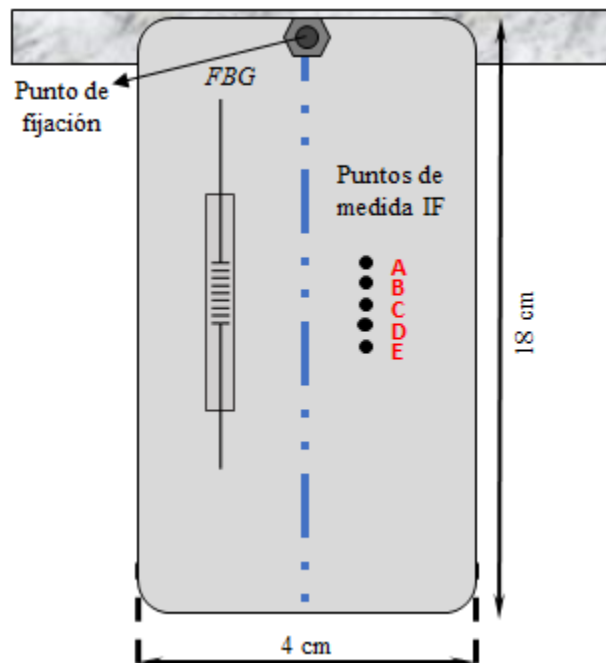


Fig. 3. 11 Ilustración de las posiciones de medida

En la Fig. 3.12 se muestra un ejemplo de la señal temporal obtenida con el IF en una de las medidas de caracterización de vibraciones, realizada en el punto B del cantiléver. En esta figura se ilustra el periodo de la oscilación ( $T = 0.03$  s) que corresponde a una frecuencia de 29.41 Hz y la amplitud ( $A = 6.55$   $\mu\text{m}$ ) de la misma (que puede ser determinada por el conteo del número de picos, teniendo en cuenta que la separación entre dos máximos consecutivos corresponde a un cambio de posición de  $\lambda/2$ ).

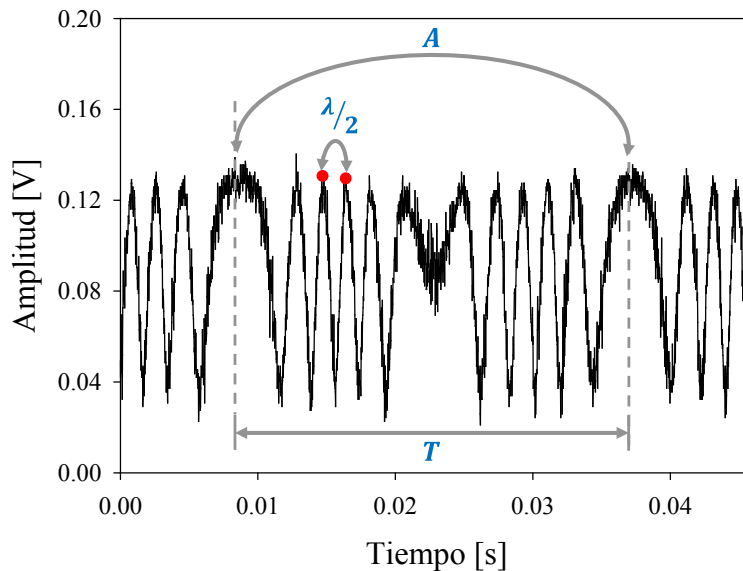


Fig. 3. 12 Señal temporal del IF al medir vibraciones

En la Tabla 3.1 se indica cómo se flexiona el cantiléver en los puntos de medida indicados, cuando se lo pone a oscilar a una frecuencia de 29.4 Hz, y en la Fig. 3.13 se grafican los resultados obtenidos.

Punto de medida	L [cm] del Pto fijo a los pto de medida (IF)	Amplitud [ $\mu\text{m}$ ]
A	7.25	23.0
B	7.6	25.7
C	8	28.4
D	8.3	30.3
E	8.6	34.4

Tabla 3. 1 Resultados de mediciones de vibración con IF

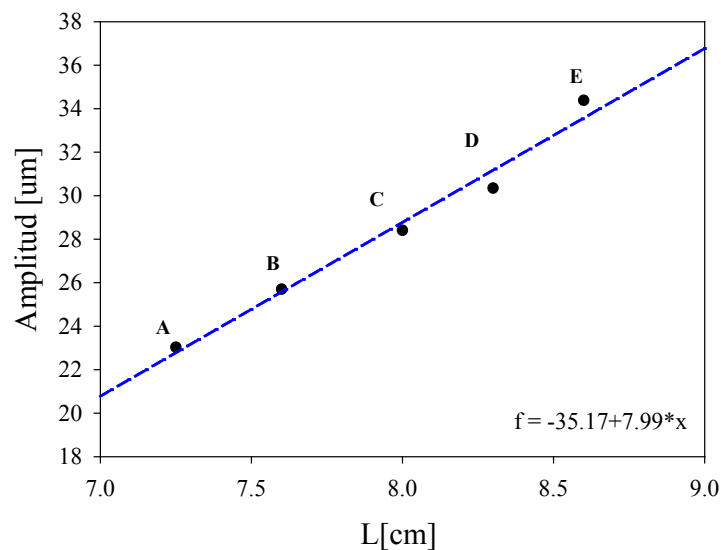


Fig. 3. 13 Flexión del cantiléver



### 3.1.8 Medición de vibraciones en simultáneo con FBG e IF

En la siguiente sección se muestra la utilización del IF para medir vibraciones de manera simultánea con una FBG, con el fin de comparar los resultados obtenidos con ambas técnicas. Se plantearon 3 medidas, donde inicialmente se hizo vibrar el cantiléver a su frecuencia natural. Luego se colocaron diferentes masas sobre el mismo con el objeto de cambiar la frecuencia natural y poder medir vibraciones de distinta frecuencia. En la Fig. 3.14 se muestra el montaje experimental utilizando en simultáneo las dos técnicas ópticas: el IF y las FBGs.

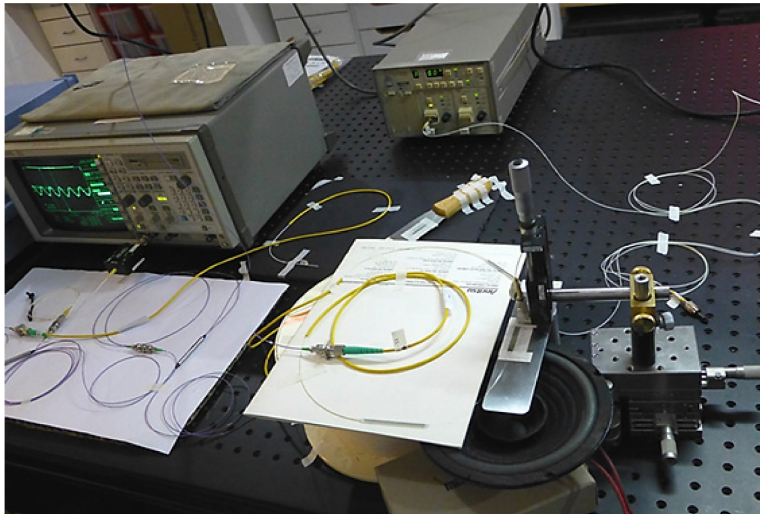


Fig. 3. 14 Montaje experimental en simultáneo con las FBGs y el IF

En la Fig 3.15 se detalla parte de la implementación experimental, donde se muestra la FBG adherida a la chapa de aluminio y el IF implementado mediante un sistema de posicionamiento que garantiza la perpendicularidad de la fibra respecto de la chapa. Además, en la Fig. 3.16 se muestran algunas de las masas colocadas sobre la chapa de aluminio para modificar la frecuencia natural de oscilación.

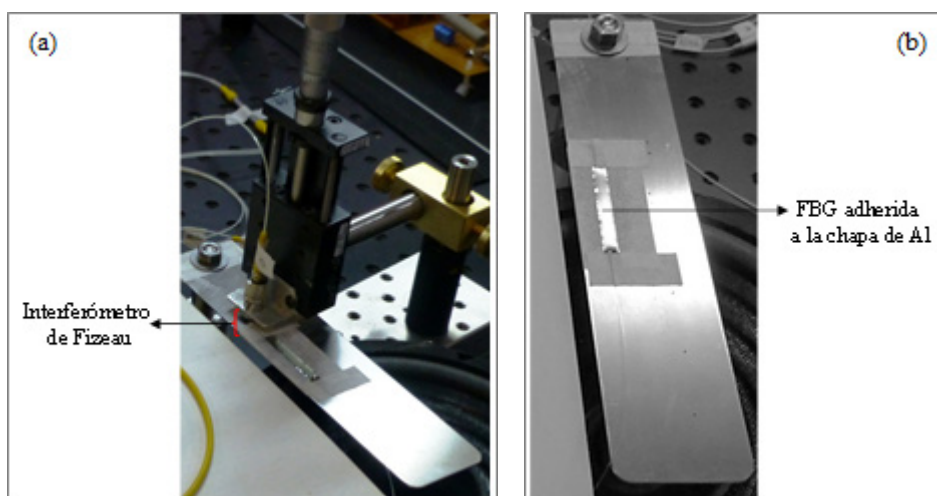


Fig. 3. 15 Detalle de la implementación del IF (a) y de la FBG (b)

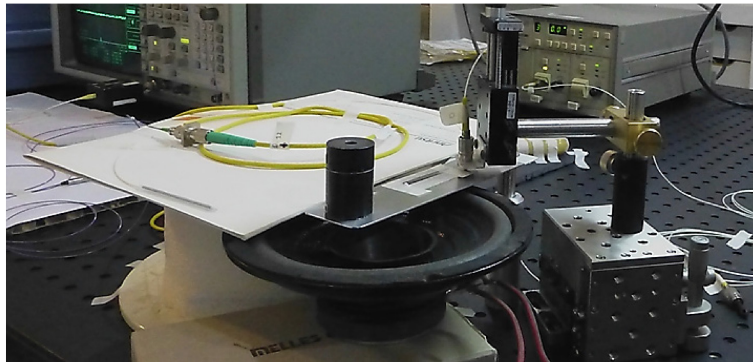


Fig. 3.16 Masas colocadas sobre el cantiláver para variar la frecuencia natural de oscilación

En la Fig. 3.17 se muestran las señales típicas obtenidas al medir vibraciones espectral y temporalmente con una FBG, y en la Fig. 3.18 se muestra la señal temporal típica generada por el IF mientras el cantiláver es sometido a vibración.

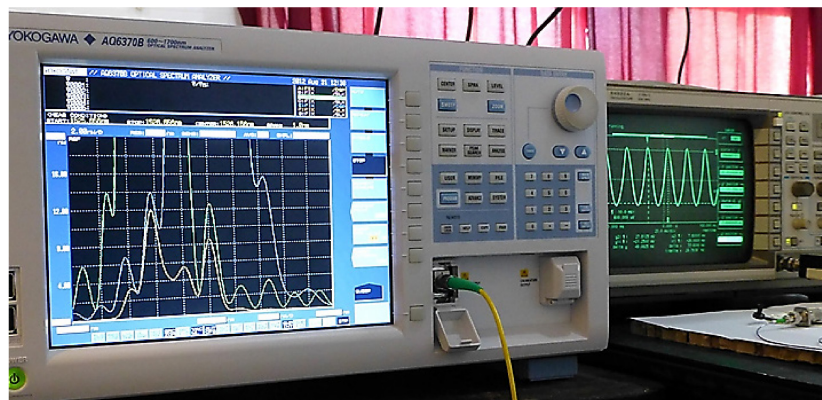


Fig. 3.17 Señal espectral y temporal de una medida de vibración con FBG

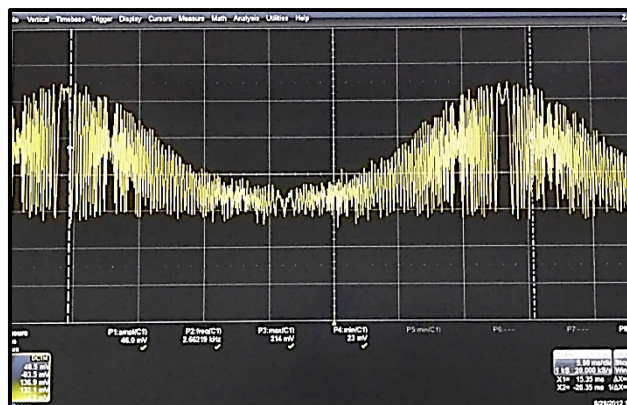


Fig. 3.18 Señal temporal típica del IF al medir vibración

En la Fig. 3.19 se muestran los resultados obtenidos al excitar el parlante con señales de diferente frecuencia, ubicadas en el entorno de la frecuencia de resonancia del cantiláver, que en este caso era de 29.4 Hz. Se dibujan dos trazas, una correspondiente a la medida con el IF y otra al sensor con FBG, observándose una muy buena correspondencia entre ambos

métodos. Además, a la derecha de la figura se muestra como varió la amplitud de la oscilación al acercarse a la frecuencia de resonancia.

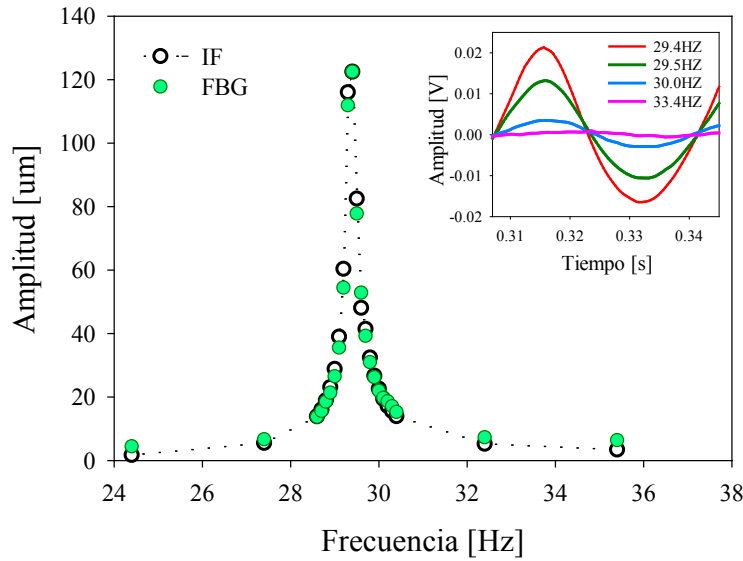


Fig. 3. 19 Amplitud de la vibración medida con FBG e IF para  $f_r=29.4$  Hz

En la Fig. 3.20 se comparan las curvas de resonancia obtenidas para tres medidas realizadas con diferentes cargas colocadas sobre la lámina vibrante. El trazo nombrado como *libre* se refiere a una medida realizada sin carga, el trazo nombrado *Carga I* se refiere a la medida donde la frecuencia de resonancia se varió colocando sobre el cantiléver una masa de 16 gr y finalmente, para el trazo nombrado como *Carga II* se varió la frecuencia de resonancia con una masa de 32 gr. Las frecuencias medidas en cada caso fueron: 29.4 Hz, 21.4 Hz y 15 Hz, respectivamente. Se observa que las respuestas de dichas medidas están relacionadas con la inercia. Se observa que la amplitud de la vibración es menor al aumentar la carga, aunque se haya aplicado la misma amplitud de excitación de entrada al parlante.

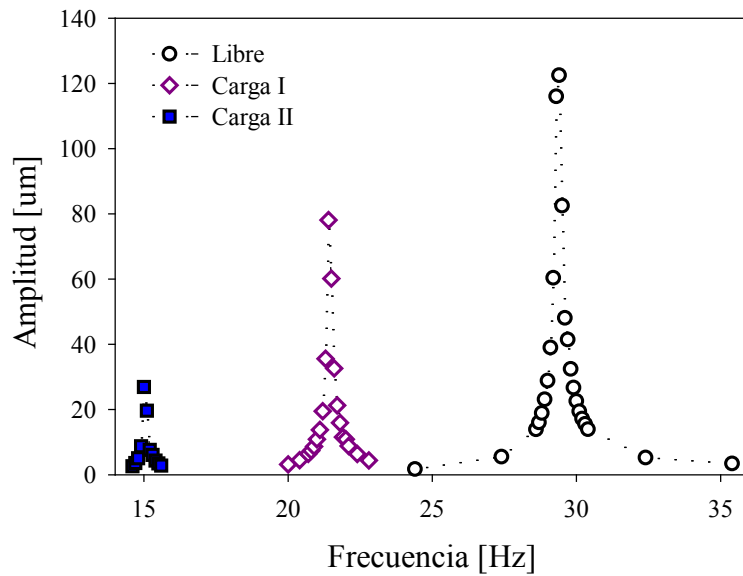


Fig. 3. 20 Curvas de resonancia del cantiléver libre de carga, con Carga I y con Carga II

### *Capítulo 3. Interferómetro Fizeau de fibra óptica*

La precisión sub-micrométrica del interferómetro de Fizeau permite utilizarlo en el estudio de materiales, por ej. para analizar la *vitrificación de resinas foto-curables* a través de un cantiléver embebido en ellas [59]. Este método permite estimar la viscosidad relativa y el grado de vitrificación de dichos materiales poliméricos, ya que su alta resolución permite detectar valores muy bajos de vibración (por lo menos decenas de micras). La técnica implica embeber un extremo de un pequeño voladizo de aluminio sometido a oscilaciones de amplitud constante en mezclas hechas de resinas dentales sin relleno. Cuando inicia el proceso de polimerización, el extremo embebido de la viga deja de ser libre, entonces los cambios en la amplitud de oscilación medidos con el IF se pueden interpretar como un indicador proporcional de solidificación en la resina que se fotocura.

#### *Resumen del Capítulo 3*

En este capítulo, se describen distintos tipos de interferómetros y se hace énfasis en el interferómetro de Fizeau que es el que se utiliza en el desarrollo de esta tesis. Se describe un esquema general de medida y los sistemas de detección temporal y espectral con sus correspondientes condiciones de aplicación. Como ejemplo se implementó un sensor de vibraciones basado en un interferómetro de Fizeau, y se compararon los resultados obtenidos con los que surgen al utilizar un sensor con redes de Bragg. En los capítulos 4 y 5 se utiliza también el IF para el estudio de materiales, particularmente en el capítulo 4 se estudia el curado de resinas dentales y en el capítulo 5 se estudia el fraguado de materiales cementicios.

## Capítulo 4

### *Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

#### 4.0 Introducción

La historia asociada al desarrollo de las resinas compuestas tuvo sus inicios durante la primera mitad del siglo XX. En ese entonces, los únicos materiales que tenían el color del diente y que podían ser empleados como material de restauración estética eran los silicatos. Estos materiales tenían grandes desventajas como el desgaste que sufrían al poco tiempo de ser colocados. A finales de los años 40, las resinas acrílicas de polimetilmetacrilato (PMMA) reemplazaron a los silicatos. Lamentablemente, estas resinas acrílicas presentan baja resistencia al desgaste, contracción de polimerización muy elevada y alto coeficiente de expansión térmico. La era de las resinas modernas empieza en 1962 cuando el Dr. Ray L. Bowen desarrolló un nuevo tipo de resina compuesta. La principal innovación fue la matriz de resina de *Bisfenol-A-Glicidil Metacrilato* (Bis-GMA) y un agente de acoplamiento o silano entre la matriz de resina y las partículas de relleno [15], [60].

Los sensores de fibra óptica como las redes de Bragg y el interferómetro de Fizeau han sido utilizados en diferentes aplicaciones, entre ellas para el estudio del proceso de curado de resinas dentales. Este último se caracteriza por tener una alta resolución de  $0,1 \mu\text{m}$  y un rango de trabajo del orden de  $300 \mu\text{m}$ , mientras que las FBG poseen ventajas como pequeño peso y tamaño, alta sensibilidad, posibilidad de ser embebidas en diversos materiales, monitoreo no destructivo de procesos y estructuras, sensado quasi-distribuido, etc. Estas técnicas han sido descritas en detalle en los Cap. 2 y 3. El interferómetro Fizeau de fibra ha sido utilizado en una configuración temporal para medir la *contracción o shrinkage* generada durante el proceso de polimerización y el *coeficiente de expansión térmica* de compuestos poliméricos. Estos parámetros son especialmente importantes para

el desarrollo de nuevos materiales de uso dental, en particular, la reducción del nivel de contracción de materiales poliméricos compuestos representa un objetivo importante en la investigación de biomateriales [61].

En este trabajo de Tesis se continuó con la aplicación de un esquema tipo Fizeau para monitorizar el proceso de polimerización de resinas utilizadas en restauraciones dentales, pero utilizando un esquema espectral de medición. Se analizó de manera comparativa la información obtenida mediante esta configuración y la originalmente propuesta. La detección simultánea tanto temporal como espectral de la evolución de la señal interferométrica permite reconocer la existencia de procesos térmicos o mecánicos, detectando cualquier cambio en la dirección de movimiento del material (expansión / contracción) o en la velocidad de la reacción química. Como se verá más adelante, ambas técnicas presentadas se complementan perfectamente proporcionando un aspecto importante para la medición: *la medida temporal permite determinar distancias con alta resolución*, mientras que *la medida espectral elimina la ambigüedad de no conocer la dirección del proceso*, así como también proporciona información completa sobre la distancia real al objeto bajo estudio.

Asimismo, se realizaron mediciones del proceso antes mencionado utilizando sensores basados en redes de Bragg embebidas en el material. Los resultados obtenidos permitieron completar la caracterización de estos materiales realizada con el interferómetro Fizeau. Se estudiaron dos resinas compuestas comerciales FILTEK P60 y Z250 de 3M<sup>TM</sup> además de resinas en etapa de desarrollo experimental [56], [61]–[63].

## 4.1 Conceptos previos referidos a las resinas compuestas

Es importante para el estudio del curado de resinas de uso dental conocer su composición, clasificación, mecanismos de polimerización, propiedades de las mismas y el tipo de lámparas que se utilizan para el fotocurado, con el fin de poder evaluar el proceso teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas que intervienen. Por lo tanto, se inicia el capítulo con algunos conceptos básicos sobre los materiales a tratar y posteriormente se procede a describir como se utilizaron las técnicas ópticas para monitorear dicho proceso, el principio físico involucrado y el esquema de medida, seguido de la discusión de los resultados obtenidos.

### 4.1.1 Resinas compuestas para restauraciones dentales

Las resinas compuestas son materiales sintéticos mezclados heterogéneamente formando un compuesto. Las resinas estudiadas son utilizadas en reparación de dentaduras afectadas ya sea por caries, grietas o fracturas. Este tipo de material es un restaurador directo que ha evolucionado en los últimos años en busca de mejoras en sus propiedades estéticas y mecánicas. Las ventajas de estos materiales es que son insolubles, estéticos, biocompatibles, compatibles con sistemas de adhesión a esmalte y dentina y permiten hacer cavidades más conservadoras. La desventaja es que contraen al polimerizarse, lo que debilita su adherencia. Algunas resinas comerciales representativas se mencionan en la Tabla 4.1 y en la Fig. 4.1 se muestra su presentación comercial.



Nombre	Marca
Filtek Supreme	3M ESPE
Filtek Z-350	3M ESPE
Filtek Z-250	3M ESPE
Tetric – Ceram	VIVADENT
Herculite Précis	KERR
Brillant NG	VIVADENT
Polofil Supra	VOCO
Amelogen Plus	ULTRADENT
Alphadent	DENTAL TECHNOLOGIES

Tabla 4. 1 Resinas comerciales más representativas



Fig. 4. 1 Presentación comercial de las resinas compuestas

#### 4.1.2 Composición química de las resinas compuestas

A continuación, se describen los componentes estructurales básicos de las resinas compuestas (Fig. 4.2):

a) **Matriz orgánica de la resina**, está conformada por monómeros (Fig. 4.3) y puede ser: de alto peso molecular como *Bis-GMA* (bisfenol glicidil metacrilato), *UDMA* (dimetacrilato de uretano) o de bajo peso molecular como *TEGDMA* (Dimetacrilato de trietilenglicol) y *EGDMA* (dimetacrilato de etilenglicol).

El monómero de alto peso molecular, tiene una alta viscosidad, lo que vuelve al material difícil de manipular, esto se contrarresta adicionándole monómeros de bajo peso. Una ventaja de los monómeros de mayor peso molecular es que sufren menor contracción de polimerización. El Bis-GMA, es el monómero más utilizado en las resinas actuales, sobre todo por su mínimo nivel de contracción y su estabilidad dimensional [64].

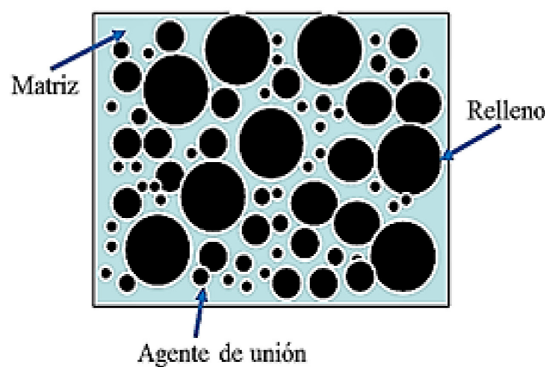


Fig. 4. 2 Estructura de una resina compuesta

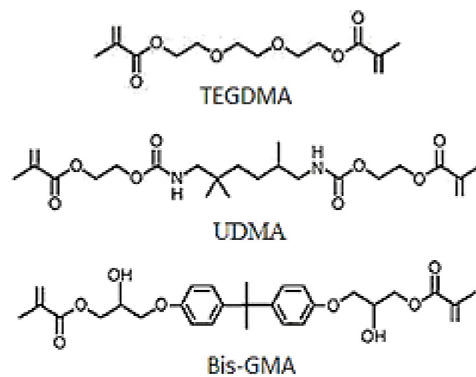


Fig. 4. 3 Monómeros que componen la matriz orgánica

b) **Partículas de relleno**, proporcionan mayor estabilidad dimensional y mejoran sus propiedades, ya que reducen la contracción de polimerización y el coeficiente de expansión térmico, proporcionando un aumento de la resistencia a la tracción, a la compresión,

#### Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

aumentando el módulo de elasticidad. Con la finalidad de reducir la cantidad de matriz orgánica y con ello la contracción de polimerización, se adicionan *partículas inorgánicas* como sílice y partículas de vidrio de bario, estroncio y zirconio. Anteriormente se utilizaban las de cuarzo, pero su uso disminuyó porque son duras y grandes, y no pueden triturarse con facilidad, siendo complicado su pulido, a diferencia de las partículas de sílice que son más pequeñas.

c) **Agente de unión o acoplamiento**, las propiedades óptimas de la resina compuesta, dependen de la formación de una *unión* fuerte entre el *relleno inorgánico y la matriz orgánica*. La unión de estas dos fases se logra recubriendo las partículas de relleno con un *agente de acoplamiento* que tiene características tanto de relleno como de matriz. El agente más utilizado es el *silano* debido a que la mayoría de las resinas compuestas disponibles comercialmente tienen relleno basado en sílice. Mediante el proceso de salinización, la carga inorgánica es capaz de unirse químicamente a la matriz orgánica, haciendo que funcionen como un cuerpo único, logrando transferencia de tensiones entre ellas [15].

d) **Sistema activador**, para que la polimerización ocurra, las resinas fotopolimerizables necesitan de sustancias iniciadoras, que al ser activadas por ondas específicas de luz empiezan el proceso de polimerización. La camforquinona es un agente fotosensible que se emplea comúnmente y que absorbe la luz azul con una longitud de onda comprendida entre 400 y 500 nm.

e) **Inhibidores de la polimerización**, para evitar la polimerización espontánea o accidental de las resinas y por otro lado aumentar su vida útil, se le agregan sustancias inhibidoras o estabilizadoras como la hidroquinona, también para conservar la vida útil del material se utilizan agentes perseverantes.

f) **Pigmentos**, normalmente son cantidades pequeñas de óxidos metálicos que se agregan al material para dar color (matiz, intensidad y opacidad) y estabilizadores para que la armonía óptica se pierda lo menos posible con el tiempo [64].

#### 4.1.3 Algunas propiedades de estos materiales

Algunas de las propiedades de las resinas compuestas se mencionan a continuación [15]:

**Resistencia mecánica:** las resinas compuestas presentan una aceptable resistencia a la compresión, tracción y al desgaste.

**Resistencia a la tensión:** es el módulo de elasticidad que relaciona la presión que recibe el material al tensionarse y la deformación que esto le provoca. Las resinas con menor carga orgánica tienen un módulo de elasticidad mayor, lo que les confiere una rigidez más alta.

**Resistencia térmica:** Ante los cambios térmicos, las resinas no acompañan al esmalte y la dentina, ya que los cambios volumétricos que se producen son mayores.

#### 4.1.4 Mecanismos de polimerización

La *Polimerización*, es la formación de grandes moléculas o macromoléculas a partir de la unión de moléculas pequeñas llamadas monómeros. En otras palabras, es el procedimiento



#### Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

por el que se “endurece” la resina. Existen dos mecanismos de polimerización de resinas de uso dental:

**Resinas Autocurables o de curado químico:** Polimerizan por una reacción química, al mezclar la base con el iniciador (peróxido de benzoilo) y el activador (catalizador – amina terciaria). Son resinas que tienen una contracción de polimerización menor en relación a las fotocurables. Su uso se restringe a restauraciones pequeñas o de difícil acceso [64].

**Resinas Fotopolimerizables o Fotocurables:** se presentan en una sola pasta en la que ya están incluidos el *fotoiniciador* (Camforquinona) y el activador (amina terciaria). Las resinas compuestas necesitan una longitud de onda e intensidad específica para lograr su polimerización. La intensidad de la luz evidencia la cantidad de fotones emitidos por el instrumento. La intensidad de las lámparas fotoactivadoras se mide en  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . La camforquinona se activa si se expone a la luz ultravioleta o luz halógena, que emite una longitud de onda de 400 a 500 nm, produciendo la excitación del fotoiniciador, el cual unido con la amina forma radicales libres [64].

Este tipo de resina es fácilmente manipulable, vienen en una sola pasta, ofrece mayor tiempo de trabajo, pues, no endurece hasta que no se expone a la luz y son más estéticas ya que sus partículas permiten un mejor pulido y brillo.

Es importante controlar que el proceso químico de polimerización se dé completamente en las resinas fotocurables, pues de no ser así se verá afectada la estabilidad cromática y la durabilidad de la restauración. Esto involucra, por un lado, la intensidad de emisión de luz que debe ser por lo menos de  $300 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , y la calidad de luz emitida (longitud de onda) que debe ser entre 400 y 500 nm, siendo lo ideal 480 nm. La contracción de polimerización, es sin duda la causa de muchas investigaciones, que hacen que estos materiales estén en constante mejoramiento, ya que uno de los propósitos es eliminar este fenómeno. Además, el proceso es exotérmico.

**Contracción de Polimerización:** la contracción de polimerización es el mayor inconveniente de estos materiales de restauración. Las moléculas de la matriz de una resina compuesta (monómeros) se encuentran separadas antes de polimerizar por una distancia promedio de 4 nm. Al polimerizar y establecer uniones covalentes entre sí, esa distancia se reduce a 1.5 nm. Ese "acercamiento" o reordenamiento espacial de los monómeros (polímeros) provoca la reducción volumétrica del material.

#### 4.1.5 Breve descripción de las resinas comerciales estudiadas

Las resinas compuestas comerciales *Filtek™* P60 y Z250 son diseñadas para utilizarse en restauraciones anteriores, posteriores o ambas. En el sector anterior, están los dientes cuya funcionalidad es estética y en el sector posterior están los dientes que satisfacen los requisitos masticatorios (Fig. 4.4).

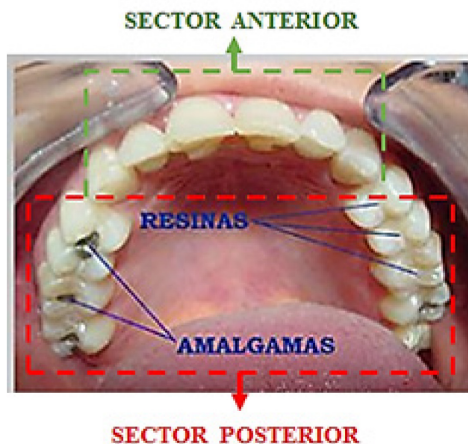


Fig. 4. 4 Dientes anteriores y posteriores

**Resina comercial Filtek™ P60 de 3M™**, es una resina estética fotopolimerizable, radiopaca (se opone al paso de rayos x) diseñada específicamente para utilizarse en restauraciones posteriores. La adhesión a la estructura dental se logra al utilizar un sistema adhesivo dental, como por ejemplo 3M™ Single Bond o 3M™ Scotchbond™ Multi-Purpose.

La resina P60 es empacada en jeringas (multi-dosis) y se encuentra disponible en tres tonos (A3, B2 y C2). El material se coloca en incrementos y se polimeriza en la cavidad, el incremento debe tener un grosor máximo de 2.5mm y cada capa deberá ser polimerizada en 20 segundos. Este tipo de resina está compuesto de 3 componentes principales que son: TEGDMA el cual ha sido remplazado en su mayor parte por una mezcla de UDMA y Bis-EMA (nombres completos en Tabla 4.2) [65].

**Resina comercial Filtek™ Z250 de 3M™**, es una resina compuesta radiopaca, activada por luz visible. Está diseñada para su uso en restauraciones anteriores y posteriores. El material de relleno es zirconio/sílice. El material restaurador Filtek Z250 contiene las resinas BIS-GMA, UDMA y BIS-EMA (ver Tabla 4.2). Se utiliza un adhesivo dental de 3M para adhesión permanente de la restauración a la estructura dental. El restaurador viene empacado en jeringas tradicionales y cápsulas de dosis única y se encuentra disponible en 15 tonos que corresponden al sistema de tonos (A1, A2, A3, A3.5, A4, B1, B2, B3, C2, C3, C4, D3, I, B0.5, C0.5) utilizados comúnmente [66].

Las resinas Z250 y P60 poseen un *mayor peso molecular* y por lo tanto poseen menor cantidad de enlaces dobles por unidad de peso. Los materiales de alto peso molecular también poseen un impacto en la medición de viscosidad. A *mayor peso molecular* de la resina se obtiene como resultado *menor contracción*, reducción en el envejecimiento de la resina y una matriz de resina ligeramente más suave.

En las Fig. 4.5 y Fig. 4.6 se muestran imágenes tomadas con MEB (microscopía electrónica de barrido) del corte transversal de resinas compuestas. La muestra está aumentada 2500X. A pesar del aumento, las partículas de relleno más pequeñas no son visibles. La distribución del *tamaño de las partículas* del restaurador Z250 y P60 es de 0.01 a 3.5  $\mu\text{m}$ . El tamaño promedio de las partículas es de 0.6  $\mu\text{m}$  [66].

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

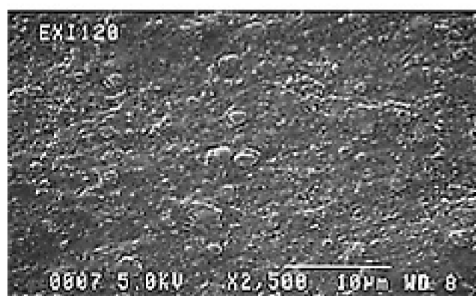


Fig. 4. 5 Resina Filtek P60

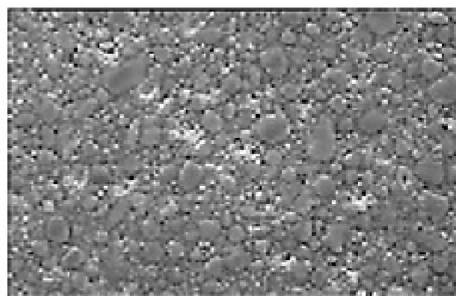


Fig. 4. 6 Resina Filtek Z250

En la Tabla 4.2 se muestran las resinas empleadas para estudiar su proceso de polimerización en el desarrollo de la tesis.

<i>Tipo de resina</i>	<i>Nombre</i>	<i>Composición</i>
Resina experimental	MDQ1	BisTeg 70:30 1% p/p CQ (camforquinona-fotoiniciador), 1% p/p TMA(tetramelanina)
	MDQ2	UDMA (dimetacrilato de uretano) 1% p/p CQ, 1% p/p EGDMA (dimetacrilato de etilenglicol)
Resina comercial	Z250 XT de 3M	BIS-GMA, UDMA y BIS-EMA
	P60 XT de 3M	TEGDMA (Dimetacrilato de trietilenglicol). UDMA (uretano dimetacrilato) y Bis-EMA (Bisfenol a polietelin glicol dieter dimetacrilato).

Tabla 4. 2 Resinas en estudio

#### 4.1.6 Fuentes ópticas empleadas en el fotocurado de las resinas estudiadas

Las resinas compuestas necesitan una longitud de onda e intensidad específica para lograr su polimerización. La intensidad de la luz evidencia la cantidad de fotones emitidos por el instrumento [64]. Las fuentes más comunes utilizadas en el curado de resinas son: las lámparas halógenas o por arco de plasma, el láser de argón y los LEDs.

**Lámparas halógenas**, emiten luz con *longitud de onda entre 400 y 500 nm*, están compuestas de un bombillo de cuarzo con un filamento de tungsteno que irradia tanto luz blanca como luz ultravioleta, un gas halógeno y un filtro que dé paso a las longitudes de onda que se encuentran en el rango *azul-violeta*. Necesitan ventilación para disipar el calor que generan. Las convencionales tienen una intensidad de luz entre 600 - 800 mW/cm<sup>2</sup> y requieren de 20 a 40 s de exposición por cada incremento de material.

**Lámparas de fotopolimerización por arco de plasma**, el espectro de luz emitida es restringido, el pico de energía se concentra cerca de 470 nm, sin emisión por debajo de 440 nm. Este tipo de lámparas tuvo un éxito transitorio debido a la elevada potencia, más de 1.200 mW/cm<sup>2</sup>, obliga a una polimerización muy rápida, a menudo no más de 10s,

*Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

obteniendo propiedades mecánicas poco satisfactorias del material, además de generación de calor.

**Láseres de argón**, son muy potentes y al igual que las lámparas de plasma permiten menor tiempo de exposición del material, aunque los láseres son de mayor costo. Emiten radiaciones electromagnéticas en frecuencias discretas entre los 458 y 514 nm. Su uso inadecuado puede afectar los tejidos próximos especialmente la pulpa del diente.

**LEDs**, emiten luz con longitud de onda entre 415 y 500 nm, similares a la lámpara halógena, pero requieren menos cantidad de energía. Utilizan diodos de larga duración en lugar de filamento y gas halógeno. Actualmente son la mejor alternativa, principalmente por su potencia de polimerización y porque no generan calor [64].

## 4.2 Sistema experimental para el curado de resinas fotocurables

### 4.2.1 Características de la fuente de luz utilizada para el curado de las resinas estudiadas

Para el fotocurado de las resinas dentales empleadas en el estudio, se utilizó como fuente de iluminación un LED con emisión centrada en 470 nm (azul), cuyas dimensiones se muestran en la Fig. 4.7. Este LED utiliza como fuente de alimentación una fuente de corriente controlada por tensión. Las características más relevantes del LED empleado se resumen en la Tabla 4.3 [67], y en la Fig. 4.8 se ilustra su espectro de emisión.

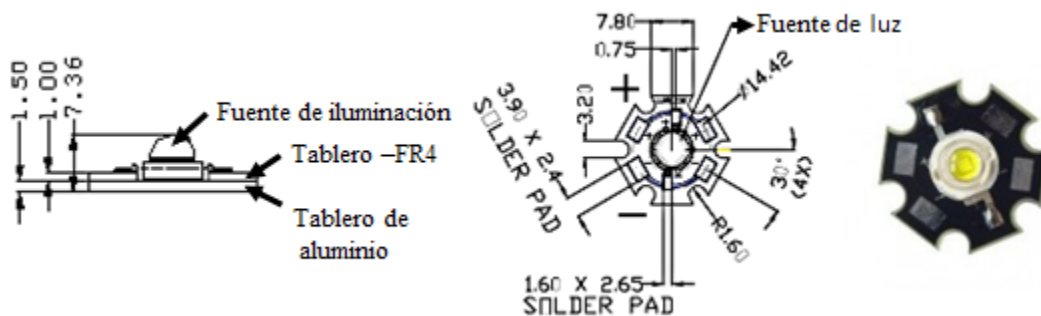


Fig. 4. 7 Dimensiones del LED – 470nm

LED Azul 470nm (LXHL-LB3C) I <sub>max</sub> ~1A				
Mínimo flujo luminoso $\phi_V$ (mV)	Rango $\lambda$ [nm]			$\Delta\lambda$ (1/2 int. Pico)
	Mínimo	Típico	Máximo	
A 700mA / 13.9	460	470	490	0.04
A 1000mA /30				

Tabla 4. 3 Características del LED de curado

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

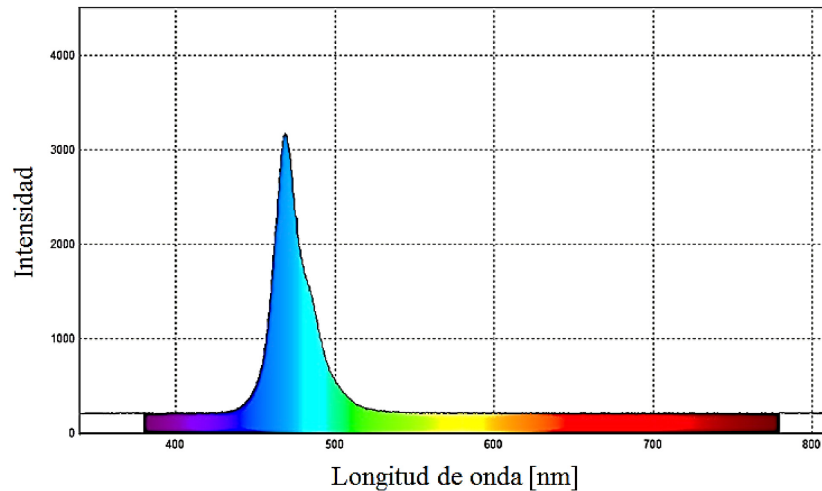


Fig. 4. 8 Espectro del LED empleado para el curado

Para medir la potencia óptica emitida por el LED de curado se empleó el esquema que se ilustra en la Fig. 4.9, que incluye un radiómetro (Láser probe - Model CTX-515) en conjunción con un detector de silicio (Model RSP-595). El LED fue excitado con diferentes corrientes (alrededor de los valores usados en los experimentos de curado). El chopper se conectó con un cable coaxial al radiómetro, para que este hiciese la medición ya que este otorga la señal de referencia para el radiómetro.

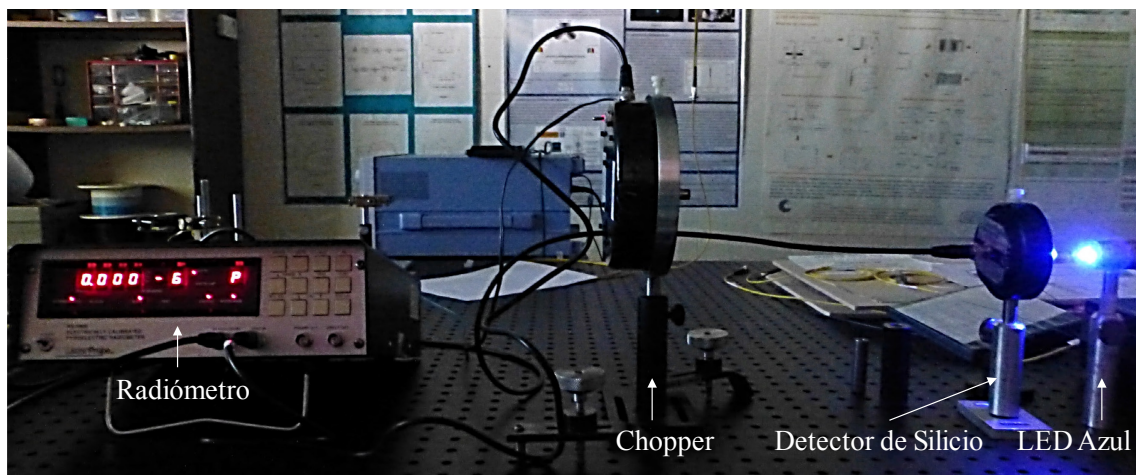


Fig. 4. 9 Esquema utilizado para medir la potencia óptica del LED de 470nm

Según la hoja de datos del radiómetro, para que la respuesta sea lineal la medida debe estar por debajo de 1mW, entonces se busca una distancia apropiada entre el detector y el LED para cumplir esta condición, la cual resultó de unos 5 o 6 mm aproximadamente. En la Fig. 4.10 se muestra la respuesta en potencia del LED, cuya tendencia es lineal.

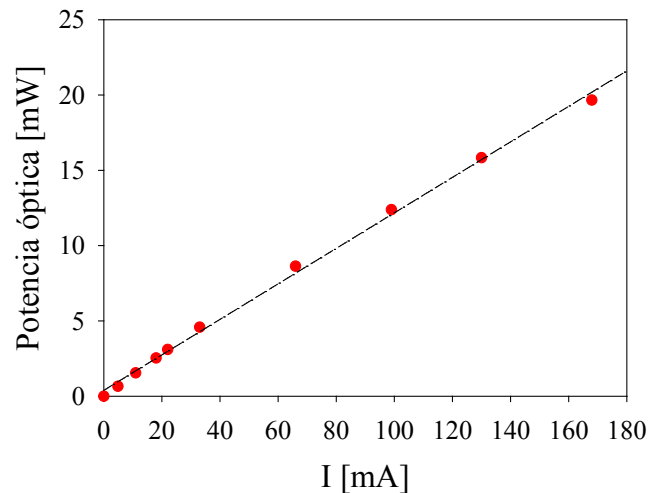


Fig. 4. 10 Curva de potencia del LED de curado

#### 4.2.2 Monitorización de la temperatura en el material durante el curado

Como el proceso de curado de resinas se genera a partir de una reacción exotérmica, es necesario estudiar la variación de temperatura que ocurre en dicho proceso. Para ello se utiliza una termocupla tipo T (Cobre/Niquel) introducida en el material. El esquema de monitoreo de temperatura se ilustra en la Fig. 4.11 y consta básicamente de un adquisidor de datos (HP34970A) que cuenta con un módulo (16 Channel Multiplexer – 34902A) en el cual se conecta la termocupla, y a través de una interfaz GPIB se comunica con una PC, mediante la cual se controla la adquisición.

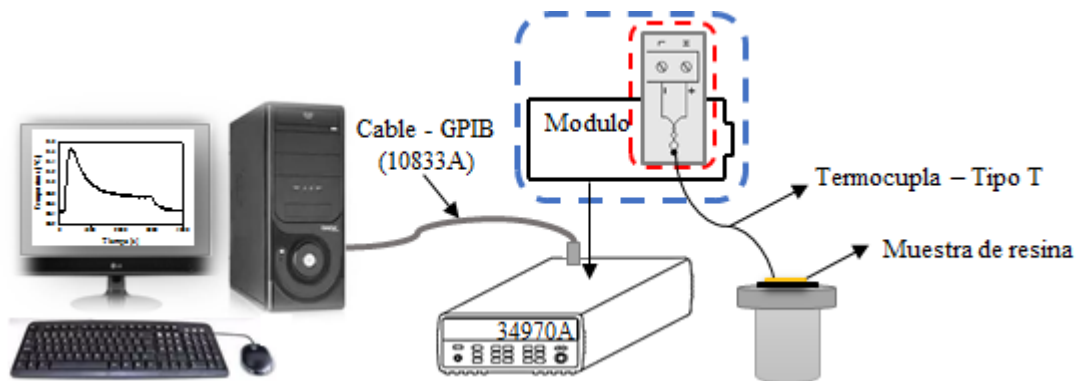


Fig. 4. 11 Esquema de monitoreo de temperatura durante el curado de la resina

Es importante aclarar que, la medida de temperatura durante el proceso de curado también podría efectuarse con una segunda FBG embebida en el material, pero colocada por ej. dentro de un capilar de modo que sólo experimente los cambios de temperatura y no esté sometida a deformación o tensión mecánica. En algunos de los experimentos realizados se utilizó esta opción además de la termocupla, y se verificó una total coincidencia en la medida de temperatura por ambos métodos, por lo que se decidió continuar utilizando la termocupla para simplificar el montaje del experimento.



### 4.2.3 Implementación de técnicas ópticas para sensado de deformación

Por las ventajas que ofrecen las redes de Bragg y el interferómetro de Fizeau para el monitoreo del nivel de expansión o contracción experimentado por un material, se utilizan estas dos técnicas para el estudio del proceso de curado de resinas dentales, ya sean comerciales o en etapa de desarrollo experimental. Por un lado las FBGs permiten ser embebidas sin afectar la composición química del material ni sus características y por otro lado, el interferómetro de Fizeau ofrece la ventaja de ser una técnica no contactante con una precisión sub-micrométrica (de aproximadamente  $0.1 \mu\text{m}$ ). Además, el IF brinda la posibilidad de implementar simultáneamente tanto una medida espectral como temporal, siendo ambas medidas complementarias en cuanto a la información que brindan del comportamiento del material.

#### 4.2.3.1 Redes de Bragg para monitorear el curado de resinas dentales

El esquema de medida con una red de Bragg embebida en una muestra de resina se ilustra en la Fig. 4.12 y Fig. 4.13, donde uno de los extremos de la red es conectado a un sistema de interrogación de redes (*Micron- Optics*) donde se mide su respuesta por reflexión. También se coloca una termocupla *tipo T* para registrar los cambios de temperatura, cuya adquisición se detalló en la Fig. 4.11. Para el curado de la resina se utiliza como fuente de iluminación un LED de 470 nm descrito en la sección 4.2.1. Dado que estos materiales poliméricos alcanzan un nivel de solidificación suficiente en tiempos menores a los de contracción, es factible utilizar una red de Bragg inmersa en el material para estudiar el comportamiento del mismo durante el curado. El principio de operación de una FBG como sensor se describe con más detalle en el Cap. 2.

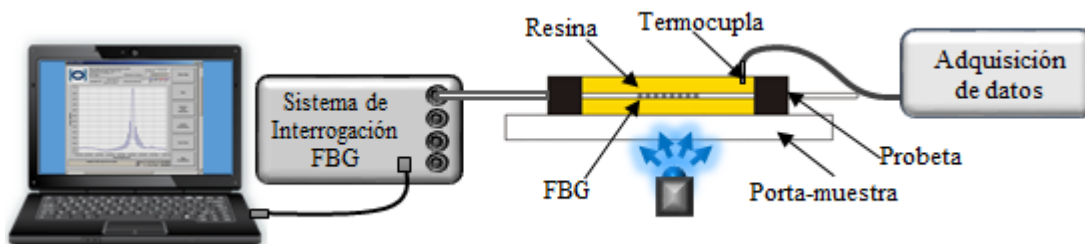


Fig. 4. 12 Esquema de medida de deformación con una FBG embebida



Fig. 4.13 Montaje experimental para medir deformación con una FBG embebida

#### ***Análisis de la respuesta de la señal espectral obtenida con una FBG***

A partir de la Ec. 2.50 del Cap. 2, es posible obtener la tensión mecánica o deformación ( $\Delta\varepsilon$ ) experimentada por un material y por la red de Bragg embebida en él, de la siguiente manera:

$$\Delta\varepsilon [\mu\varepsilon] = \left[ \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} - S_\varepsilon \Delta\varepsilon_T - S_T \Delta T \right] \frac{1}{S_\varepsilon} \quad (4.1)$$

Aquí debe recordarse la expresión  $\Delta\varepsilon_T = (\alpha_{\text{mat}} - \alpha_F)\Delta T$ , que describe la transferencia de strain térmicamente inducido desde la estructura huésped (resina en este caso) a la fibra, debido al diferente coeficiente de expansión térmica de ambos materiales. En los cálculos se consideró  $\alpha_{\text{mat}} = 500 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (coeficiente de dilatación de la resina).

Por último, para calcular la deformación absoluta y relativa de la resina es necesario retomar las Ecs. 2.52 y 2.53 del Cap. 2, de donde surge:

$$\Delta L_{FBG\_abs} [\mu m] = \Delta\varepsilon [\mu\varepsilon] L_{0r} [\mu m] \quad (4.2)$$

$$\Delta L_{FBG\_rel} [\%] = \frac{\Delta L_{FBG\_abs}}{L_{0r}} \times 100 \quad (4.3)$$

El cambio en la longitud de onda de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) de la red sensora es fundamentalmente debido a la deformación (contracción) que se produce durante la polimerización de la resina y en la Fig. 4.14 se muestra un ejemplo de dicha evolución. En esta figura se muestra una señal espectral típica obtenida durante el curado de una resina experimental BIS-GMA monitoreada con una red de Bragg. La misma corresponde al cambio experimentado por la longitud de onda de máxima reflexión de la red, debido a todos los efectos presentes durante el curado. Se observa un incremento inicial de la  $\lambda_B$  originado por el incremento de



## Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

temperatura causado por la reacción química exotérmica (recordar que la FBG es sensible a variaciones de temperatura, además de a deformaciones mecánicas), hasta que a partir de cierto momento (y ya habiéndose adherido la resina a la fibra) la contracción causada por el proceso de polimerización prevalece sobre el efecto anterior y la longitud de onda de Bragg comienza a disminuir.

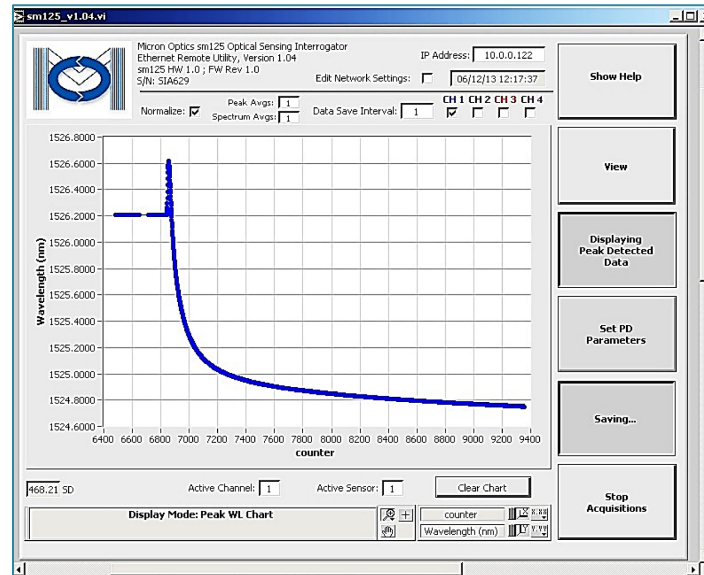


Fig. 4. 14 Evolución de la longitud de onda de Bragg durante el curado de una resina BIS-GMA

### 4.2.3.2 Interferómetro de Fizeau para monitorear el curado de resinas dentales

Como se mencionó en el Capítulo 3, el IF tiene la posibilidad de implementar la medida tanto con una configuración temporal como espectral, o ambas en simultáneo. A continuación, se describirá su aplicación al estudio del proceso de fotocurado de resinas compuestas.

#### 4.2.3.2.1 Configuración del IF para una medida temporal

De acuerdo al principio de funcionamiento del interferómetro de Fizeau como sensor discutido previamente, la contracción de las resinas se mide a partir de la variación de la longitud de la cavidad interferente formada entre el extremo del conector de fibra óptica y la superficie libre del material. Para mejorar la reflectividad de la misma, se coloca una delgada lámina de aluminio sobre la resina. Las muestras son irradiadas desde abajo con una fuente apropiada para que ocurra el proceso de polimerización, en este caso, un LED de alta potencia centrado en 470 nm. El esquema de medida se muestra en la Fig. 4.15. En él se utiliza un acoplador  $2 \times 1$  para iluminar la muestra mediante una fuente de luz monocromática (láser de 1310nm) y recoger la señal interferométrica proveniente de la cavidad. Ésta es enviada a un detector óptico (de InGaAs) que a su vez se conecta en el osciloscopio, en donde se adquiere la señal temporal que describe la evolución del espesor de las muestras a medida que son fotocuradas con el LED de 470 nm.

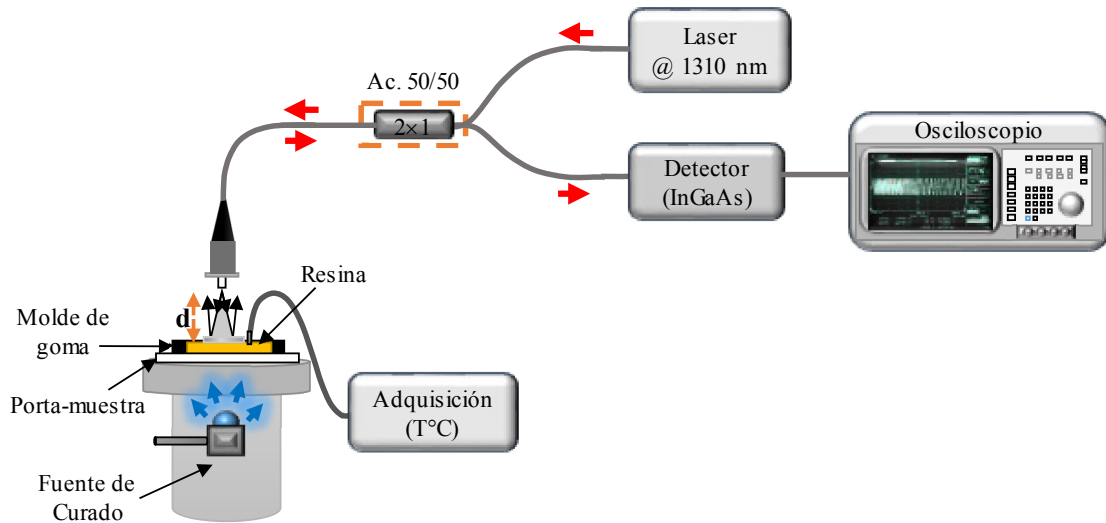


Fig. 4. 15 Esquema de medida temporal de deformación con el IF

#### 4.2.3.2.2 Configuración del IF para una medida espectral

En el caso de la medida espectral (Fig. 4.16 y 4.17), para generar la señal interferométrica se utiliza una fuente luminosa de banda ancha (SLED) emitiendo con una longitud de onda central en 800 nm y un ancho de banda de 100 nm. Nuevamente se usa un acoplador monomodo ( $2 \times 1$ ) 50/50, que permite iluminar la cavidad y derivar la señal proveniente del interferómetro a un espectrómetro (Ocean Optics) cuya adquisición de datos es realizada a través de una PC.

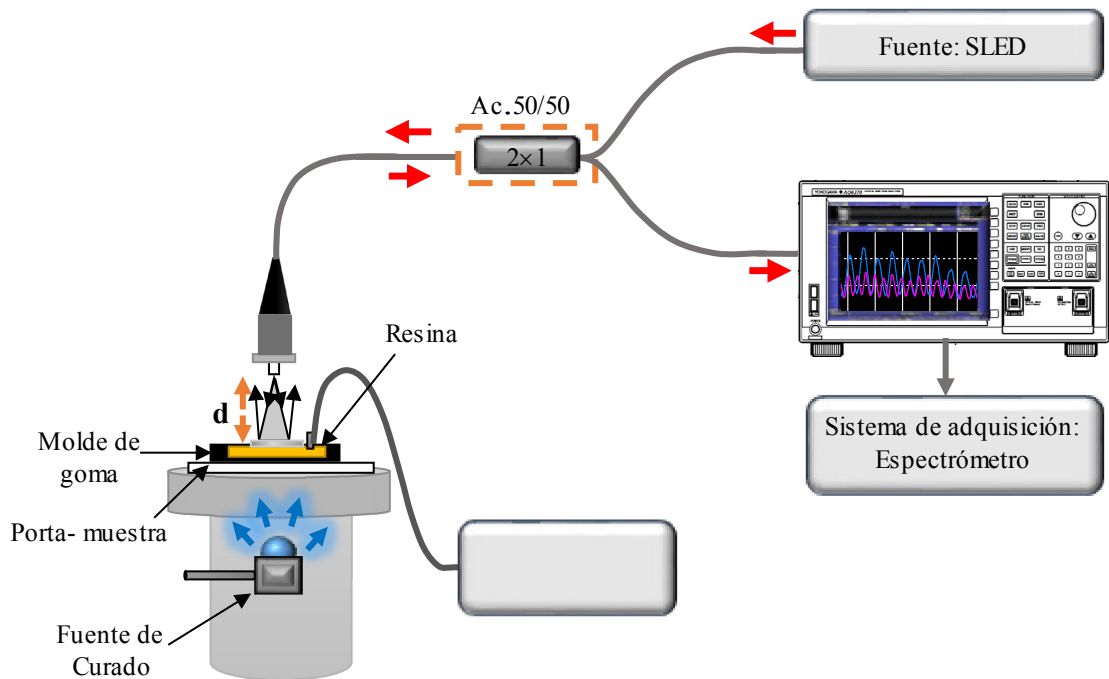


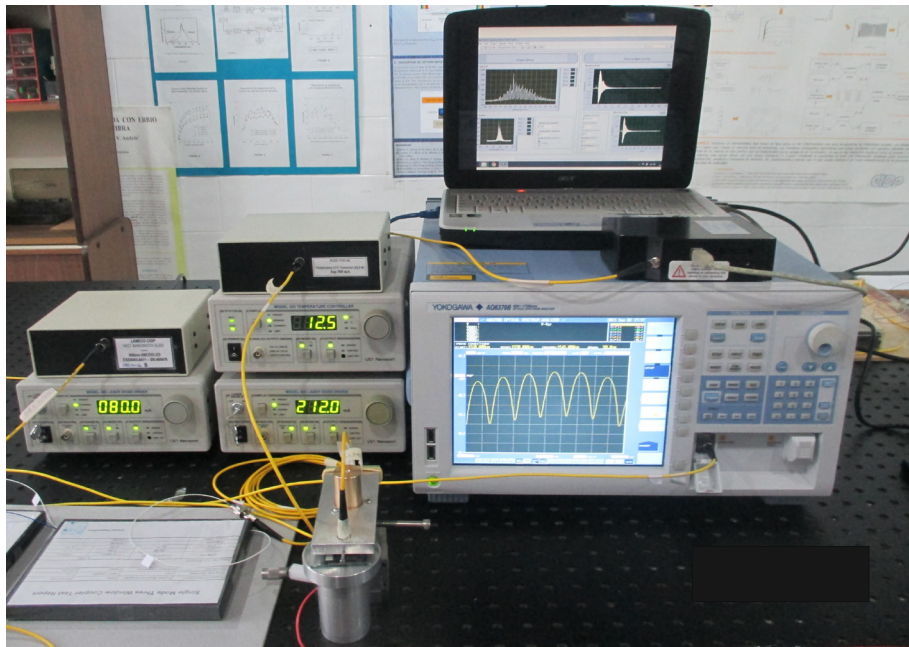
Fig. 4. 16 Esquema de medida espectral de deformación con el IF

Otra alternativa para implementar la medida espectral, es utilizar una fuente de banda ancha SLED centrada en 1550 nm y a través del acoplador derivar la señal a un analizador de

#### *Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

espectros ópticos – OSA, ya que el espectrómetro antes mencionado no cubre el rango espectral de esta fuente luminosa. Ambas opciones son equivalentes. Las ventajas de utilizar el OSA básicamente son que este equipo tiene mayor resolución y rango en longitud de onda (400-1600), pero tiene más alto costo.

En la Fig. 4.17 se observan ambos montajes experimentales empleados para la medida espectral. Por un lado, se muestra la utilización del analizador espectral (OSA, marca Yokogawa, modelo AQ6370B) como sistema de detección, en conjunción con un SLED de 1550 nm y los correspondientes drivers. Por otro lado, se tiene el espectrómetro Ocean Optics (High Resolution Spectrometer – HR4000) para la detección y el SLED en 800 nm para la iluminación de la cavidad.



*Fig. 4. 17 Montaje experimental de la medida espectral con el IF, utilizando el analizador espectral o el espectrómetro*

#### *4.2.3.2.3 Configuración del interferómetro de Fizeau para una medida simultánea temporal y espectral*

El interferómetro Fizeau de fibra óptica es utilizado para obtener, sin ambigüedades, los cambios dimensionales que ocurren durante el proceso de solidificación de polímeros fotocurables. La determinación simultánea tanto de la evolución temporal como espectral, permite determinar cualquier cambio de dirección del proceso (de expansión a contracción, o viceversa), así como la condición inicial. El esquema global de la medida simultánea espectral y temporal con el IF se muestra en la Fig. 4.18 y su implementación experimental en la Fig. 4.19.

En este caso es necesario iluminar simultáneamente la cavidad interferométrica con dos fuentes luminosas: una fuente monocromática para la detección temporal (el láser de 1310nm) y una fuente de banda ancha para la detección espectral (el SLED de 1550 nm o el de 800 nm). Para ello se utiliza un acoplador selectivo en longitud de onda (WDM – Wavelength Division Multiplexer) que es un dispositivo de 3 puertos capaz de combinar

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

ambas señales como se esquematiza en la Fig. 4.20, y cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 4.4.

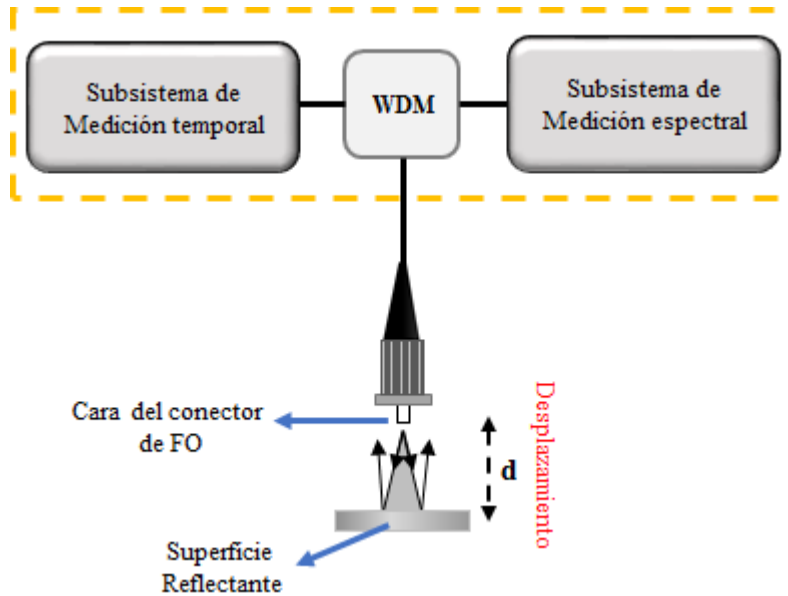


Fig. 4. 18 Esquema global del sistema de medida temporal y espectral con el IF

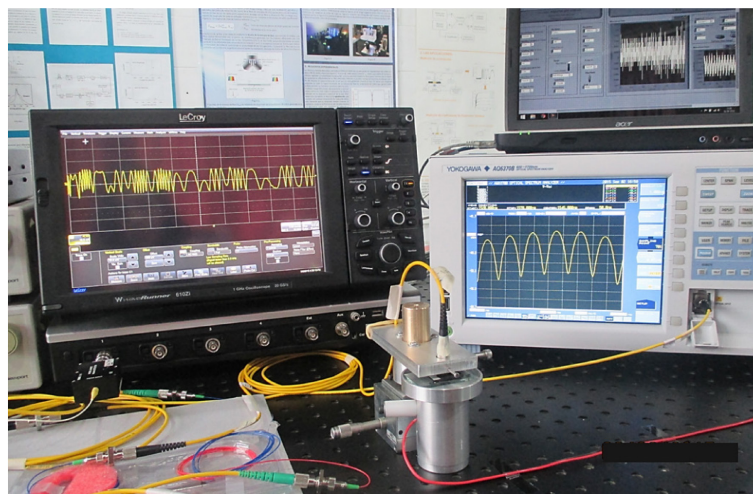


Fig. 4. 19 Montaje experimental del sistema de medida temporal y espectral con el IF

Acoplador 1310/1550 nm de ventana dual 1×2 50/50:

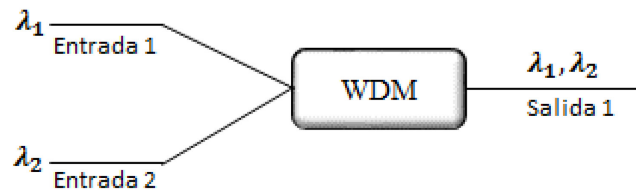


Fig. 4. 20 Configuración WDM

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

<b>Código del producto</b>	<b>W-NS-AL-XX-1-1210-35-AP/AP</b>
Número Serial	07031288
Tipo de Fibra	Mono-Modo
Rango de longitud de onda ( $\lambda_1/\lambda_2$ )(nm)	Rojo:1310/Azul:1550
Pérdidas de Inserción ( $\lambda_1/\lambda_2$ )(dB)	0.06 dB/0.08 dB
Pérdidas de Inserción (Sobre el ancho de banda específico) (dB)	--
Aislamiento (longitud de onda central) (dB)	30.54 dB
Aislamiento (Sobre el ancho de banda específico) (dB)	--
Ancho de Banda (nm)	$\pm 20$ nm
Directividad (dB)	50 dB
Pérdidas dependientes de la polarización (dB)	<0.1 dB
Estabilidad térmica (dB)	<0.2 dB
P/N: WD202B-APC	

Tabla 4. 4 Especificaciones técnicas del acoplador WDM 1310/1550 nm

4.2.3.2.4 Análisis de la respuesta de la señal temporal obtenida con el interferómetro de Fizeau

En la Fig. 4.21 se observa un ejemplo de una señal temporal obtenida a partir de la medición del curado de la resina. La señal presenta máximos y mínimos alternados, cuya aparición temporal (considerando un máx. y el min. consecutivo) se corresponde con una variación de la longitud de la cavidad formada entre la fibra y la resina igual a un cuarto de la longitud de onda coherente empleada. En esta figura se puede apreciar como inicialmente las franjas pasan de tener un periodo de oscilación menor a uno mayor a medida que transcurre el tiempo de curado, lo que indica que disminuye la velocidad de cambio de la longitud de la cavidad o el ritmo de contracción de la resina a medida que la polimerización se va completando.

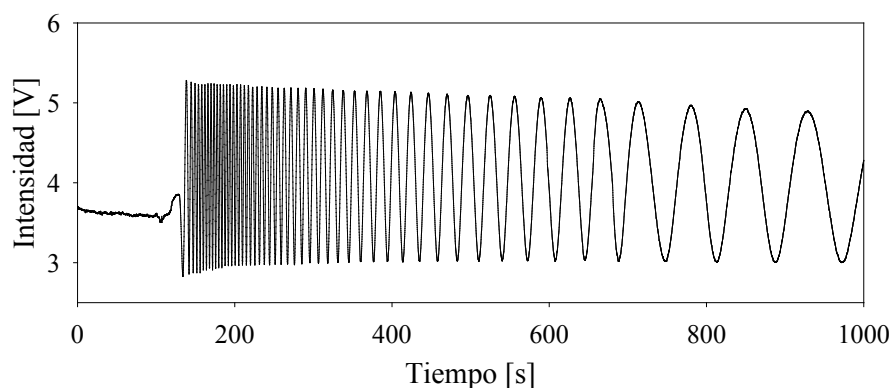


Fig. 4. 21 Medida temporal obtenida con IF

En la Fig. 4.22 se ilustra en detalle el comienzo de la oscilación de la señal a partir del momento de encendido del LED (LED-ON). Posteriormente se describe el cálculo realizado para obtener la contracción absoluta y relativa del material a partir de esa señal.



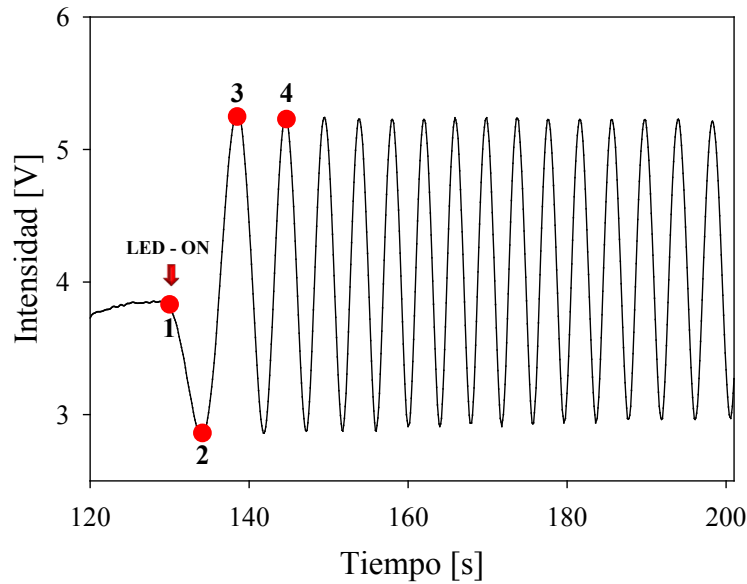


Fig. 4. 22 Ampliación de la señal temporal de la Fig. 4.21 en el comienzo del curado

Para calcular la deformación absoluta del material, hay que considerar que en el tiempo en el que la señal detectada pasa de un máximo (o de un mínimo) al inmediato siguiente (por ej. del punto 3 al 4 en la Fig. 4.22), la distancia entre la resina y el extremo de la fibra cambia en un valor igual a  $\lambda/2$  ( $\lambda/2 \approx 0.655 \mu\text{m}$  para el láser de semiconductor empleado, con emisión en 1310 nm).

Teniendo esto en mente, es posible calcular y representar gráficamente el **cambio de longitud de la cavidad** o lo que es equivalente, la **deformación absoluta del material** ( $\Delta L_{abs}$ ) (contracción en este caso) a medida que transcurre el tiempo de curado. Para ello se utiliza la escala temporal de la señal oscilatoria, y los valores de contracción se calculan adicionando  $\lambda/2$  ( $0.655 \mu\text{m}$ ) cada vez que se pasa de un punto al homólogo siguiente (es decir, de un máximo a otro, o de un mínimo a otro). Al encender la fuente de luz de curado, el nivel permanente de la señal puede ser cualquiera comprendido entre un máximo y un mínimo, y dependerá de la distancia relativa de la cavidad. Para computar el valor de contracción experimentado desde el inicio del curado, debe calcularse qué proporción de longitud de onda corresponde al pasaje desde el punto inicial al primer punto extremo (máximo o mínimo) (del punto 1 al 2 en la Fig. 4.22). Para plantear la proporción se tendrán en cuenta los valores de intensidad correspondientes a los puntos involucrados, resultando en este ejemplo una contracción absoluta de  $0.14 \mu\text{m}$  hasta el instante correspondiente al punto 2. A partir de allí, se adicionan los incrementos antes mencionados ( $\lambda/4$  hasta el punto 3, y  $\lambda/2$  entre los máximos subsiguientes). En la Tabla 4.5 se resumen los valores calculados para estos primeros puntos de la señal.

Posiciones Fig.4.22	Tiempo [s]	$\Delta L_{abs}$ [ $\mu\text{m}$ ]	Indicación para el cálculo
1	129	0	LED-ON
2	134.1	0.14	$\Delta L_{x_1}$
3	138.5	0.46	$\Delta L_{x_1} + \lambda/4$
4	144.6	1.12	$\Delta L_{x_1} + \lambda/4 + \lambda/2$

Tabla 4. 5 Detalle del cálculo la deformación absoluta

En la Fig. 4.23 se muestra el resultado del procesamiento de la señal interferométrica de la Fig. 4.22, obteniéndose la curva de contracción absoluta de la resina analizada.

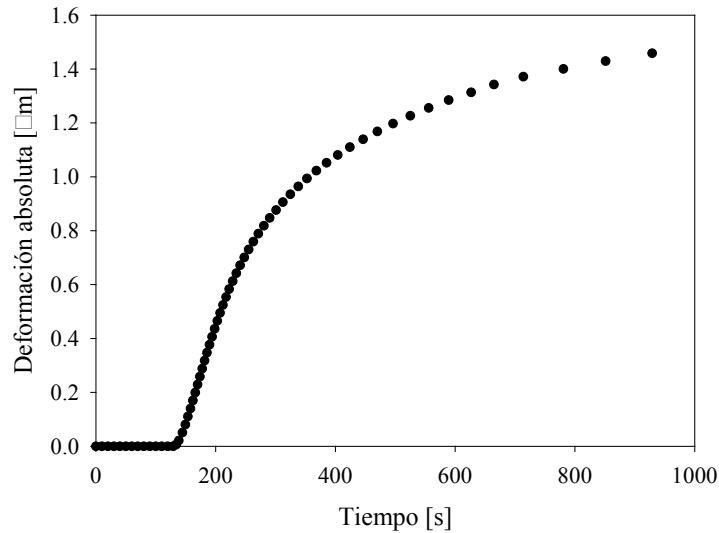


Fig. 4. 23 Curva de contracción de una resina dental, obtenida a partir del procesamiento de la señal temporal del IF

En la Fig. 4.24 se esquematiza la muestra inicial de resina y en líneas de trazos sus dimensionales finales, luego de la contracción experimentada por efecto del curado. También se indican los parámetros que se consideran para analizar el proceso de contracción de la resina:  $\Delta L_{abs}$  es la deformación absoluta del material,  $e_i$  es el espesor inicial de la muestra y  $e_f$  es el espesor final de la misma luego del curado,  $d_i$  y  $d_f$  son las longitudes inicial y final de la cavidad interferométrica, respectivamente.

A partir del valor de contracción absoluta al final del proceso de curado, obtenido del análisis de la señal temporal, es posible calcular la contracción relativa porcentual del material de la siguiente manera:

$$\Delta L_{rel\ IF\ temp} [\%] = \frac{\Delta L_{abs}}{e_i} \times 100 = \frac{\Delta L_{abs}}{e_f + \Delta L_{abs}} \times 100 \quad (4.4)$$

donde el espesor  $e_f$  de la muestra se medirá por ej. con un micrómetro al finalizar el curado

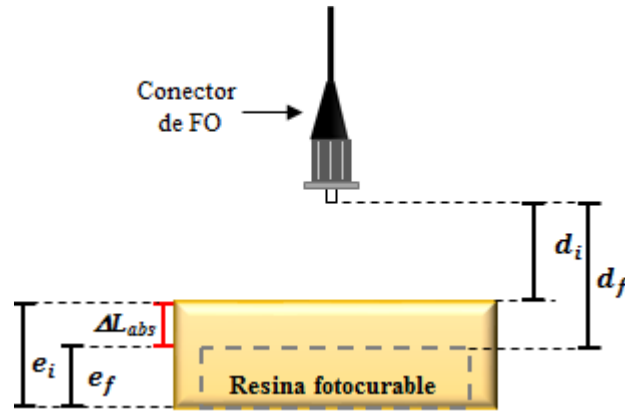


Fig. 4. 24 Parámetros considerados en el cálculo de la contracción de una resina

#### 4.2.3.2.5 Análisis de la respuesta de la señal espectral obtenida con el interferómetro de Fizeau

En la Fig. 4.25 puede observarse un ejemplo de la respuesta espectral obtenida en una medida experimental realizada con el IF durante el curado de una resina. Se muestran las señales obtenidas en dos instantes de tiempo diferentes, es decir, para dos distancias o longitudes de la cavidad distintas. En este caso, el material experimentó una contracción absoluta de 0.1mm. Al contraerse la resina aumentó la longitud de la cavidad, por lo que el periodo y la amplitud de la señal espectral disminuyeron.

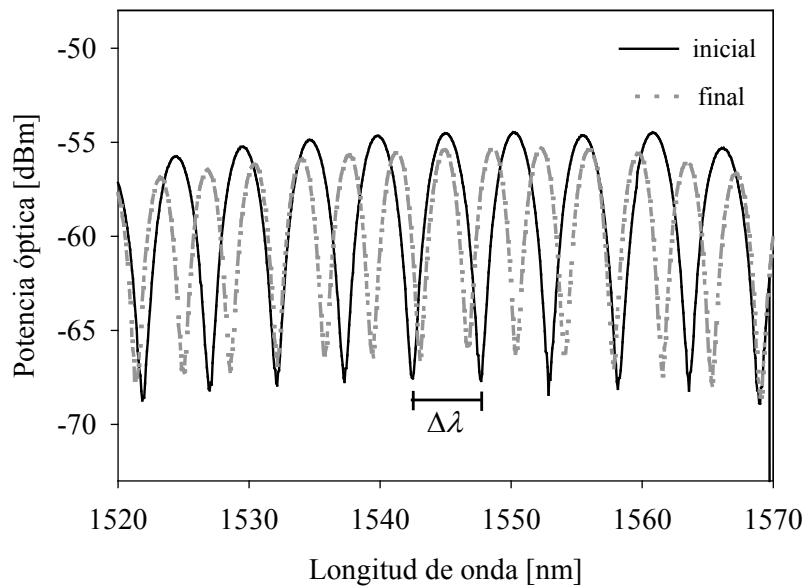


Fig. 4. 25 Respuesta espectral típica del IF correspondiente a dos instantes durante el curado de una resina dental

En el caso de la medida espectral, se puede calcular la contracción absoluta de la resina ( $\Delta L_{abs \text{ IF espec}}$ ) en la dirección de medición del IF, como (ver Fig. 4.24):

$$\Delta L_{abs \text{ IF espec}} [\mu m] = e_i - e_f = d_f - d_i \quad (4.5)$$



## Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

donde  $d_f$  y  $d_i$  se calculan a partir de la Ec. 3.11, considerando  $\lambda$  como la longitud de onda central de la fuente de banda ancha utilizada y  $\Delta\lambda$  como la diferencia entre las longitudes de onda de dos máximos espectrales consecutivos.

La deformación o contracción relativa estará dada por:

$$\Delta L_{rel\ IF\ espec} [\%] = \left[ \frac{d_f - d_i}{d_i} \right] \times 100 \quad (4.6)$$

Es posible estimar el error de la medición a partir de la expresión que vincula al valor de “ $d$ ” con la respuesta espectral del IF, resultando:

$$\delta d = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \delta\lambda + \frac{\lambda^2}{2(\Delta\lambda)^2} \delta\Delta\lambda \quad (4.7)$$

Considerando el ejemplo de la Fig. 4.25 donde  $\lambda = 1550$  nm,  $\delta\lambda = 0.02$  nm (resolución del espectrómetro – OSA), una ventana espectral  $\Delta\lambda$  de 50 nm y  $\delta\Delta\lambda = 2\delta\lambda$ , la precisión de la técnica resulta mejor que 0.68 [%].

### 4.3 Resultados experimentales

#### 4.3.1 Consideraciones generales

Se diseñó un montaje apropiado para posicionar de manera estable y repetitiva las muestras de resina para realizar su fotocurado (Fig. 4. 26). El mismo, al igual que los moldes utilizados para colocar las resinas, son independientes de la técnica de medida empleada, ya que están adaptados para su uso tanto con FBG embebidas como con el IF. El diseño permite regular la distancia desde la fuente de curado a la muestra, así como entre ésta y el conector de fibra (con terminación FC/PC), asegurando también la perpendicularidad del mismo respecto de la muestra.

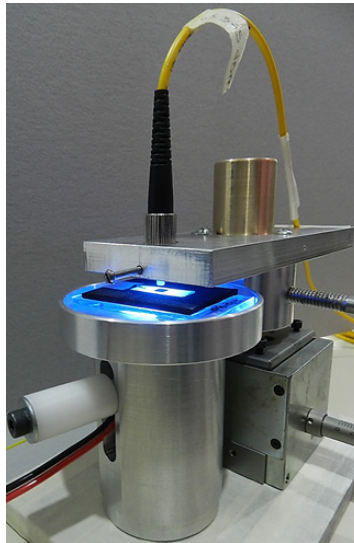
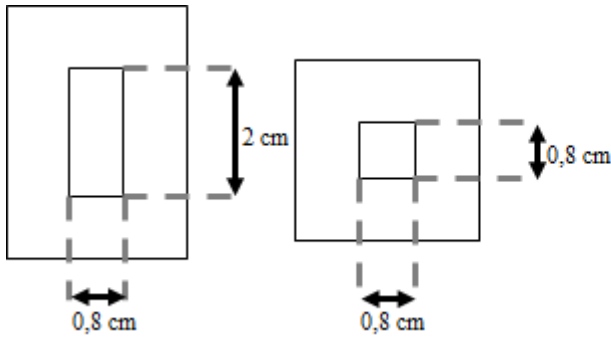


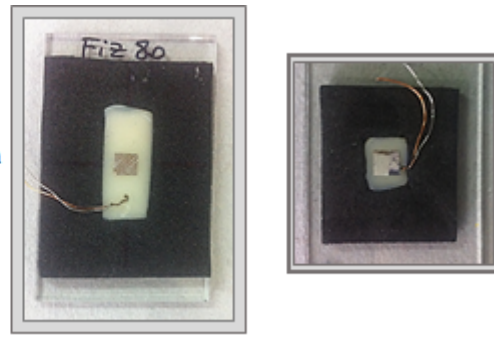
Fig. 4. 26 Montaje para posicionamiento de las muestras durante el fotocurado

*Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

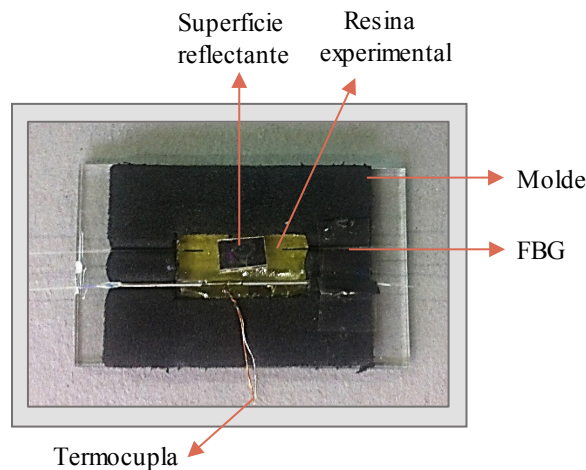
Como se ilustra en la Fig. 4.27 se utilizaron básicamente dos tipos de moldes para colocar las muestras de resina, uno rectangular (de 2 cm × 0.8 cm) y uno cuadrado (de 0.8 cm × 0.8 cm). En el caso del molde rectangular, se utilizó para aquellas medidas que implicaban un monitoreo simultáneo con el Interferómetro de Fizeau, las redes de Bragg (donde la longitud de las redes era  $\cong 1$  cm) y la termocupla. La probeta cuadrada resultaba útil para las medidas que solo se realizan con el interferómetro de Fizeau, ya que a menor cantidad de material menor tiempo de curado. Los moldes se construyeron con goma (etileno-vinil-acetato, que es un polímero termoplástico conformado por unidades repetitivas de etileno y acetato de vinilo), ya que este tipo de material no altera el comportamiento de la resina y puede ser fácilmente adherido al vidrio que se usa como base. En las Figs. 4.28 y 4.29 se observan muestras de resina comercial y experimental colocadas en los moldes para el curado. Como se dijo anteriormente, se coloca una pequeña y delgada lámina de aluminio en el centro de la probeta para mejorar la reflectividad de la superficie y por ende la visibilidad de la señal del interferómetro. Es importante tener en cuenta que este tipo de resina no debe exponerse a luz que contenga la longitud de onda a la cual el material es sensible (azul) durante su preparación.



*Fig. 4. 27 Dimensiones de los moldes*



*Fig. 4. 28 Muestras de resina comercial*



*Fig. 4. 29 Molde con resina experimental*

### 4.3.2 Resultados y discusión de medidas realizadas con redes de Bragg

Se realizaron diferentes medidas con redes de Bragg embebidas para monitorear tanto resinas experimentales como comerciales. La consistencia de ambas resinas es muy diferente, en el caso de la comercial, como se describió inicialmente, tiene partículas de relleno que le permiten tener una mayor estabilidad dimensional y fácil manipulación. Podría decirse que tiene una consistencia pastosa en comparación con la resina experimental, que es altamente viscosa y de difícil manipulación (similar a la miel) dado que carece de partículas de relleno.

Cuando la FBG es embebida en un material, requiere de cierto tiempo (unos pocos segundos en el caso de la resina) para que dicho material se adhiera a ella y pueda sensor el parámetro bajo estudio, en este caso deformación. La constante que determina el efecto de la temperatura sobre la red tiene un valor más grande (cerca de diez veces) que la que describe la influencia de la deformación (contracción), lo que la hace más sensible a las variaciones térmicas. A continuación, se van a describir las diferencias temporales obtenidas al comparar las curvas de longitud de onda y temperatura obtenidas al monitorear el curado de una resina comercial P60 colocada en un molde de 2 cm × 0.8 cm, utilizando el esquema descrito en la Fig. 4.12.

De acuerdo con un trabajo previo [68] el tiempo de solidificación de la resina es de aproximadamente 5 - 10 segundos, y durante ese periodo el material se dilata térmicamente sin que el efecto de contracción sea apreciable debido a que la fibra no está aún adherida en la resina. A partir de ese punto compiten ambos procesos, la dilatación térmica y la contracción química (que tienen signos opuestos). Este comportamiento es similar para todas las resinas estudiadas. De acuerdo a esto se asume que para el instante en que la longitud de onda se hace máxima en la medida espectral de la red (Figs. 4.30, 4.31 y 4.32), la resina ya se adhirió a la misma, pues a pesar de que la temperatura sigue aumentando, la contracción química comienza a ganarle a la expansión térmica y la longitud de onda comienza a disminuir.

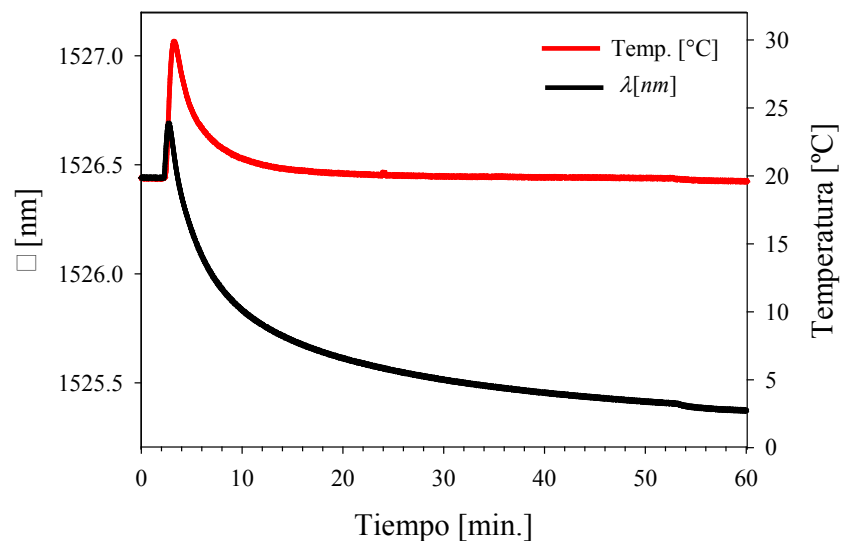


Fig. 4. 30 Variación temporal de la longitud de onda de Bragg y de la temperatura durante el curado de la resina P60

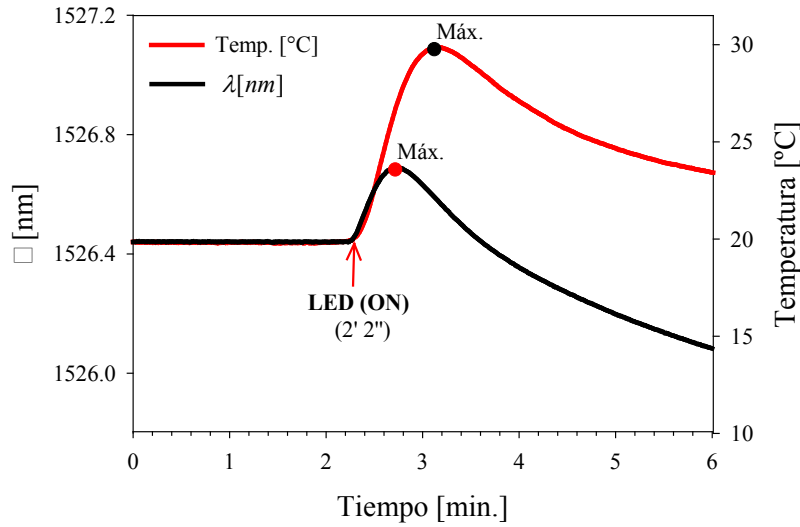


Fig. 4. 31 Ampliación de la Fig. 4.30

En la Fig. 4.32 se comparan la derivada temporal de la evolución de la longitud de onda de Bragg y la curva de temperatura (para realizar la comparación, en la primera no se incluye el pico de dilatación rápido que tiene signo contrario). La derivada es proporcional al número de reacciones de polimerización que se generan por unidad de tiempo. En el caso de la primera curva se puede notar con claridad que el proceso de polimerización es más rápido por la acción del iniciador hasta que llega a la solidificación de la resina (es decir, al máximo de longitud de onda). La curva de temperatura es un proceso más lento debido al cambio de la constante de difusión térmica (se achica al cambiar de fase el material).

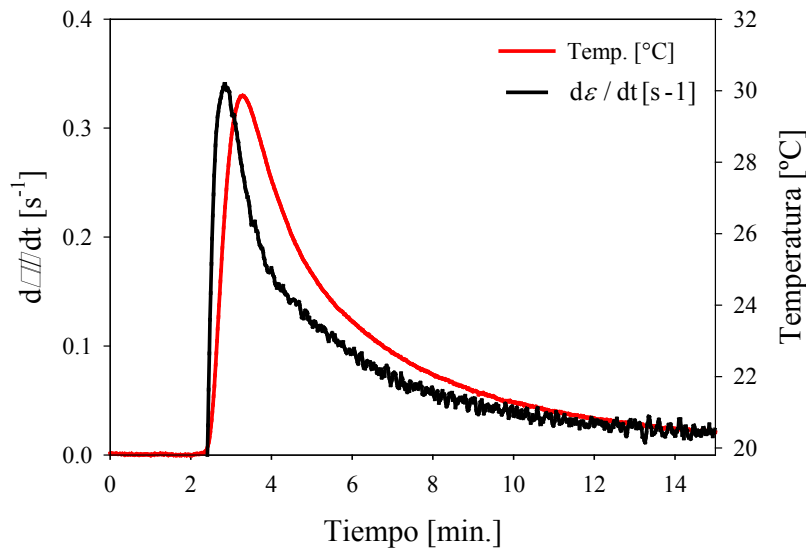
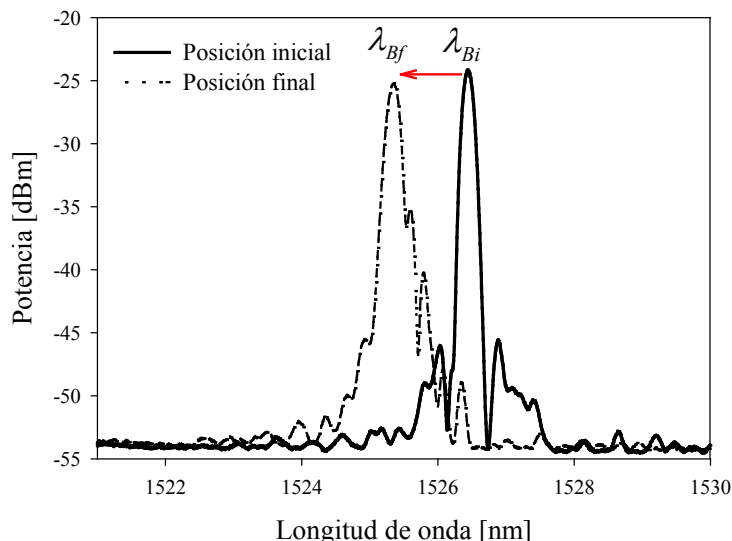


Fig. 4. 32 Comparación de la derivada de la señal espectral de la FBG y la variación temporal de la temperatura

*Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

A continuación, se analizó el comportamiento de una resina experimental MDQ1, cuya composición se especifica en la Tabla 4.2. Se monitoreó durante 60 minutos, con una potencia de curado de 1.55 mW, y el tamaño de probeta utilizado fue de 2 cm × 0.8 cm. En esta prueba una red de Bragg fue embebida en la resina y en la Fig. 4.33 se ilustra la posición espectral inicial de la misma (línea continua) con una  $\lambda_{Bi} = 1526.42$  nm cuando comienza el curado. También se observa la posición final (línea discontinua) con una  $\lambda_{Bf} = 1525.35$  nm, resultando un desplazamiento espectral  $\Delta\lambda = 1.07$  nm a causa de la contracción experimentada como resultado del proceso de fotocurado. Además, en la figura se puede observar la generación de lóbulos laterales y el ensanchamiento del pico, causados por una probable distribución no uniforme de tensiones sobre la red durante el proceso de curado [69].



*Fig. 4. 33 Posición inicial y final de la FBG utilizada para monitorear el proceso de polimerización de la resina MDQ1*

En el caso de la Fig. 4.34 se muestra el comportamiento en longitud de onda de la red a lo largo del tiempo, notándose el instante de encendido del LED aproximadamente a los 2 minutos de comenzada la adquisición de datos, instante señalado con una flecha roja también en la curva de temperatura de la Fig. 4.35. El objetivo de comenzar el curado un tiempo después de comenzar la adquisición, es asegurar que la muestra se encuentre absolutamente en reposo y estable (dada su consistencia relativamente fluida), minimizando la influencia de factores mecánicos en la medida. En este caso particular, la temperatura aumentó de 20°C a 30°C, durante el tiempo de máxima reacción, observándose posteriormente el enfriamiento de la resina hasta estabilizarse completamente alrededor de los 20 °C.

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

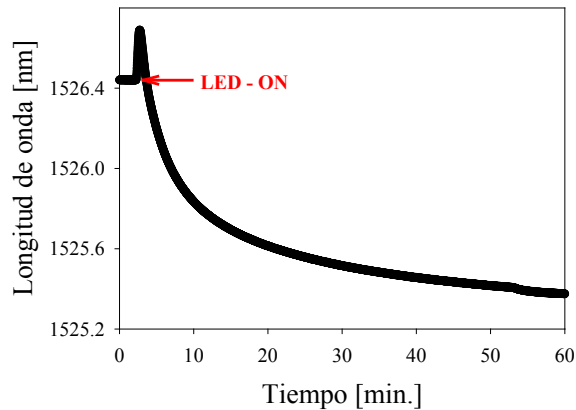


Fig. 4.34 Cambio en la longitud de onda de Bragg - resina MDQ1

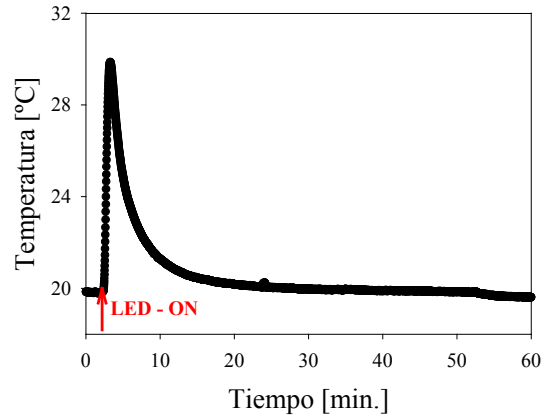


Fig. 4.35 Variación de temperatura en la muestra - resina MDQ1

Posteriormente, después de procesar los datos obtenidos se trazaron las curvas de la Fig. 4.36 y Fig. 4.37 que corresponden a la contracción absoluta (9  $\mu\text{m}$ ) y relativa (0.09 %) de la resina MDQ1. Como se puede observar, en una etapa inicial del proceso de fotocurado (cuando la resina es relativamente “liquida”), la contracción es muy rápida. Sin embargo, una vez que comienzan a formarse las redes que constituyen el polímero, hay muchas especies de camforquinona que quedan “atrapadas o aisladas”, dificultando la continuidad del proceso de polimerización. En esta etapa, lo que prevalece es un proceso de difusión en un estado “solido”, por lo que existe una polimerización remanente que cada vez es más lenta.

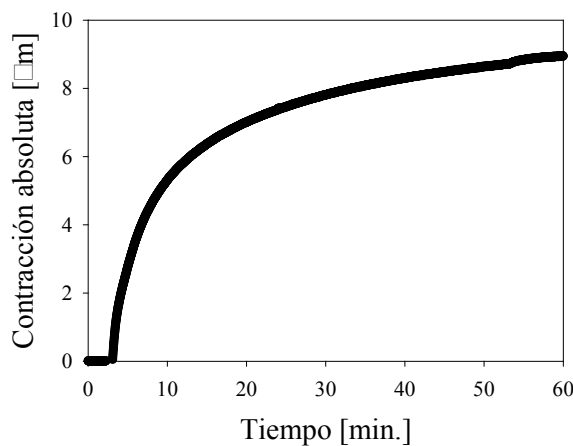


Fig. 4.36 Contracción absoluta - MDQ1

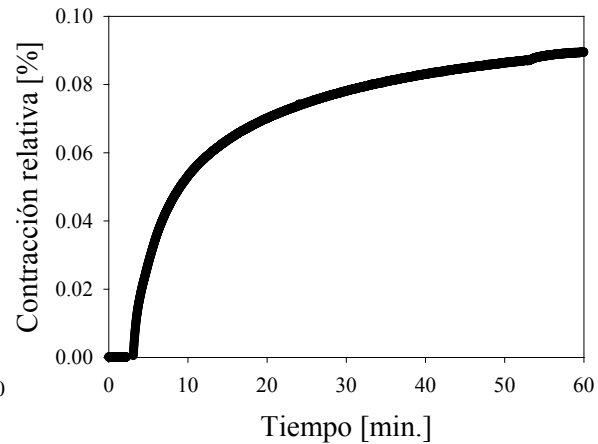


Fig. 4.37 Contracción relativa - MDQ1

Luego, en la Fig. 4.38 se ilustra el monitoreo de la resina experimental MDQ2 (Tabla 4.2) durante 30 minutos, colocada en moldes de 2 cm  $\times$  0.8 cm, con tres potencias de curado diferentes. Se observa que a mayor potencia de curado, mayor es la contracción de la resina.

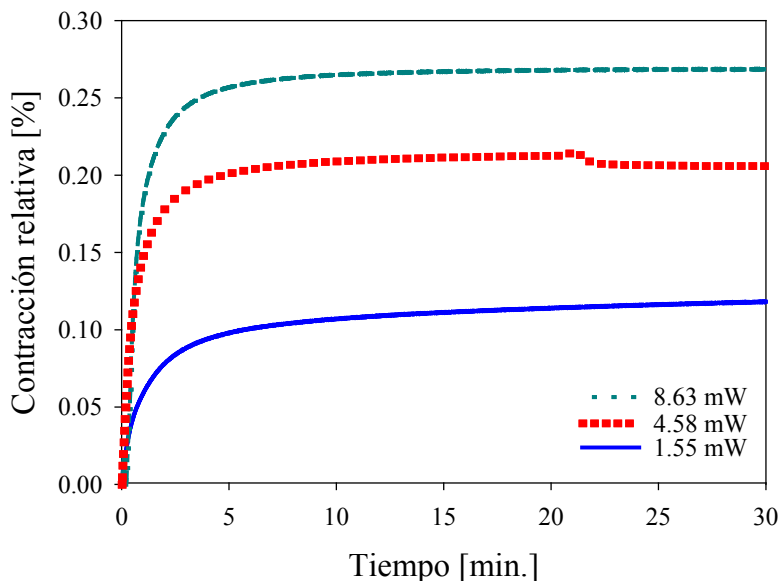


Fig. 4.38 Resina MDQ2 medida con diferentes potencias de curado

En la Fig. 4.39 se muestra el comportamiento de la resina comercial Filtek P60 durante 66 minutos de curado empleado dos potencias de iluminación distintas: 12.39 mW y 1.55 mW. Nuevamente se puede observar en las trazas que cuanto mayor es la potencia aplicada, el proceso de curado es más rápido y el nivel de contracción es mayor. En la Fig. 4.40 se muestra otra comparación de monitoreo de resinas durante 50 minutos, esta vez utilizando la misma potencia de curado (1.55 mW) y un molde de 2 cm x 0.8 cm, pero con dos resinas diferentes: Filtek P60 y Z250. Se observa que la resina Z250 contrae más que la P60 [69].

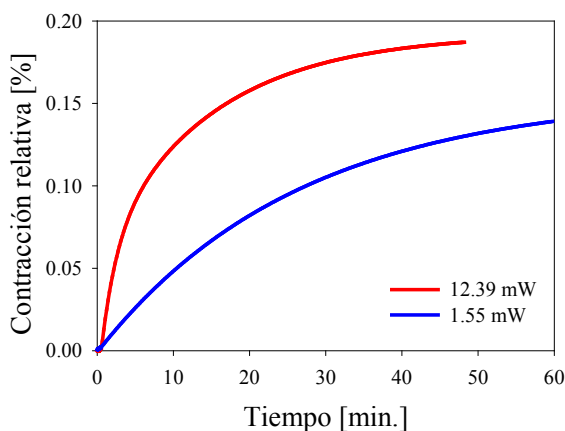


Fig. 4.39 Resina Filtek P60 con diferentes potencias de curado

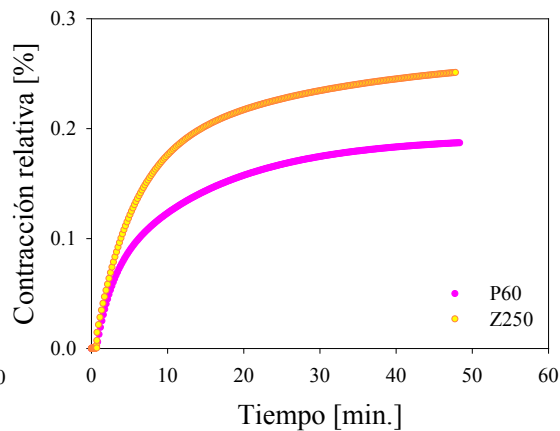


Fig. 4.40 Resinas Filtek P60 y Z250 curadas con la misma potencia: 1.55 mW

### 4.3.3 Resultados de las medidas realizadas con el Interferómetro de Fizeau

Se monitoreo el curado de una resina comercial Z250 empleando una probeta de 2 cm x 0.8 cm, registrándose tanto la deformación experimentada como la temperatura durante el curado. Después de adquirir la señal temporal y procesarla como se indica en la Sección

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

4.2.3.2.4 se obtiene la respuesta de la Fig. 4.41, donde se observa una muy baja dispersión de los datos, lo cual es debido a la alta resolución del sistema de medida. En dicha figura se puede discernir el instante de encendido del LED y el valor máximo al que tiende la contracción.

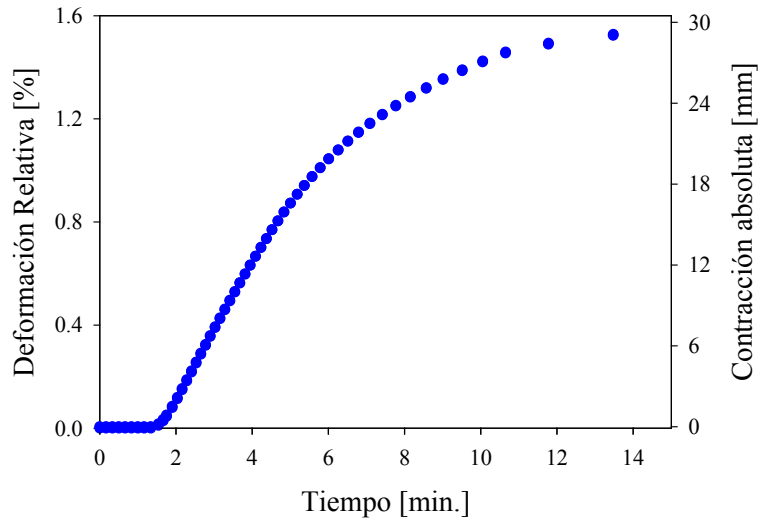


Fig. 4. 41 Medida de deformación relativa y absoluta de la resina comercial Z250

En la Fig. 4. 42 se dibujan dos trazas, una correspondiente al monitoreo de temperatura y la otra es la derivada de la deformación respecto al tiempo. En ambas se señala el instante de encendido del LED, aproximadamente 2' después de comenzada la adquisición de datos, el instante en el que se alcanza la máxima longitud de onda (2' 4'') y la máxima temperatura (2' 6''), y posteriormente se ve el decaimiento y estabilización en ambas señales. Es evidente en la derivada de la señal que el proceso de polimerización llega a su máximo y decae más rápidamente comparado con la temperatura.

La respuesta obtenida en la Fig. 4.32 cuya medida fue realizada con una red de Bragg, es comparable con esta medida realizada con el interferómetro de Fizeau. En ambas medidas se puede discernir claramente la velocidad de los procesos debidos a la contracción química y a la evolución de la temperatura durante la polimerización. Cabe mencionar que en las dos medidas se estudiaron resinas comerciales: en la primera una resina P60 y en esta última la resina Z250, empleando probetas del mismo tamaño y la misma potencia de curado.



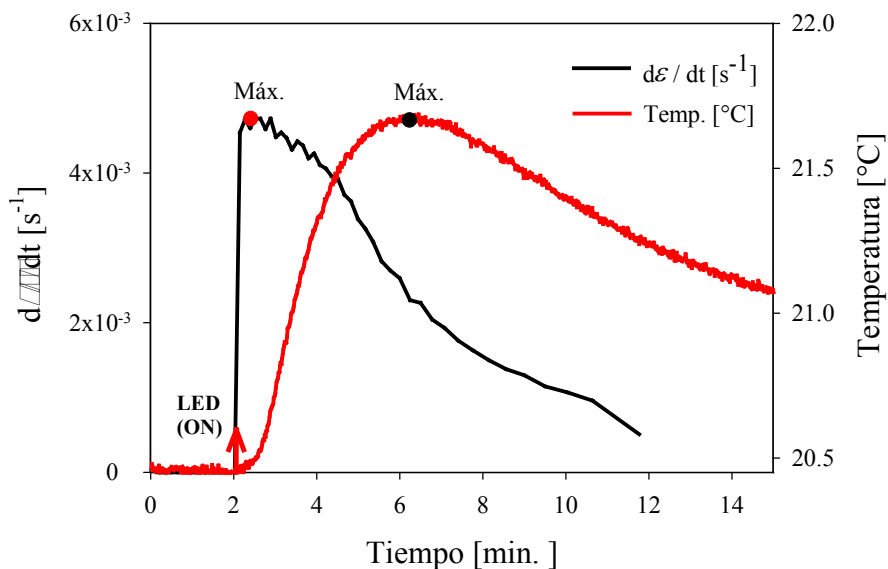


Fig. 4. 42 Trazos comparativos de la derivada del strain respecto al tiempo y la temperatura durante el curado de la resina comercial Z250

Luego, en la Fig. 4.43 se muestran resultados de dos pruebas con la misma potencia de curado (1.55mW), pero esta vez comparando el comportamiento de una resina experimental (MDQ2) con una resina comercial (Z250). Se puede notar que las resinas experimentales son más reactivas que la resina comercial debido a la ausencia de material de relleno en su composición.

En la Fig. 4.44 se compararon dos resinas comerciales distintas: Filtek P60 y Z250 colocadas en moldes de 0.8 cm x 0.8 cm, curadas empleando una potencia de 12.39 mW. Se observa que la resina Z250 contrae más rápido que la P60, resultado semejante al obtenido con la red de Bragg en la Fig. 4.40. Los valores finales de contracción son diferentes debido no sólo a la diferente potencia de curado, sino también a la diferente cantidad de material ensayado. En general, cuanto mayor es el espesor de la muestra a curar, más difícil resulta obtener una completa polimerización del material, por lo que se aconseja curar capas de no más de 2 mm aproximadamente de espesor.

En la Fig. 4.45 se comparan las dos resinas experimentales MDQ1 y MDQ2 curadas con la misma potencia de polimerización (1.55mW), donde MDQ2 contrae aproximadamente 0.5% más que MDQ1, que alcanza una contracción final de 4,5%.

Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

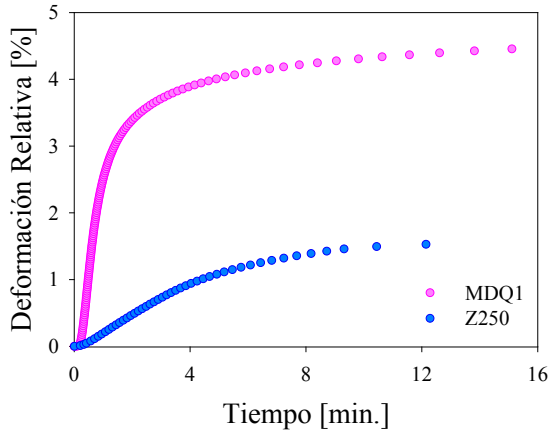


Fig. 4. 43 Comparación de resina MDQ2 y Z250 curadas con 1.55mW

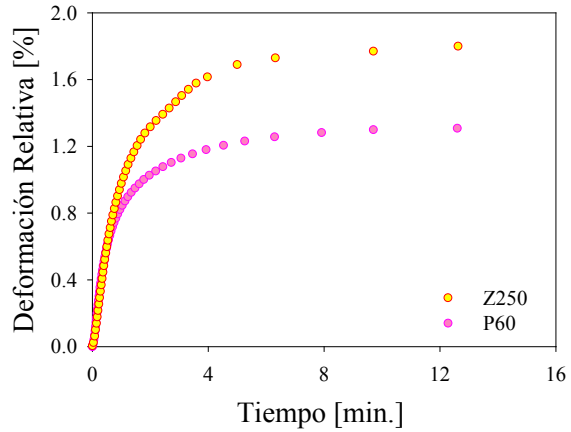


Fig. 4. 44 Medida de 2 resinas comerciales con la misma potencia de polimerización (12.39mW)

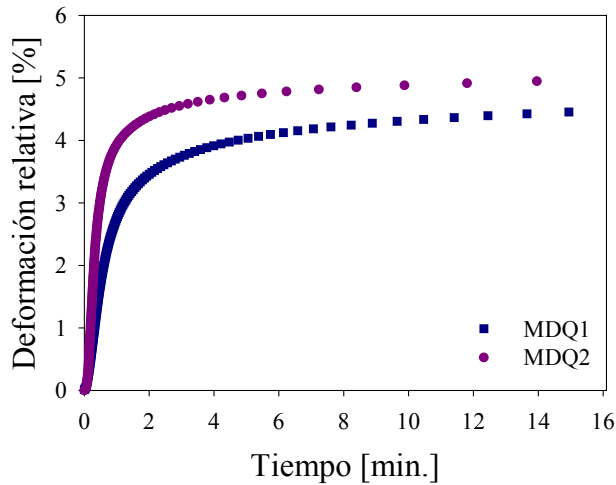


Fig. 4. 45 Comparación de las resinas experimentales MDQ1 y MDQ2

En la Fig. 4.46 se detalla la evolución del curado de una resina comercial, en este caso, la resina Filtek P60, medida con el Interferómetro de Fizeau en un molde de 0.8 cm × 0.8 cm, con diferentes potencias de curado. Se puede observar que cuanto mayor es la potencia utilizada, mayor es el grado de polimerización de la resina y por lo tanto, mayor es la contracción experimentada. Además, como es esperable, a mayor potencia resulta menor el tiempo de curado. Una potencia de curado demasiado baja puede hacer que la muestra de material no se polimerice por completo [69].

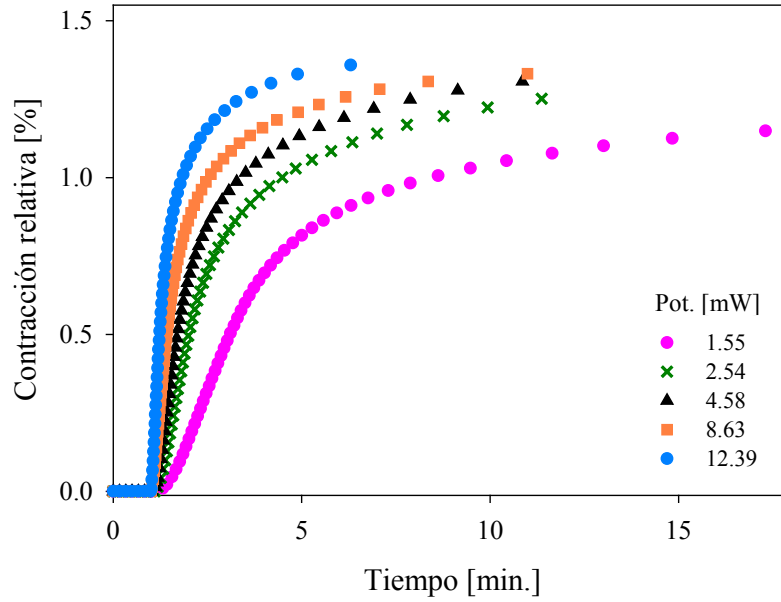


Fig. 4. 46 Medida de resina Filtek P60 con diferentes potencias de curado

En la Fig. 4.47 se muestra una curva que relaciona la contracción relativa máxima alcanzable con la potencia de curado utilizada, en la que se puede notar que cuanto menor es la potencia la resina se contrae menos.

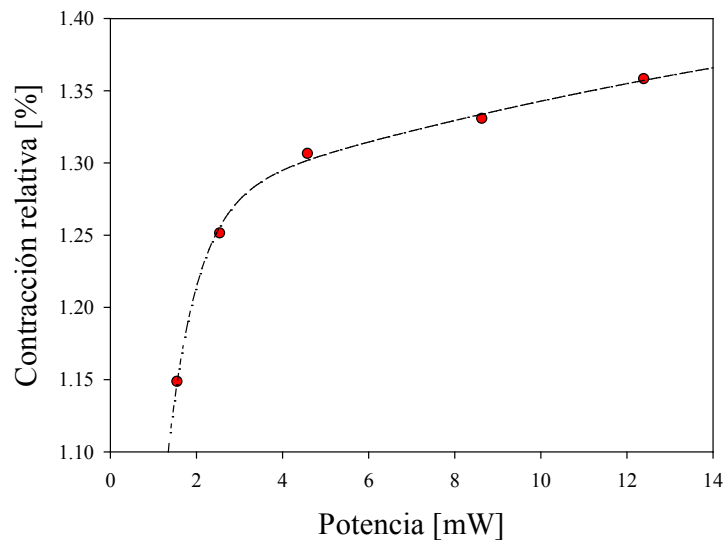


Fig. 4. 47 Contracción máxima de la resina Filtek P60 para diferentes potencias de curado

#### **Medida realizada en simultáneo con el Interferómetro de Fizeau temporal y espectral**

En los primeros instantes del curado, cuando la resina experimental es iluminada con un LED centrado en  $0,465\mu\text{m}$  (longitud de onda en la que el iniciador tiene el máximo de absorción), puede experimentar una expansión (debido a que las reacciones químicas involucradas generan un proceso exotérmico) o una contracción (debido a la reducción de volumen inherente a la reacción química de polimerización). Si se producen ambos procesos, esto podría reflejarse en la señal interferométrica como un desplazamiento de

fase. Cualquier cambio de fase se observa en la señal temporal como un salto o un quiebre en su continuidad, mientras que en la señal espectral habrá un cambio de signo en la variación del período de las franjas detectadas. Es decir, la cantidad de franjas en un rango registrado por el monocromador aumentará o disminuirá de acuerdo con el cambio de dirección de la deformación [70], [71]. A continuación, se comparan los resultados obtenidos a partir del procesamiento de la señal temporal y espectral en la determinación del cambio dimensional de una muestra de resina MDQ1 curada con una potencia de 1.55 mW, empleando una fuente láser de 1310 nm y un SLED centrado en 1550 nm para ambas implementaciones.

A partir de la señal temporal obtenida durante el proceso de polimerización, mostrada en el inserto de la Fig. 4.48, se puede ver la evolución del proceso en una sola dirección (ya que no hay saltos en la señal), pero sin saber si el material se expande o se contrae. Después de procesar los datos obtenidos de la señal temporal, los resultados muestran una deformación final de aproximadamente 90  $\mu\text{m}$  como se observa en la Fig. 4.48. La evolución principal se produjo básicamente en los primeros 2 minutos, que muestran la alta reactividad del material. Después de eso, la reacción se hace más lenta dado que el material comienza a vitrificar dificultando la formación de nuevas cadenas de polímeros.

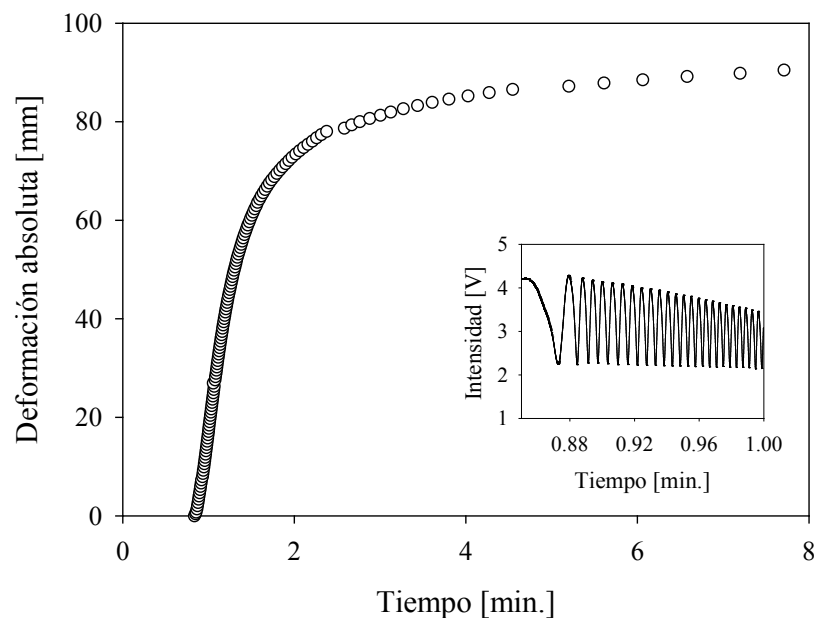


Fig. 4. 48 Contracción obtenida a partir de la señal temporal

En la Fig. 4.49 se observa el resultado obtenido a partir del procesamiento de distribuciones espectrales similares a las mostradas en el inserto de la mencionada figura, y empleando la técnica descrita en la Sección 4.2.3.2.5. La longitud de la cavidad obtenida a partir de la respuesta espectral inicial determina la posición de referencia del conector con relación a la superficie, que en este caso era 180  $\mu\text{m}$ . Una vez más, se determinó que la deformación absoluta experimentada por la resina durante el proceso de curado fue de aproximadamente 90 micras aunque con el procesamiento de la señal espectral se verificó que se trató de una contracción. Además, se logró un ajuste casi perfecto entre ambas curvas. Esto muestra que, en las condiciones de excitación dada, la resina experimentó deformación en una sola

#### Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)

dirección (contracción) indicando que el efecto térmico promedio en la muestra no es suficiente para producir cualquier cambio en la dirección del proceso.

Resultados equivalentes fueron obtenidos al implementar ambas técnicas (temporal y espectral) en simultáneo, pero utilizando una fuente de 1310 nm para el registro temporal y una de banda ancha centrada en 800 nm para el análisis espectral. Dichos resultados fueron publicados en [70], [72].

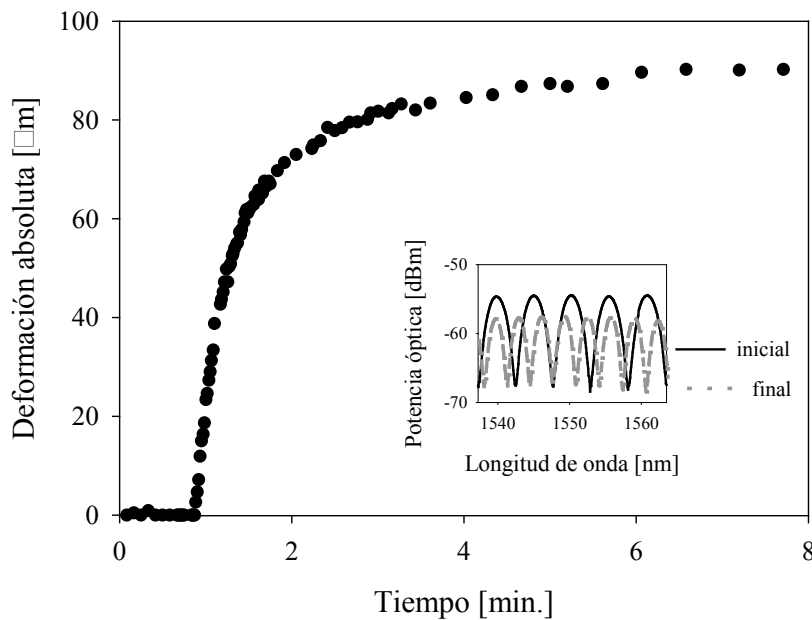


Fig. 4. 49 Contracción obtenida a partir de la señal espectral

#### Resumen del capítulo 4

En este capítulo se muestra la aplicación de los sensores de fibras ópticas para estudiar el proceso de curado de resinas tanto comerciales como experimentales de uso odontológico. El estudio de resinas se ha hecho en conjunto con el Dr. Gustavo Arenas y el Ing. Julián Antonacci del Laboratorio Láser de la Facultad de Ingeniería y la Dra. Claudia Vallo del INTEMA, ambos dependientes de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Inicialmente, se plantean medidas experimentales con las redes de Bragg y posteriormente con una nueva implementación (espectral) del interferómetro de Fizeau. En el caso de las medidas realizadas empleando redes de Bragg, el sensado se realizó monitoreando la evolución de la longitud de onda de máxima reflexión de la red, a la vez que se registraron los cambios de temperatura ocurridos durante el proceso (se verificó un aumento de temperatura de 10 °C, corroborando la presencia de un proceso exotérmico). Se estudiaron diferentes tipos de resina, exponiéndolas a diferentes potencias de curado. De las mediciones realizadas se concluye que, cuanto mayor es la potencia aplicada, el proceso es más rápido y el nivel de contracción final obtenido es mayor. Los mismos resultados se obtuvieron en el caso de las medidas realizadas empleando el interferómetro de Fizeau. También se realizaron medidas con el interferómetro de Fizeau analizando tanto su respuesta temporal como espectral, notándose que las dos respuestas coincidieron en determinar adecuadamente el nivel de contracción de la resina. Además de esto, se concluyó que ambos enfoques se complementan ya que, la medida temporal permite determinar distancias con alta

*Capítulo 4. Caracterización de cambios dimensionales de resinas fotocurables utilizando sensores de fibra óptica (FBG e IF)*

resolución, mientras que la medida espectral quita la ambigüedad del desconocimiento de la dirección del proceso además de proveer información absoluta de la distancia real al objeto bajo estudio. Las mediciones realizadas sobre este tipo de sistema permiten ilustrar la precisión y resolución de las técnicas (particularmente la del Fizeau temporal) en mediciones de distancias, donde esta última alcanza valores menores a la décima de micrón. Dicho potencial la habilita para realizar mediciones de vibraciones (con un sistema de adquisición adecuado) de muy pequeña amplitud.

## **Capítulo 5**

### *Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco*

#### 5.0 Introducción

Durante los últimos años, se ha prestado gran atención al desarrollo de nuevas mezclas a base de materiales cementicios y otros aditivos, con el fin de crear una nueva generación de materiales con propiedades mejoradas. El concepto principal en el diseño es minimizar el número de defectos, evitando el agrietamiento temprano de pastas (cemento + agua), morteros (pasta + finos agregados) y hormigones (mortero + agregados gruesos), para lograr un mayor porcentaje de la capacidad de carga máxima de sus componentes. La contracción o expansión que ocurre dentro del material (que puede ser importante durante las primeras 24 horas) es posible que lleve al desarrollo de *grietas* internas, por lo que la detección y cuantificación de estos procesos es de gran interés [73]. El estudio de dichos procesos en estado fresco (antes de que ocurra el fraguado del material) es un requisito para algunas lechadas comerciales especialmente diseñadas para las piezas de sellado y elementos estructurales.

Muy pocos métodos permiten evaluar los cambios dimensionales del cemento en estado fresco. Se utilizan usualmente transductores piezoeléctricos incorporados en el material [74]. Por otro lado, las técnicas de medición óptica como las redes de Bragg y el interferómetro de Fizeau ofrecen una excelente alternativa para estudiar este tipo de materiales antes de que endurezcan [75].

Las redes de Bragg han sido utilizadas desde hace más de treinta años por sus ventajas predominantes tales como el pequeño tamaño, bajo costo y la capacidad de evitar la influencia electromagnética (como se describió con más detalle en los capítulos 1 y 2) [8], [76], en áreas tales como la industria aeroespacial, control estructural, aplicaciones médicas y químicas, entre otras. La mayoría de las aplicaciones utilizan este tipo de sensores especialmente para detectar cambios de temperatura y tensión mecánica. El proceso de fraguado del hormigón ha sido estudiado mediante la medición de pérdidas en la fibra [77], [78], mientras que los sensores de redes de Bragg se han utilizado para ayudar a describir por ejemplo el proceso de secado y evaporación de las pastas de cemento [79]–[83].

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

Los diferentes sistemas de sensores interferométricos de fibra óptica, tales como el interferómetro de Mach-Zender, el interferómetro extrínseco Fabry-Perot (EFPI) o el sistema comercial SOFO (control de las estructuras mediante sensores de fibra óptica), han sido empleados para aplicaciones de ingeniería civil y para el seguimiento de los cambios inducidos por diferentes procesos en los materiales [84], [85].

En este capítulo, se estudiaron los cambios dimensionales de muestras de mortero mediante dos técnicas ópticas, con el fin de aprovechar las ventajas de dichas técnicas para este tipo de mediciones. La primera de ellas se basa en la utilización de redes de Bragg grabadas en fibra y la segunda, en el empleo de un interferómetro Fizeau de fibra óptica. Los resultados de ambas técnicas se compararon y se correlacionaron con las mediciones realizadas con un comparador de longitudes mecánico. En particular, las técnicas ópticas mencionadas se utilizaron para el estudio de diferentes tipos de morteros premezclados de cemento comerciales, con el fin de caracterizar sus procesos de expansión o contracción además de estudiar el comportamiento de diferentes aditivos agregados a este tipo de mezclas en estudio [86], [87].

### 5.1 Conceptos previos vinculados a materiales cementicios

Es importante definir algunos conceptos básicos referidos a los materiales cementicios objeto de este estudio, los cuales serán analizados desde el estado fresco con técnicas no convencionales en el área de la obra civil, como son las técnicas ópticas. Luego de una serie de definiciones generales, se introducen de manera muy simplificada los procesos que ocurren desde que el material es mezclado hasta que fragua.

#### 5.1.1 El Concreto

El concreto u hormigón es básicamente una mezcla (Fig. 5.1) de: agregados (finos y gruesos (Fig. 5.2)) y pasta. La pasta, compuesta de cemento y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón). En otras palabras, los agregados finos y gruesos se incluyen en una matriz porosa (Fig. 5.3) hecha de cemento y agua, que actúa como aglutinante. Los agregados funcionan como materiales de relleno inertes que restringen las variaciones dimensionales, mientras que la matriz de cemento cubre los agregados, llena los vacíos y es el principal responsable de la resistencia y durabilidad del material.



Fig. 5. 1 Mezcla de Concreto



Fig. 5. 2 Agregados finos y gruesos



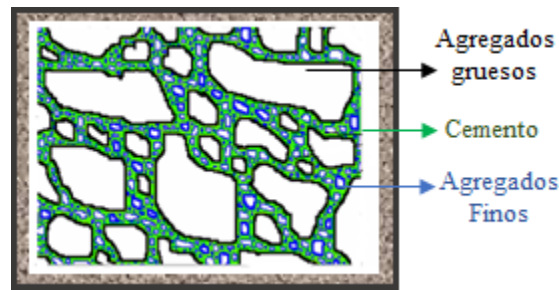


Fig. 5. 3 Estructura interna del hormigón

Cuando el agua y el cemento hacen contacto, la hidratación en el cemento da inicio a una serie de cambios físicos que aparecen como una expresión del proceso químico en curso. Por lo tanto, la pasta de cemento pasa de ser un "líquido viscoso" a ser un "sólido duro". En primer lugar, se produce una reducción de agua libre en el sistema debido a las reacciones de hidratación temprana, la absorción de agua en la superficie de los productos de hidratación y la evaporación. Como resultado, la pasta pierde plasticidad y se rigidiza. Las reacciones continúan y, después de unas horas, producen lo que se llama fraguado y luego endurecimiento. El *fraguado* representa la solidificación de la pasta y se lleva a cabo progresivamente. En este momento la resistencia de la pasta es muy baja, las reacciones continúan y la pasta gana resistencia a lo largo del tiempo (meses).

La *contracción a edad temprana* es una preocupación, ya que durante las primeras horas, inmediatamente después de la preparación del hormigón (colado o colocación del hormigón en una superficie o un molde después de ser mezclado), este tiene la capacidad de deformación más baja, pero es más sensible a tensiones internas que pueden dar lugar a *grietas* que se forman del mismo modo que en edades más avanzadas. Incluso es posible que se generen grietas microscópicas en edad temprana que posteriormente se abran, causando problemas a largo plazo debido a la contracción en edades más avanzadas [16]. Un sistema de detección propuesto con el objeto de controlar dicho problema, será discutido en el capítulo siguiente. La contracción que se produce en el material durante las primeras horas generalmente es ignorada, porque su magnitud se supone que es mucho más pequeña que la contracción a largo plazo, pero esta hipótesis puede ser errónea. Para llevar a cabo esta verificación, que no puede realizarse aplicando métodos mecánicos convencionales, se propone el uso de técnicas ópticas discutido en este capítulo. Por otro lado, la *hidratación* de compuestos de cemento es un proceso exotérmico, y el calor de la hidratación desarrollada puede producir algunas expansiones que afectan a la estabilidad dimensional del sistema. Otros factores, tales como la composición y la fineza del cemento o las proporciones de la mezcla, también influyen.

Cabe mencionar algunas propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido:

En estado fresco:

*Trabajabilidad:* está definida por la mayor o menor dificultad para el mezclado, transporte, colocación y compactación del concreto. Comprende: estabilidad, compactabilidad y movilidad.

*Segregación:* la diferencia de densidades entre los componentes produce que el agregado grueso quede suspendido e inmerso en la matriz.

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

*Exudación*: propiedad por la cual una parte del agua de mezcla se separa de la masa y sube hacia la superficie del concreto.

*Contracción*: es una de las propiedades más importantes en función de los problemas de fisuración que acarrea con frecuencia.

### En estado endurecido:

*Elasticidad*: es la capacidad del concreto de deformarse bajo carga.

*Resistencia*: es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos.

*Extensibilidad*: es la propiedad del concreto de deformarse sin agrietarse.

### 5.1.2 La contracción del hormigón

La *contracción* o retracción del hormigón no se puede evitar. Va a ocurrir debido, al menos, a la reducción de volumen resultante de la *hidratación del cemento*. Adicionalmente la contracción también puede ser debida al *secado*. Si hay demasiada contracción, el hormigón se agrieta y la durabilidad de la estructura se ve gravemente comprometida. Además de la contracción que es uno de los principales factores que contribuyen a un agrietamiento potencial de la estructura, otros factores tales como, el tamaño de la muestra y las restricciones de borde también influyen. Para evaluar los riesgos asociados con la contracción, es fundamental ver todos los aspectos de la misma, es decir, en diferentes etapas y conducida por diferentes mecanismos.

La contracción del hormigón se lleva a cabo en dos etapas distintas: temprana y a edades avanzadas (Fig. 5.4). La primera etapa comúnmente se desarrolla en el primer día, mientras que el hormigón se coloca y comienza a endurecerse. La expresión “a edades avanzadas”, se refiere a una edad de 24 horas en adelante. Durante esta etapa, el hormigón se desmolda y se llevan a cabo mediciones estandarizadas de contracción. En cada una de las dos etapas mencionadas, existen también varios tipos de cambios lineales que pueden ser físicamente medidos en una muestra, cómo son el *secado* y la *contracción autógena*, donde el hormigón se somete también a la reducción de volumen debido a *cambios térmicos* y reacciones de *carbonatación* (la carbonatación en el concreto, es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio (con alto pH) a carbonato de calcio, el cual tiene un pH más neutral) [73].

Los *materiales a base de cemento Portland* por lo general muestran una respuesta de *contracción* tanto en estado fresco como endurecido. Varias razones, tales como los asentamientos, reacciones químicas (los productos de hidratación ocupan menos volumen que el cemento Portland no hidratado y el agua por separado), la evaporación del agua y el movimiento del agua en los poros son algunas de las principales.

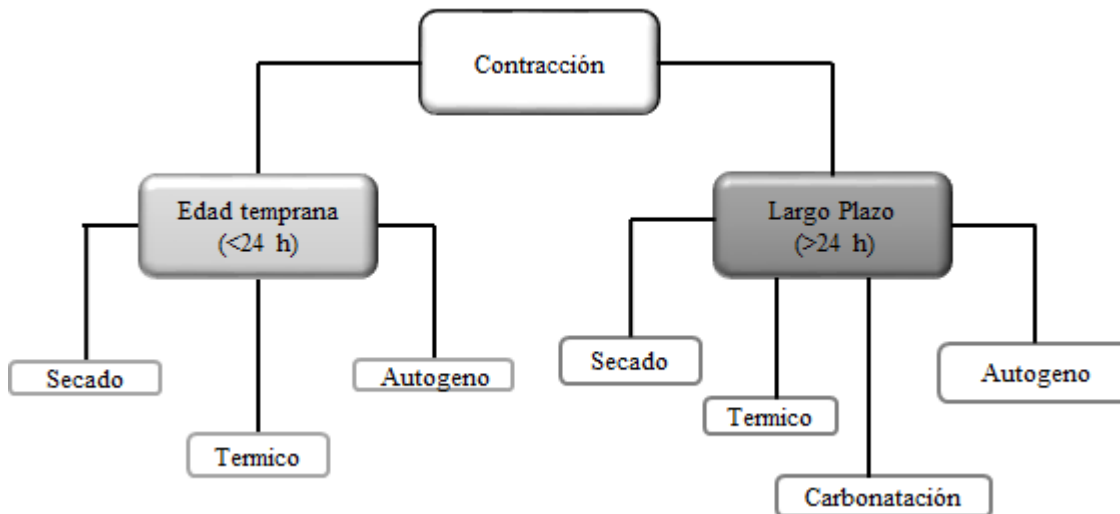


Fig. 5. 4 Etapas de la contracción del hormigón

### 5.1.3 Tipos o mecanismos de contracción

Existen diferentes tipos de contracción (Fig. 5.5) que describen los cambios de volumen del hormigón durante el fraguado, de los cuales se da una breve definición a continuación.

*Contracción química:* se refiere a la reducción en el volumen absoluto de sólidos y líquidos de la pasta, resultante de la hidratación del concreto. Además, esta es la fuerza que conduce a la contracción autógena.

*Contracción autógena:* es la reducción, macroscópica del volumen (cambio dimensional visible) de la pasta de cemento, causada por la hidratación. Cuando hay agua externa disponible este tipo de contracción no puede ocurrir, la hidratación del cemento consume el agua de los poros, resultando en auto-deseccación. La contracción autógena aumenta con la relación agua/cemento y con el aumento de la cantidad de pasta. El concreto normal tiene una contracción autógena insignificante. El uso reciente de concretos de alto desempeño y baja relación agua/cemento ha reanudado el interés en este tipo de contracción a fin de controlar el desarrollo de fisuras. Además del ajuste del contenido agua/cemento se puede reducir la contracción autógena con el uso de aditivos reductores de contracción.

*Contracción por asentamiento o por hundimiento:* se refiere a la contracción vertical de los materiales cementantes frescos, antes del inicio del fraguado, y es resultado del sangrado o la exudación (asentamiento de los sólidos con relación a los líquidos), de la subida de los vacíos de aire hacia la superficie y de la contracción química.

*Contracción plástica:* se refiere a los cambios que ocurren mientras el concreto está aún en estado fresco, antes de endurecerse. Este tipo de contracción resulta de la combinación de la contracción química y autógena, y la rápida evaporación de la humedad de la superficie superando la tasa de exudación. La contracción plástica puede ser controlada con la disminución de la evaporación de la superficie.

*Expansión:* Puede ocurrir expansión en el concreto, el mortero y la pasta de cemento con la presencia de agua externa. La magnitud de expansión no es muy grande en edades tempranas. Cuando se remueven las fuentes de agua externa, las contracciones autógenas y de secado revierten el cambio de volumen [73].

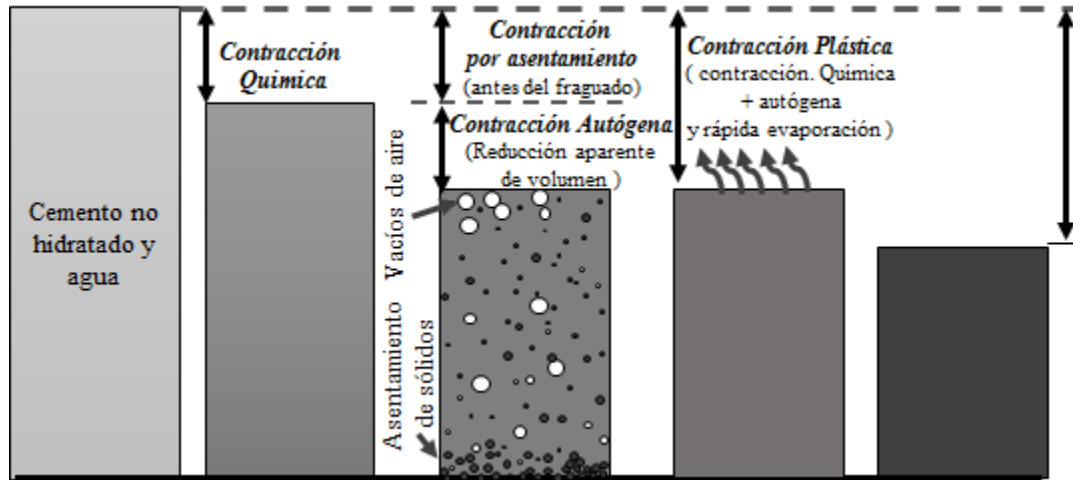


Fig. 5. 5 Cambios de volumen por contracción

#### 5.1.4 Aditivos de cemento

El volumen de hormigón comienza a cambiar inmediatamente después de que se ha mezclado, esto es debido a cierta competencia entre la contracción química y la expansión térmica del material, que en general está presente desde las primeras etapas. En las estructuras donde es necesario evitar la contracción, algunos aditivos químicos pueden jugar un papel importante.

Se llaman aditivos (Fig. 5.6) aquellos productos que se incorporan al hormigón fresco con el objeto de mejorar alguna de sus características (facilitar su puesta en obra, regular su proceso de fraguado y endurecimiento, aumentar su durabilidad, etc.). Existen en el comercio multitud de aditivos con el nombre de aceleradores, retardadores, plastificantes, aireantes, impermeabilizantes, etc. Su dosificación es en general inferior a un 5 % del peso de cemento, y se requiere cuidado al adicionarlo a las mezclas ya que pueden influir en el hormigón de forma desfavorable [73].



Fig. 5. 6 Aditivos que se incorporan al cemento

Existen muchos productos, para conseguir diferentes efectos dependiendo de la aplicación. Se van a tratar los aditivos más comúnmente empleados:

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

*Aceleradores:* son productos que, añadidos al hormigón, adelantan el fraguado o el endurecimiento del mismo y, en general, ambos procesos a la vez. Son aceleradores de endurecimiento: los cloruros (calcio, sodio, aluminio, etc.), las bases alcalinas (sodio, potasio, amoníaco) y sus sales (carbonatos, silicatos, aluminatos, etc).

Debe recordarse que el calor es un acelerador de fraguado y endurecimiento, así como la cantidad de agua durante el mezclado, cuya disminución acelera el fraguado. Tradicionalmente, el producto más comúnmente empleado es el cloruro cálcico, que es el acelerador más eficaz que se conoce, especialmente en tiempo frío. Es importante tener en cuenta que la presencia de cloruros en el hormigón puede provocar fenómenos de corrosión en el acero.

*Retardadores:* los productos de partida empleados para retardar el fraguado del hormigón suelen ser sustancias orgánicas, principalmente los hidratos de carbono. Estos son de utilidad en tiempo caluroso, cuando la distancia de transporte del hormigón es grande. Suelen aumentar la retracción o tensión del hormigón, por esto, es importante realizar pruebas antes de utilizarlo. Como el empleo de los retardadores es delicado se recomienda sustituirlos por fluidificantes, pues estos actúan también como retardadores.

*Plastificantes y Fluidificantes:* son aditivos que aumentan la docilidad y trabajabilidad del hormigón, permitiendo emplear mezclas de hormigón que de otra forma no se podrían utilizar, o bien reducir el agua de amasado en beneficio de su resistencia o de la dosificación. Existen dos tipos de aditivos que aumentan la docilidad del hormigón: los plastificantes, que actúan mecánica y físicamente, permitiendo una cierta retención de agua; y otros productos llamados fluidificantes, que actúan mediante procesos físicos o químicos, permitiendo una reducción de agua.

*Aireantes:* ocluyen en la masa del hormigón infinidad de burbujas de aire, de 20 a 200 micras de diámetro, uniformemente repartidas y siguiendo una curva granulométrica continua que se solapa con la del cemento y los agregados finos de la arena, las cuales interceptan la red capilar del hormigón endurecido, mejorando así su resistencia a heladas y a agentes agresivos. Las ventajas de los hormigones con aire ocluido es que son más trabajables, homogéneos, impermeables y resistentes.

*Impermeabilizantes:* el agua puede penetrar en el hormigón sea por presión (depósitos), sea por capilaridad (contacto con medio húmedo). Cuando un hormigón ha sido correctamente dosificado y colocado, resulta en general impermeable por sí mismo. Los impermeabilizantes aumentan, por regla general, la retracción y pueden disminuir las resistencias si poseen efecto aireante [73].

### 5.1.5 Materiales en estudio

A continuación, se brinda una breve descripción de los materiales cementicios utilizados en las mediciones realizadas en este trabajo de tesis.

El *cemento Portland* se define como un cemento hidráulico porque fragua y endurece al reaccionar con el agua. Es producido por la pulverización de escoria que consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos, los que en forma usual contienen una o más formas de sulfato de calcio que se añade y muele con ella. El cemento no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más del peso del cemento y son: el silicato tricálcico, dicálcico, el

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

aluminato tricalcico y el aluminoferrito tetracálcico. Existen diferentes tipos de cemento Portland como son: el de escoria de alto horno, modificado (Tipo II), normal (Tipo I - Estadounidense), puzolánico.

El *Grout* (lechada de relleno), es un mortero hidráulico, estabilizador de volumen, no metálico, compuesto de cementos especiales, cargas minerales de granulometría controlada y aditivos dosificados especialmente para controlar los cambios de volumen en el mortero. Es altamente manejable en obra, de alta precisión en base a su expansión controlada. Se recomienda como relleno de expansión controlada para múltiples usos de anclajes, reparación de fallas de concretos y morteros, estabilizador de volumen en mezclas base de cemento, y resanes en general.

### 5.1.6 Causas de deterioro de estructuras de hormigón

Existen diferentes consecuencias del deterioro del cemento como son las fisuras, grietas y otros defectos en el hormigón en el estado fresco, debido a las acciones del medio ambiente y por esfuerzos estructurales.

#### ***Acciones del medio ambiente***

*Bajas o altas temperaturas:* la exposición reiterada a bajas temperaturas cercanas a la congelación del agua puede afectar la durabilidad de los hormigones. También afectan a los hormigones la elevada temperatura durante el proceso de fraguado y la exposición al fuego.

*Erosión y abrasión:* la abrasión es el desgaste producido por la acción del roce y fricción de partículas sólidas sobre la superficie de hormigón.

*Ataque químico:* son todos aquellos procesos de degradación causados por agentes agresivos, que proveen del ambiente externo (ácidos, sales, etc.).

#### ***Esfuerzos estructurales***

Básicamente, los esfuerzos generadores de fisuras son los primarios de tracción, compresión, y sus combinaciones de flexión y torsión (Fig.5.7).

La fisura por *tracción* aparece a lo largo de la pieza en sentido perpendicular a la actuación del esfuerzo de tracción.

La fisura por *compresión excesiva* siempre se manifiesta por tracción transversal, es decir, a través de grietas paralelas en la dirección del esfuerzo de compresión. Es la fisura patológicamente más alarmante porque denota el agotamiento del hormigón por acortamiento plástico y su manifiesto estado de rotura.

Las fisuras de *flexión* pueden tener su origen en un exceso de tracción, (fisuras perpendiculares a las armaduras) o en un fallo de la cabeza comprimida de hormigón que rompe en “copa” por tracción.

Las fisuras de *torsión* siguen la trayectoria de las tracciones compresiones helicoidales perimetrales de la pieza solicitada [88].

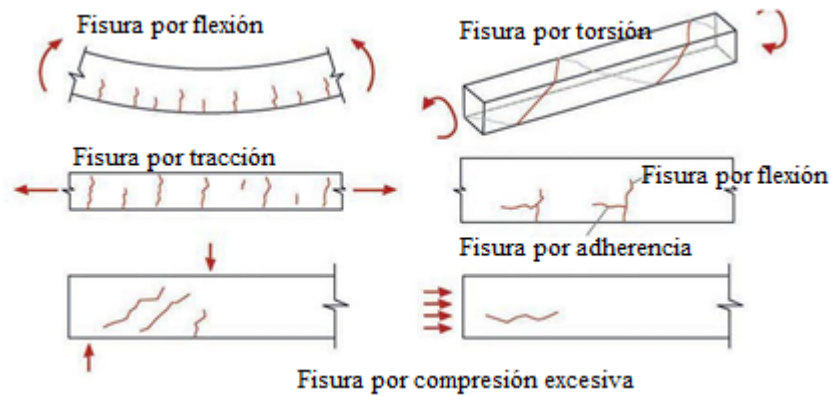


Fig. 5. 7 Fisuras debido a esfuerzos estructurales

### 5.1.6.1 Fisuras y grietas en el hormigón en estado fresco

El hormigón en condiciones normales presenta, durante un corto período de tiempo que generalmente se extiende entre 2 y 4 horas, un estado plástico y maleable que luego de ser mezclado permite transportar y colocar el material dentro de los encofrados (armazón formado por un conjunto de planchas metálicas o de madera convenientemente dispuestas para recibir el hormigón) para luego compactarlo y terminarlo. Este estado es conocido como estado fresco del hormigón. Luego de este corto período, el material endurece y pasa a un estado donde es capaz de tomar resistencia a través de las reacciones de hidratación de la pasta cementicia.

En estado fresco, cuando no se toman los recaudos necesarios, los defectos más frecuentes producidos son las fisuras de *retracción plástica* y las de *asentamiento plástico*. Cuando el hormigón está en estado endurecido, sólo tratará las fisuras no estructurales como las de contracción por secado y el mapeo o piel de cocodrilo [73].



Fig. 5. 8 Fisuras por asentamiento plástico



Fig. 5. 9 Fisuras por retracción plástica

Las fisuras por *asentamiento plástico* (Fig. 5.8) se producen frecuentemente en hormigones que no están adecuadamente diseñados, cuando un exceso de exudación produce una importante reducción en el volumen del hormigón en estado fresco. Este tipo de asentamiento tiende a ser más frecuentes en elementos de mayor espesor como vigas, tabiques y columnas, aunque en casos extremos también se presentan en losas y otras estructuras laminares cuando la exudación del hormigón resulta excesiva.

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

En el caso de las fisuras por *retracción plástica* (Fig. 5.9), se producen en elementos de tipo plano, e implica el hormigonado de grandes superficies no protegidas, como puede ser el caso de las losas de estructura, pavimento o piso, que al estar sometidas a condiciones atmosféricas que favorezcan una rápida evaporación del agua superficial (velocidad de evaporación mayor a la velocidad de exudación), sufren una contracción diferencial que genera fisuras. Este tipo de fisuras son en general relativamente cortas (2 y 3 mm, y van decreciendo conforme van profundizando en la pieza), poco profundas, pueden aparecer en el estado fresco del hormigón en condiciones ambientales desfavorables para el fraguado (días ventosos, con baja humedad y alta temperatura del aire). También es habitual que lleguen a atravesar el espesor de las losas, a diferencia de las fisuras por asentamiento plástico.

### 5.1.7 Fraguado del cemento

Las reacciones entre el cemento y el agua son la causa principal del fraguado (*setting*) del concreto. El fraguado del concreto (Fig. 5.10) es definido como el inicio de la solidificación de la mezcla. Los tiempos de fraguado inicial “ $F_i$ ” y final “ $F_f$ ” son definidos arbitrariamente por el método de resistencia a la penetración. El  $F_i$  representa el tiempo en el que el concreto fresco no puede ya ser mezclado adecuadamente, colocado y compactado, mientras que el  $F_f$  representa el tiempo después del cual la resistencia comienza a desarrollarse a una velocidad significativa.

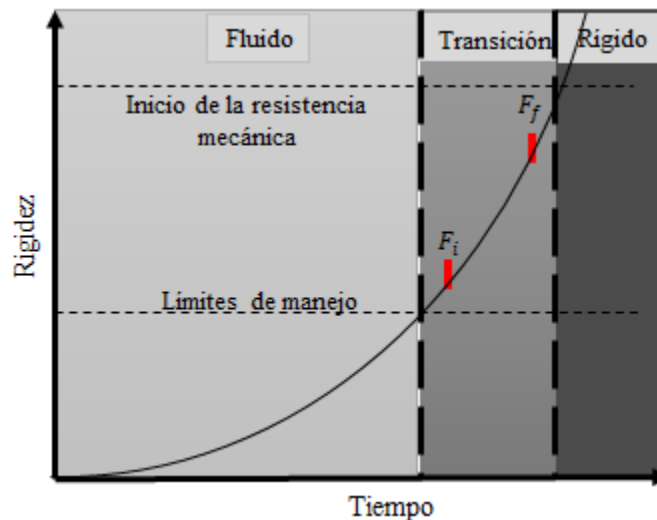


Fig. 5. 10 Proceso de fraguado y endurecimiento del concreto

Los factores principales que controlan los tiempos de fraguado son: la composición del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura y los aditivos. Puesto que los fenómenos de fraguado y de endurecimiento en una pasta de cemento hidratada son influidos por el llenado de espacios vacíos con los productos de la hidratación, la relación agua/cemento afectará los tiempos de fraguado. Por lo tanto, los datos de tiempo de fraguado en una pasta de cemento (cemento + agua) no coinciden con los tiempos de fraguado del concreto (pasta + agregados finos y gruesos) que contenga el mismo cemento, porque las relaciones agua/cemento, en los dos casos son por lo regular diferentes. Cuando más alta la relación agua/cemento, mayor será el tiempo de fraguado.



## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

Para monitorear convencionalmente el fraguado se utiliza “el testeo del tiempo de fraguado de una mezcla de concreto por resistencia (ASTMC 403)”. Este método proporciona un procedimiento estándar para la medición del tiempo de fraguado del concreto, compactándolo en un recipiente estándar y midiendo la fuerza requerida para hacer que una aguja penetre 25 mm en el mortero. Los tiempos de fraguado se determinan a partir de la curva de velocidad de solidificación contra el tiempo transcurrido.

### 5.2 Antecedentes de métodos utilizados para monitorear el fraguado de materiales cementicios

A continuación, se mencionarán algunos ejemplos de técnicas utilizadas para monitorear el fraguado de materiales cementicios. El modelo de contracción plástica propuesto por *A. Radocea ((1993) - Universidad Tecnológica de Chalmers, Gotemburgo, Suecia)* consiste en la medición de la presión del agua utilizando un tubo lleno de agua conectado a un transductor, y se basa en la idea de que los granos de cemento y agregados son incompresibles por lo que cualquier fuerza que actúa sobre la mezcla (el agua o las partículas sólidas) debe dar lugar a un aumento o una disminución en la presión del agua. *B. Glisic y N. Simon ((1999) - Laboratorio de Medición y Análisis de tensión, Instituto Federal Suizo de Tecnología, EPFL-IMAC, Lausana, Suiza)* utilizan el sistema de medición SOFO, que se compone de una unidad de lectura portátil, donde diferentes tipos de sensores ópticos y un paquete de software permiten el almacenamiento y la asistencia por ordenador para el análisis de un gran número de mediciones. Este sistema se basa en interferometría de baja coherencia, donde cada sensor se compone de dos fibras ópticas monomodo: la fibra de medición y la fibra de referencia [84]. *Kaufman ((2004) - Laboratorio de ensayos de materiales e Investigación en Suecia)* midió la contracción en edad temprana con un sistema láser y una placa reflectante ligeramente presionada en la pasta fresca. Las mezclas se introdujeron en un molde en forma de cono para asegurarse de que el cambio de longitud no se vea obstaculizado en una dimensión, el cual se registró con una resolución de 0.1  $\mu\text{m}$ . Para la medición de temperatura se utilizó una termocupla Pt 100 colocada en un tubo de vidrio lleno de aceite. Se comprobó que la contribución térmica era pequeña ya que la prueba se realizó en un ambiente controlado y la gran ventaja de esta medida es que puede monitorear el material después de ser mezclado [89]. *Volker Slowik ((2004) - Universidad de Ciencias Aplicadas Leipzig en Alemania)* utilizó la técnica basada en redes de Bragg de fibra óptica, para investigar la contracción en edad temprana de pastas de cemento [80].

### 5.3 Descripción de los esquemas de medida utilizados para monitorizar cambios dimensionales en materiales cementicios

En este capítulo, no se discute con mucho detalle el procesamiento de las señales que se obtienen con las técnicas utilizadas ya que se analizaron en los capítulos anteriores, particularmente en el capítulo 4 (donde se utilizan las FBGs y el IF para monitorear resinas dentales), siendo equivalentes los principios de medida. A continuación, se va a hacer una descripción de los esquemas de medida utilizados: las redes de Bragg (FBGs) embebidas en las muestras de cemento, el comparador mecánico de longitudes (CM) y el interferómetro de Fizeau (IF), en su configuración vertical (IFV), horizontal (IFH) y también se plantea un esquema combinando estas dos últimas configuraciones para evaluar el efecto de las

condiciones de restricción. Finalmente se describe un esquema en el que se integran los tres métodos de medida con el fin de poder comparar los resultados.

### 5.3.1 Redes de Bragg embebidas para evaluar los cambios dimensionales de materiales cementicios en estado fresco

En la Fig. 5.11 se muestra la configuración completa del sistema de interrogación para sensores FBG. La red de Bragg es embebida en una muestra de cemento, y es observada por reflexión mediante un interrogador óptico (Optical Sensing Interrogator – Micron Optics / modelo SM125) para realizar el seguimiento del proceso en estudio. Además, para evaluar los cambios de temperatura y desafectar su efecto sobre la red de Bragg, se utiliza una termocupla conectada a un multímetro digital. A partir de mediciones de longitud de onda  $\lambda$  [nm] y temperatura T [°C], es posible analizar el proceso de fraguado del cemento a partir de los cambios dimensionales de las muestras. Como se verá más adelante, las redes pueden medir dichos cambios *sólo* a partir de que el material bajo estudio se adhiera a ella y comience a tensionarla debido a los procesos químicos y físicos que ocurren durante su fraguado.

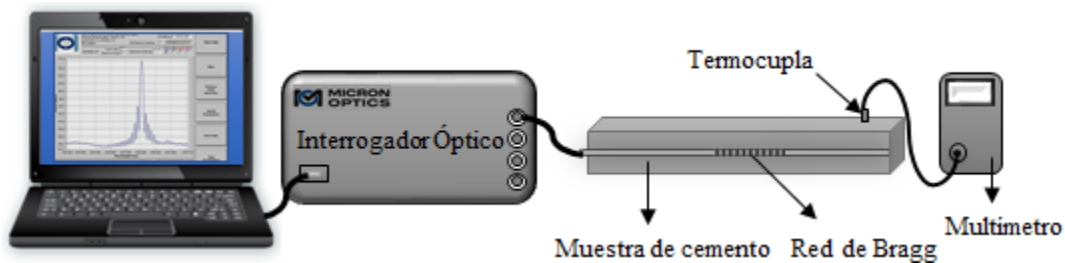


Fig. 5.11 Esquema de medida con FBG

Es importante tener en cuenta que durante el proceso de fraguado no existieron cambios significativos de temperatura ambiente, debido a que las medidas se realizaron en un entorno controlado.

Retomando las Ecs. 2.51 y 2.52 del Cap. 2, el cambio de tensión (strain -  $\Delta\varepsilon$ ) se define como:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0(1-p)} \quad (5.1)$$

A su vez, el cambio en la tensión mecánica aplicada al sensor FBG está relacionado con la deformación del material (expansión o contracción) mediante:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta L_{\text{FBG}}}{L_{0r}} \quad (5.2)$$

siendo  $L_{0r}$  la longitud inicial de la red (referencia de la medida) y  $\Delta L_{\text{FBG}}$  la deformación absoluta o cambio de longitud de la red.

En la Fig. 5.12 se muestra la implementación experimental de una medida realizada según el esquema de la Fig. 5.11.

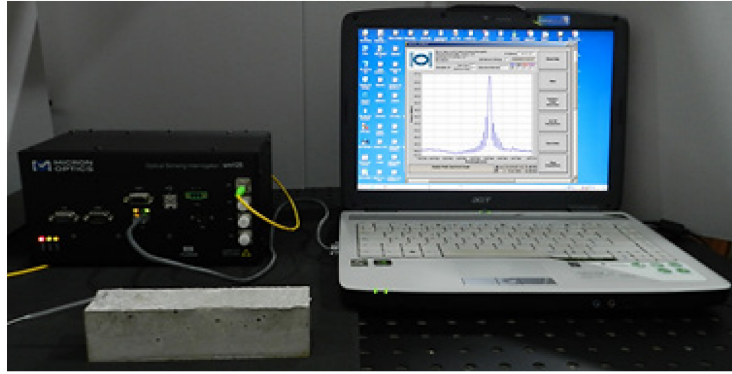


Fig. 5.12 Medida experimental con una red embebida en la muestra de cemento

### 5.3.2 Comparador de Longitudes Mecánico

Es un dispositivo comercial utilizado para determinar el cambio en la dimensión de la muestra de cemento una vez que el material se ha endurecido, aunque con un nivel de resistencia muy bajo. Permite realizar mediciones comparativas respecto al valor inicial de la longitud de la muestra. Este comparador de longitud mecánico digital (CM) (SCHWYZ™) tiene una resolución de 0.001 mm. Se utilizó para comparar su medida con los resultados obtenidos por medio de las técnicas de detección óptica.

En la Fig. 5.13 se ilustra el método de medición. Se utiliza una barra de acero con pernos, cuya longitud será considerada la longitud de referencia por ser ésta igual a la de la muestra inmediatamente después de que se retira del molde. En primer lugar, se coloca la barra ya mencionada en el montaje del comparador y la pantalla se ajusta a cero. A continuación, la barra de acero se sustituye por la muestra de cemento y se mide la diferencia entre ambas longitudes. A partir del valor medido, la deformación de la muestra de cemento puede ser determinada teniendo en cuenta la siguiente relación de longitudes:

$$\frac{\Delta L_M}{L_{0M}} [\%] = \left( \frac{\Delta L_M}{L_{0M}} \right) \times 100 \quad (5.3)$$

donde  $\Delta L_M$  es la lectura del comparador, y  $L_{0M}$  es la longitud inicial de la muestra medida mecánicamente. En la Fig. 5.14 se ilustra una medida experimental de una muestra de cemento, la cual se midió después de aproximadamente 24 h de preparada la mezcla, una vez retirada del molde cuando había adquirido cierto grado de rigidez.

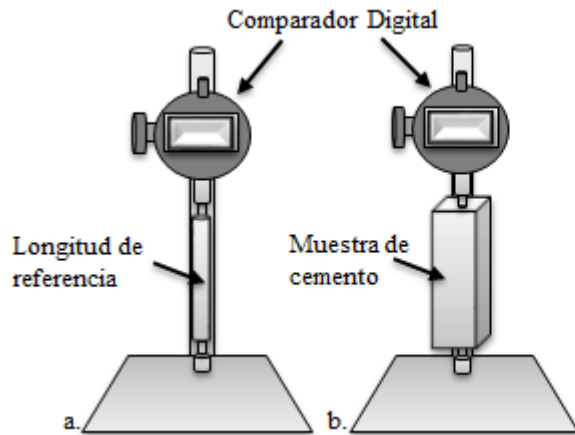


Fig. 5. 13 Esquema de medida con el CM



Fig. 5. 14 CM con la muestra de cemento

### 5.3.3 Implementación experimental del interferómetro de Fizeau

Las medidas de los cambios dimensionales con el Interferómetro de Fizeau se realizaron en dos direcciones. Inicialmente se implementó un esquema de medida en forma *vertical* que permitió caracterizar diferentes pastas de cemento, monitoreando su evolución desde el momento justo después de preparada la mezcla y por varios días luego de su endurecimiento. Estas pruebas permitieron evaluar la factibilidad de aplicación de la técnica. Posteriormente se cambió el esquema de medida a una configuración en forma *horizontal*, para realizar medidas en una dirección tal que sus resultados pudiesen ser directamente comparados con los arrojados por otras técnicas, particularmente los sensores de redes de Bragg embebidos. Para ello fue necesario colocar la mezcla en un molde que permitiera realizar las tres medidas (con IF, FBG y CM) de manera simultánea, aunque como ya se mencionó, sólo el IF y las FBG permitieron medir desde el estado fresco. Los resultados obtenidos con las tres técnicas fueron similares dentro de una incertidumbre relativa de  $10^{-4}$ .

#### 5.3.3.1 Configuración del interferómetro de Fizeau en forma vertical (IFV) simple

En la Fig. 5.15 se muestra en detalle la cavidad interferométrica formada entre el conector y la muestra de cemento, junto con una señal típica y suponiendo una contracción ya que  $d_f > d_i$ . El procesamiento de este tipo de señales se analizó con más detalle en el Capítulo 3. Retomando la Ec. 3.9 del cap. 3 (aquí renombrada como Ec. 5.4), se calcula la deformación absoluta de la muestra de cemento teniendo en cuenta la variación de longitud de la cavidad ( $\Delta L_{IF}$ ), determinada por:

$$\Delta L_{IF} [um] = d_f - d_i \quad (5.4)$$

La configuración del sistema de medida completo se muestra en la Fig. 5.16. Como sistema de iluminación de banda ancha se utiliza un diodo superluminiscente emisor de luz (*Superluminescent Light Emitting Diode* - SLED) cuya emisión está centrada en 1550 nm. El patrón de intensidad resultante, procedente de la cavidad interferométrica, se detecta y registra mediante un OSA (Yokogawa, modelo AQ6370B). Cabe mencionar que la muestra

Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

se coloca en un ambiente a temperatura constante. Con el esquema descrito es posible determinar si el material se expande o contrae.

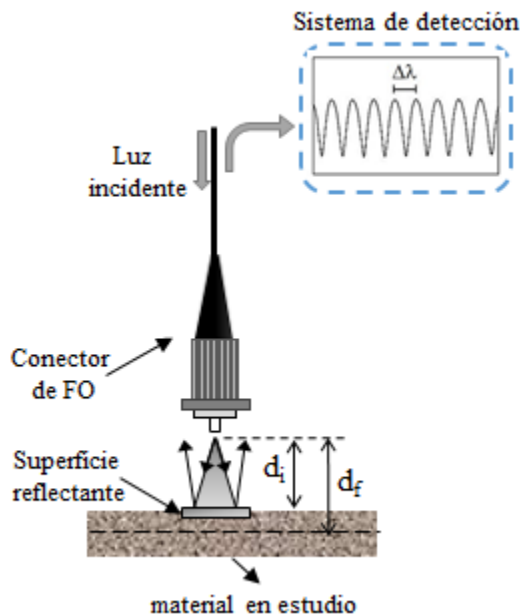


Fig. 5. 15 Cavidad interferométrica y señal típica

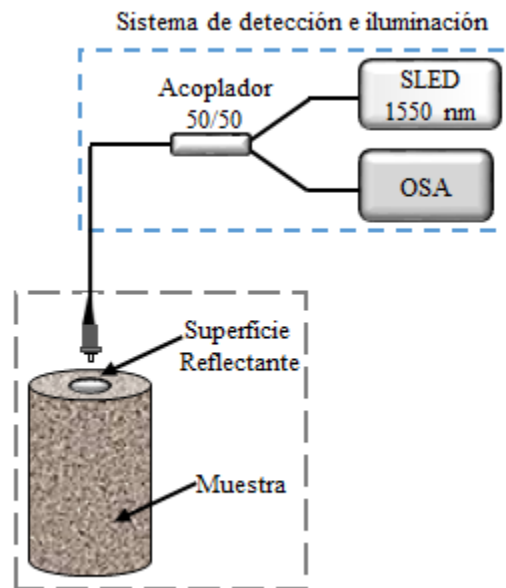


Fig. 5. 16 Esquema de medida del IFV

La medida experimental se comienza inmediatamente después de preparada la mezcla, la cual se coloca en un molde cilíndrico de paredes rígidas de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro como se observa en las Figs. 5.17 y 5.18. Con el fin de mejorar la intensidad reflejada por la superficie de la muestra y por lo tanto aumentar el contraste de las franjas, una pequeña lámina de aluminio se coloca sobre el material y se alinea cuidadosamente con el conector de fibra.

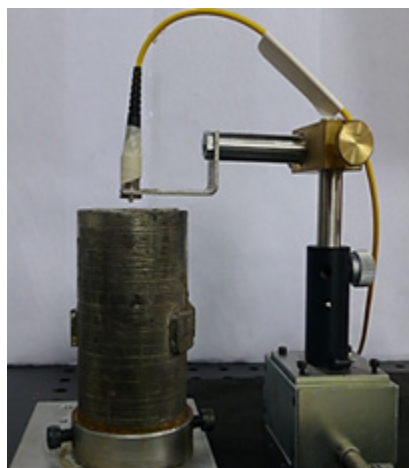


Fig. 5. 17 Fotografía del montaje vertical del I. F



Fig. 5. 18 Probeta con superficie reflectante

### 5.3.3.2 Configuración del IFV para medidas en simultáneo

Después de evaluar el funcionamiento del interferómetro de Fizeau en la configuración vertical, se planteó un esquema de medida para dos muestras en simultáneo de una misma mezcla y así corroborar que tan repetitivos son los resultados. El esquema utilizado se muestra en la Fig. 5.19, donde se observa que para medir de manera simultánea dos probetas se utiliza un *switch óptico* (1 × 2 Single-Mode Fiber Optic Switch, marca Newport) que requiere de la correspondiente fuente de alimentación de  $\pm 5V$ . Para adquirir los datos de la probeta 1 (P1) o de la probeta 2 (P2) se habilita uno u otro canal manualmente. En la Fig. 5.20 se ilustran dos probetas de la misma mezcla medidas simultáneamente con el IFV y en la Fig. 5.21 se muestran los equipos utilizados para la iluminación de las muestras y adquisición de datos.

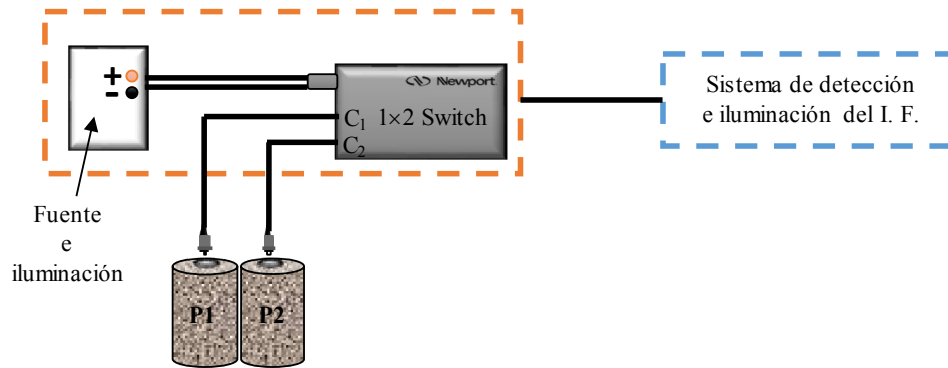


Fig. 5. 19 Esquema de medida de 2 muestras en simultáneo con el IFV utilizando un switch óptico

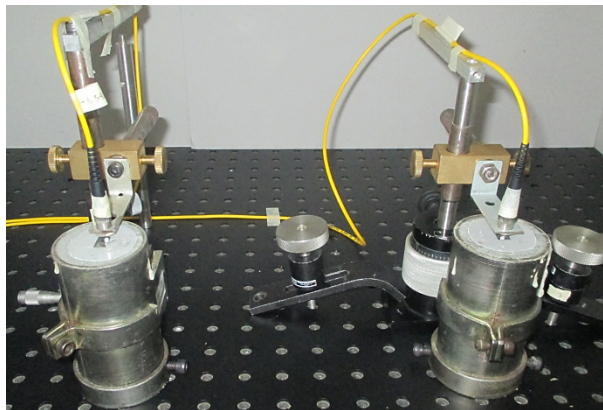


Fig. 5. 20 Probetas del mismo material medidas simultáneamente con el IFV



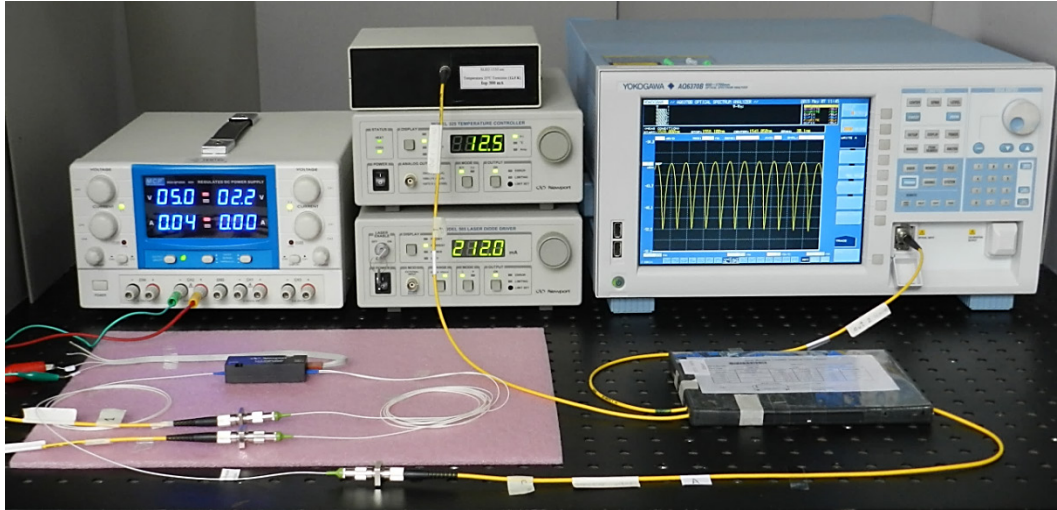


Fig. 5. 21 Instrumental utilizado para iluminar las muestras y adquirir las señales generadas con el IFV

### 5.3.3.3 Configuración del Interferómetro de Fizeau en dirección horizontal (IFH)

Para este tipo de configuración se colocaron dos placas de metal dentro de la muestra de cemento fresco, separadas una distancia  $L_{0F} = 100$  mm (Fig. 5.22). El conector de fibra óptica se fija a una de ellas, y se alinea con la superficie reflectante de la otra placa, siendo la distancia inicial entre ambos del orden del milímetro. En la Fig. 5.23 se muestra la implementación experimental del esquema de medición.

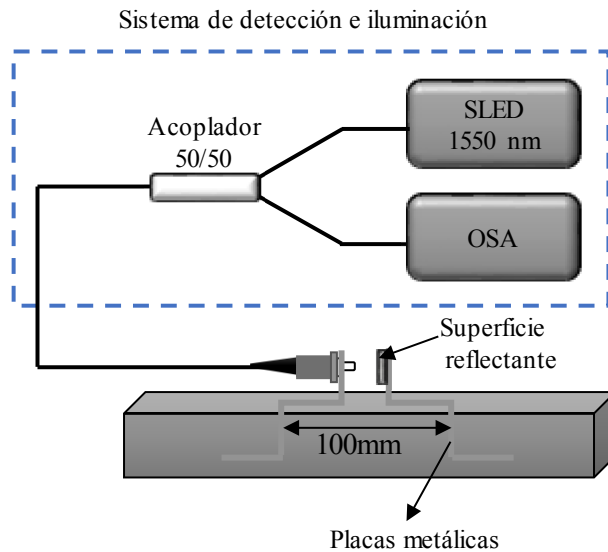


Fig. 5. 22 Esquema de medida del IF horizontal

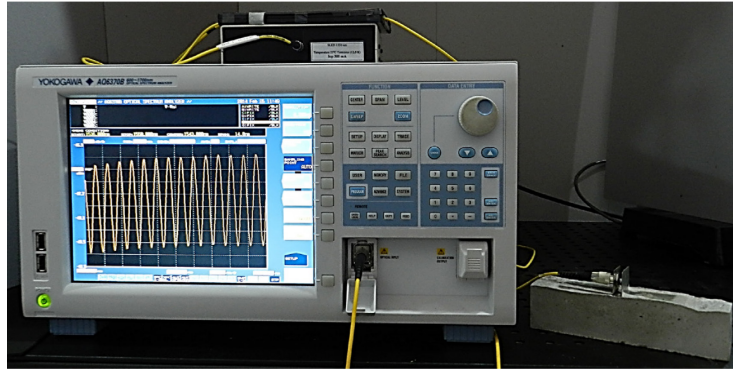


Fig. 5. 23 Implementación práctica del I. F. en forma horizontal

### 5.3.3.4 Medición de deformaciones con interferómetro de Fizeau para diferentes condiciones de restricción

En el caso de materiales cuya evolución final del fraguado da como resultado una expansión, resulta interesante tener en cuenta las limitaciones que puede llegar a imponer el molde utilizado para el estudio. Por lo tanto, para evaluar el efecto mencionado, las mediciones se realizaron usando un molde con un par de paredes "móviles", que permiten la expansión del material en la dirección correspondiente. El molde tiene una base con una superficie inicial de  $(175 \times 200) \text{ mm}^2$  que puede ampliarse a aproximadamente  $(200 \times 200) \text{ mm}^2$ , lo que hace posible la expansión del material en una dirección, que fue la utilizada para medir con un interferómetro Fizeau en la configuración descrita como "horizontal". Para ello, se colocó una lámina de acetato seguida de un trozo de gomaespuma entre cada una de las paredes y la mezcla a medir. La altura del molde, así como la altura inicial de la muestra fue de 100 mm. El esquema de medición simultánea con el interferómetro Fizeau en dos direcciones ortogonales (vertical y horizontal), así como la implementación experimental, se muestran en las Figs. 5.24 y 5.25, respectivamente. Como se puede ver, en ambas direcciones de medida, la longitud inicial de la muestra fue  $L_{0F} = 100 \text{ mm}$ .

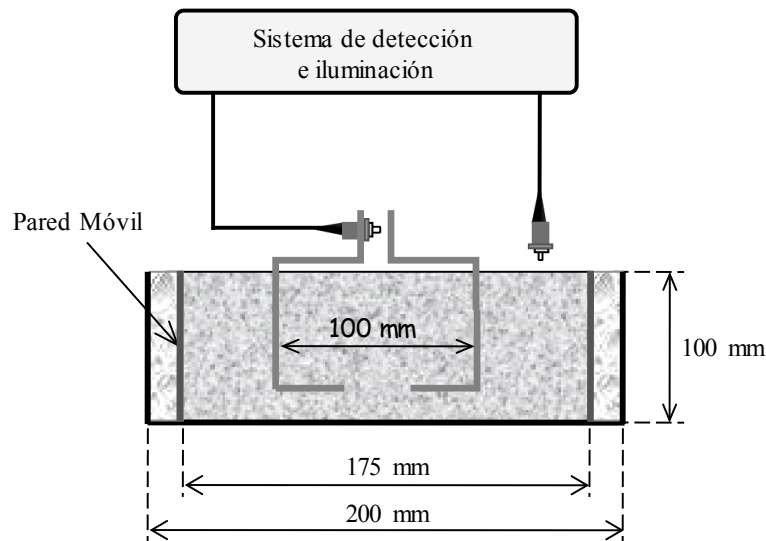


Fig. 5. 24 Montaje experimental para mediciones simultáneas con el interferómetro Fizeau en direcciones vertical y horizontal



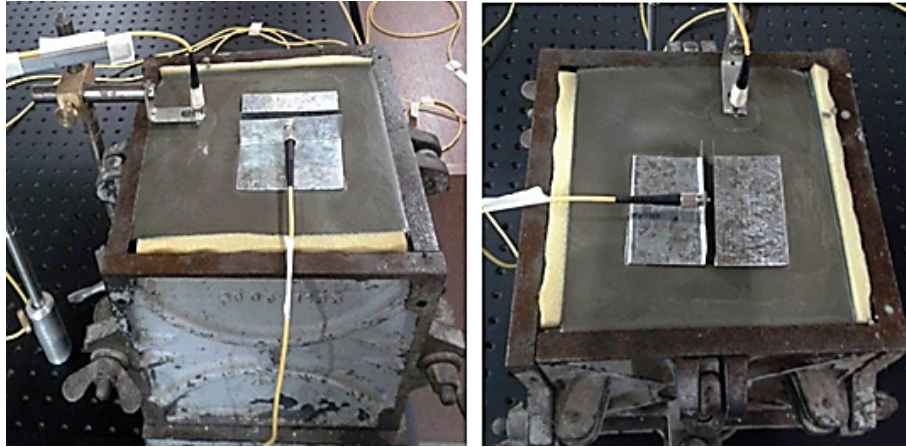


Fig. 5. 25 Vistas de la probeta medida con IFV e IFH

#### 5.3.4 Medida simultánea con dos métodos ópticos (IF y FBG) y un método mecánico convencional (CM), de la evolución dimensional del material en estado fresco

En la etapa inicial (estado fresco), la evolución dimensional de estos materiales sólo pudo ser monitoreada por medio de las técnicas ópticas. Una vez que las muestras endurecieron, se continuó midiendo en simultáneo también con el CM, como se muestra en la Fig. 5.26, lo que permitió comparar los resultados obtenidos con todas las técnicas.

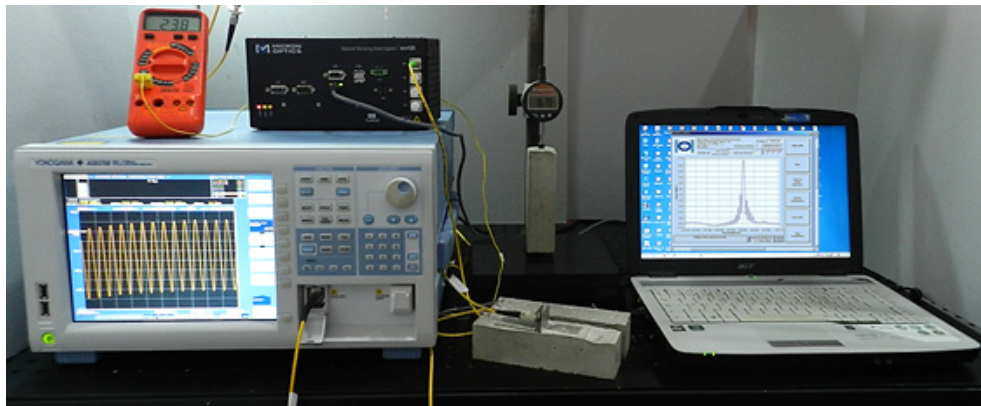
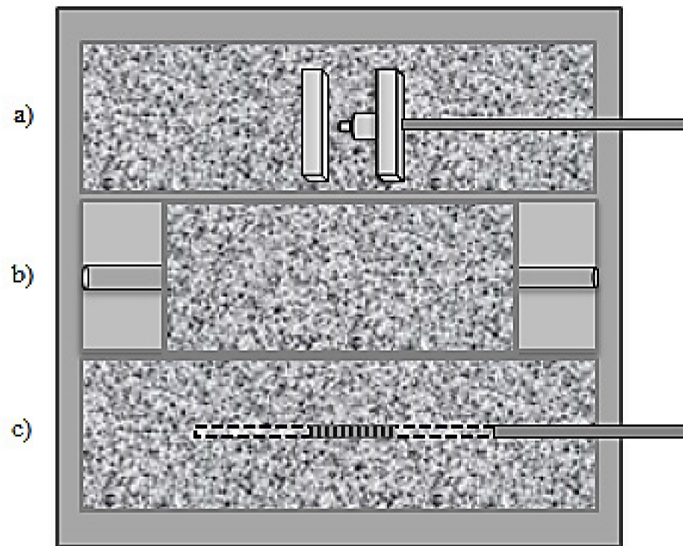


Fig. 5. 26 Medida experimental del cambio dimensional de materiales cementicios en forma simultánea con tres métodos: FBG embebida, IF y CM.

Una vez preparada la mezcla, se procede a la colocación de la muestra en un molde triple como el ilustrado en la Fig. 5.27, conformado por tres compartimentos exactamente iguales. Cada uno de ellos se acondiciona según el método a utilizar. El compartimento a) se utilizó para la medida con el IF en forma horizontal, por lo que se adaptaron dos soportes de metal que permitieron su implementación como en la Sección 5.3.3.3 (Fig. 5.22). En el caso del compartimento b), fue utilizado para la medida con el CM, por lo que se insertaron dos pernos en los extremos de la muestra de modo que permitan la posterior medición de su longitud. El tercer compartimento c) se utilizó para medir la muestra desde el estado fresco con una FBG embebida en ella. También se empleó una termocupla para poder medir los

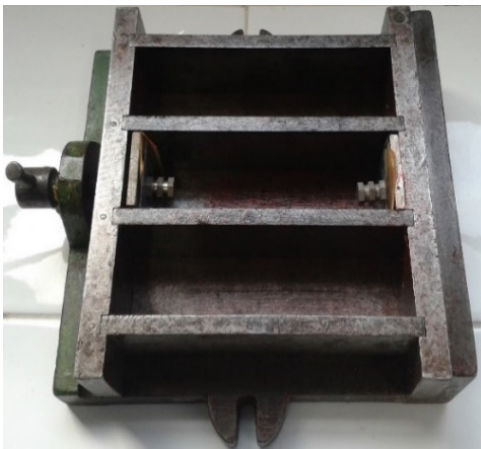
*Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco*

cambios de temperatura durante el proceso de fraguado. Una vez colocada la mezcla en los moldes, se comenzó la medición con el IF y las FBGs. El volumen de las muestras fue  $(158 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ .

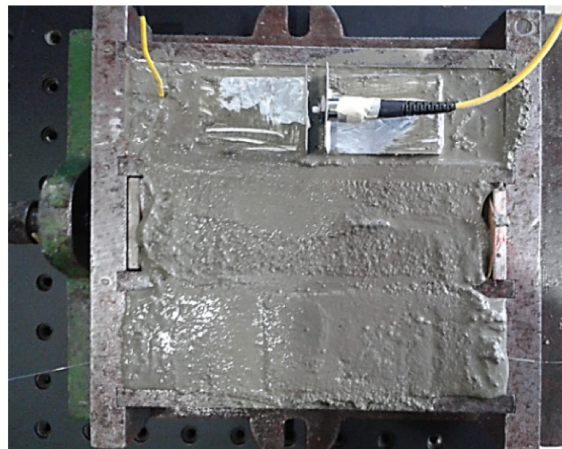


*Fig. 5. 27 Muestras en molde triple para medición simultánea con IFH, FBG y CM*

Después de aproximadamente 24 horas, cuando se solidificó el material, todas las muestras se retiraron del molde y la muestra b) se comenzó a medir mecánicamente. Desde ese momento, se continuó la prueba empleando los tres métodos simultáneamente. En la Fig. 5.28 se muestra el molde utilizado para la medida y en la Fig. 5.29 se muestra una foto del molde con la mezcla y el acondicionamiento descrito anteriormente de cada uno de los compartimentos, dependiendo del método de medida. En el caso del compartimento a) se pueden ver los soportes metálicos y el conector de fibra, así como la termocupla usada para medir la temperatura; en el b) se aprecia parte del montaje de los pernos que quedarán dentro del material, y en el c) se pueden ver tramos de fibra a ambos lados de la FBG embebida que sobresalen de dicho compartimento.



*Fig. 5. 28 Molde triple*



*Fig. 5. 29 Mezcla colocada en los moldes para medida experimental*

## 5.4 Resultados experimentales

A continuación, se van a mostrar los resultados obtenidos en diferentes pruebas que se plantearon para evaluar principalmente el *comportamiento de las técnicas ópticas* (FBGs y el IF) para monitorear cambios dimensionales en materiales cementicios. Inicialmente se prueban los diferentes sensores de manera independiente. Para ello se mide con una FBG embebida en el material y esta medida se compara con la realizada sobre la misma mezcla con el CM. Posteriormente, se muestran resultados obtenidos utilizando la configuración vertical del IF (simple y 2 muestras en simultáneo), con la que se caracterizaron diferentes pastas y morteros a base de cemento. Con esta técnica, fue posible detectar cambios dimensionales inmediatamente después de la preparación de la mezcla, considerando este instante de tiempo como el momento real de “*deformación cero*”. Se evaluó el efecto producido por la incorporación de algunos aditivos, así como el impacto generado por el cambio de la temperatura ambiente sobre las muestras. Luego, también se midió una muestra con el IFV y el IFH, con el fin de estudiar las condiciones de restricción que impone el molde en el que se realiza la medida. Finalmente, se midió en simultáneo con las FBGs y el IF, el material inmediatamente después de preparada la mezcla hasta alcanzar una cierta rigidización. A partir del momento en el que se logró el endurecimiento de las muestras, estos resultados se compararon con los obtenidos con un dispositivo mecánico comercial. Las mediciones realizadas con las técnicas mencionadas mostraron una buena concordancia entre ellas.

### 5.4.1 Medida con una red de Bragg embebida y el comparador mecánico

Con el fin de comparar los resultados obtenidos utilizando un sensor basado en FBG y el CM, la Fig. 5.30 muestra la deformación relativa experimentada por una muestra luego de 24 horas de preparada la mezcla. La misma estuvo compuesta por  $1635 \text{ kg/m}^3$  de un mortero comercial premezclado (Grouter ®) y  $367 \text{ kg/m}^3$  de agua [86].

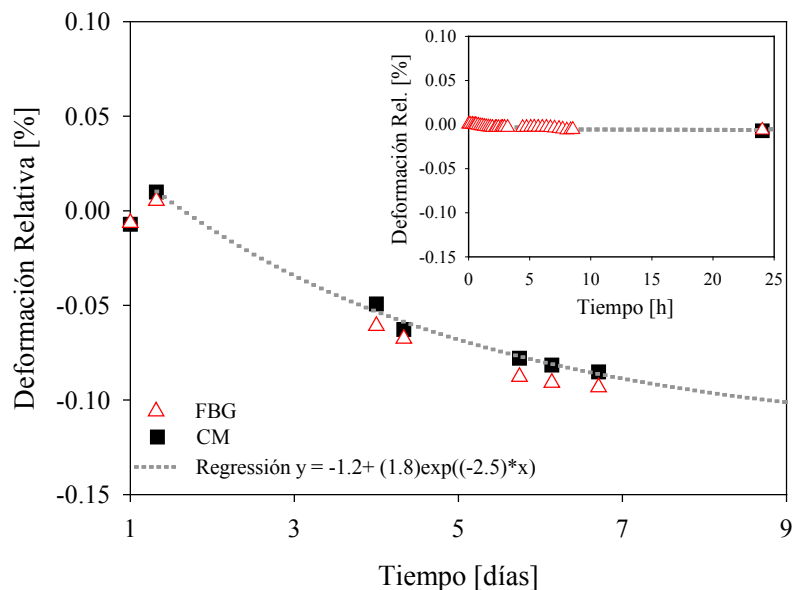


Fig. 5. 30 Medida con una FBG y el CM

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

En la Fig. 5.30 se puede notar una buena correspondencia entre la medida realizada con una FBG y el CM, lo que permite la validación del método óptico basado en sensores de redes de Bragg para el seguimiento de la evolución de la deformación de morteros de cemento, al menos a partir de que el material se ha rigidizado. Para este material, los resultados de las mediciones indican un nivel de contracción de  $\sim 0,10\%$  una vez que el sistema se estabilizó. En el inserto de la figura se señala el instante de comienzo de la medición por parte del comparador mecánico (a las 24 hs) y las medidas realizadas por la FBG desde el inicio del proceso. Además, es importante resaltar que la red de Bragg solo mide a partir de que el material se adhiere a ella lo cual, como se verá más adelante, representa una diferencia con el interferómetro de Fizeau.

### 5.4.2 Medida utilizando el interferómetro de Fizeau en dirección vertical (IFV)

#### 5.4.2.1 Medición simple

En la Fig. 5.31 se muestra el comportamiento de dos mezclas de cemento distintas al ser medidas con el IFV. Sus composiciones se indican en la Tabla 5.1. Se muestran los resultados obtenidos durante las primeras 8 horas luego de preparada la mezcla. En el caso de la medida sobre el material M1, se observa una expansión, probablemente porque la composición de esta mezcla no tiene arena. En el caso de las medidas sobre M2, el material se contrajo, un resultado esperado dado los componentes de la mezcla [86].

Mezcla	M1	M2
Agua	384	263
Arena	--	1360
Cemento	1710 Grout - (CG)	680 Portland - (CP)

Tabla 5. 1 Composición de las mezclas (en  $\text{kg/m}^3$ ) medidas individualmente con el IFV

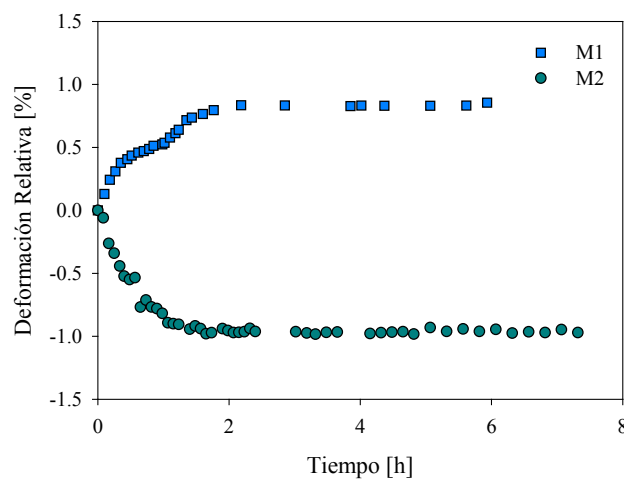


Fig. 5. 31 Medida de muestras individuales con IFV



#### 5.4.2.2 Medición en simultáneo de dos muestras

En la Fig. 5.32 se muestra la medida simultánea de 2 muestras independientes (P1 y P2) de la misma mezcla. La mezcla en estudio está compuesta de agua ( $240 \text{ kg/m}^3$ ), arena ( $1480 \text{ kg/m}^3$ ) y cemento Portland ( $480 \text{ kg/m}^3$ ). A esta mezcla no se le incorporaron aditivos, y la temperatura se mantuvo constante durante la medida en  $22^\circ\text{C}$ . La deformación relativa final de ambas muestras fue  $0.75\%$ , observándose una buena repetibilidad en los resultados. La muestra P2 presenta una especie de alteración al comienzo de la medida, posiblemente por un reacomodamiento del material en el molde, pero ello no modificó el comportamiento del material.

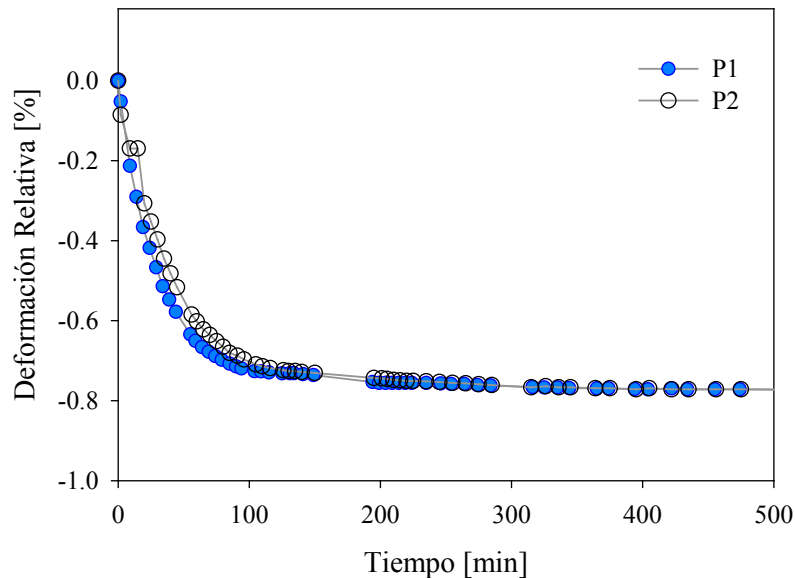


Fig. 5. 32 Medida simultánea de dos muestras iguales con IFV

Como puede observarse de las medidas realizadas, el interferómetro Fizeau es capaz de detectar cualquier cambio dimensional del material inmediatamente después de que la mezcla es preparada y el material es colocado en el molde, es decir, en estado fresco.

Luego de evaluar la técnica, se procedió entonces a la caracterización de diferentes pastas y morteros de cemento en estado fresco, utilizando la *configuración vertical del interferómetro de Fizeau*. Se midieron *dos series de mezclas a base de cemento*, con diferentes composiciones. En la “*serie 1*” se utilizó el IFV simple y se comparó el comportamiento de morteros que, según su composición, podrían tender a expandirse o contraerse durante las primeras horas después de preparada la mezcla. También se estudió el efecto de la temperatura ambiente sobre el nivel de deformación alcanzado. En la “*serie 2*” se utilizó el IFV para medir de manera simultánea dos muestras de la misma composición en cada prueba. Se estudiaron morteros de *alta resistencia*, aptos para la reparación de estructuras, que incorporan diferentes tipos y cantidad de adiciones minerales. La inclusión de partículas muy finas, como las de adiciones minerales, puede modificar la estabilidad dimensional de las mezclas. Además, como este tipo de morteros tiene un alto volumen de pasta, se incluyó en las medidas un mortero convencional

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

preparado con el mismo cemento. De esta manera se puede mostrar el efecto del volumen y la relación agua/cemento de la pasta.

La “*Serie 1*”, incluye 3 mezclas denominadas **A**, **B** y **C**:

- La **mezcla A**, fue un mortero de cemento convencional, hecho con un cemento Portland “rellenado” (CPF40 ®), arena y agua. El producto comercial mencionado se basa en una combinación de cemento Portland ordinario y relleno calcáreo, con alta resistencia mecánica, adecuada para morteros y hormigones.
- La **mezcla B**, se hizo con un mortero comercial premezclado (Grouter ®) y agua. Esta mezcla se ensayó a 22 y 38 °C.  
El producto comercial es una lechada de alta resistencia, adecuado para anclajes y rellenos, cuya formulación se basa en la combinación de cemento, aditivos especiales y agregados de tamaño de grano controlados. Una de las principales características de este producto es que debe mostrar una cierta expansión durante el estado fresco.
- La **mezcla C**, se preparó usando el mismo mortero B (Grout) con la incorporación de arena silíceo natural. Como en esta mezcla está presente un mayor volumen de material inerte, se espera una reducción en la expansión de la mezcla.

La “*Serie 2*” incluye cinco mezclas denominadas **D – H**, hechas con un cemento Portland ordinario (CPN50®), arena, agua, alto rango de reductores de agua (high range water reducer admixture HRWRA) y, en algunos casos, adiciones minerales. Se seleccionaron dos adiciones minerales con características muy diferentes, humo de sílice y relleno calcáreo. El *humo de sílice*, es un polvo muy fino y activo que contribuye a la resistencia del mortero; el *relleno (filler)* calcáreo es una adición inerte, de finura similar a la del cemento, que contribuye a la dispersión del cemento. Son morteros de alta resistencia que tienen muy baja relación agua/cemento.

- La **mezcla D**, es un mortero en el que no se incorporó ninguna adición;
- Las **mezclas E y F**, tenían la misma relación agua/cemento que el mortero D, pero incorporaron humo de sílice (E) o relleno calcáreo (F);
- En la **mezcla G** se utilizó una combinación de ambas adiciones minerales.
- Finalmente, la **mezcla H** era un típico mortero de fuerza convencional, con una relación agua/cemento igual a 0,50 y sin ninguna adición mineral.

Las principales características de cada mezcla se dan en la Tabla 5.2 [87].

Luego de procesar los datos adquiridos, se determina la deformación de los materiales bajo prueba. Las trazas en las Figs. 5.33, 5.34 y 5.35 corresponden a las mezclas de las series 1 y 2, respectivamente. Todos los experimentos se realizaron a 22 ° C. Como se puede ver, el principal cambio dimensional se produjo en las primeras dos horas luego de preparada la mezcla [87]. En la Fig. 5.33 se muestra que la “Mezcla A”, experimentó un proceso de *contracción*, mientras que las “Mezclas B y C”, mostraron una cierta *expansión* hasta que se estabilizaron. Como era de esperar en la “Mezcla C”, debido a la presencia de un mayor volumen de material inerte, *la expansión fue menor*. Con el objeto de evaluar el efecto de la temperatura ambiente, la mezcla B también se midió a 38 °C, y los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5.34.

Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

Mezcla de Mortero (kg/m <sup>3</sup> )	Serie 1			Serie 2				
	A	B	C	D	E	F	G	H
Agua	250	367	291	299	299	302	299	240
Arena	1290	--	580	800	660	665	660	1480
Grout	--	1635	1245	--	--	--	--	--
Cemnto Portland	645	--	--	1065	1065	1080	960	480
Tipo de Cemento	CPF40	--	--	CPN50	CPN50	CPN50	CPN50	CPN50
Humo de Sílice	--	--	--	--	107	--	107	--
Relleno (Filler) Calcareo	--	--	--	--	--	108	107	--
HRWRA	--	--	--	8.6	10.6	11.0	10.6	--
Agua/Cemento	0.39	--	--	0.28	0.28	0.28	0.31	0.50
Arena/Cemento	2.00	--	--	0.75	0.62	0.62	0.69	3.08
Agua/ Aglutinante (Binder)	0.39	0.22	0.23	0.28	0.25	0.25	0.25	0.50
Arena/Aglutinante (Binder)	2.00	--	0.47	0.75	0.56	0.56	0.56	3.08

Tabla 5. 2 Proporciones y materiales usados en las mezclas

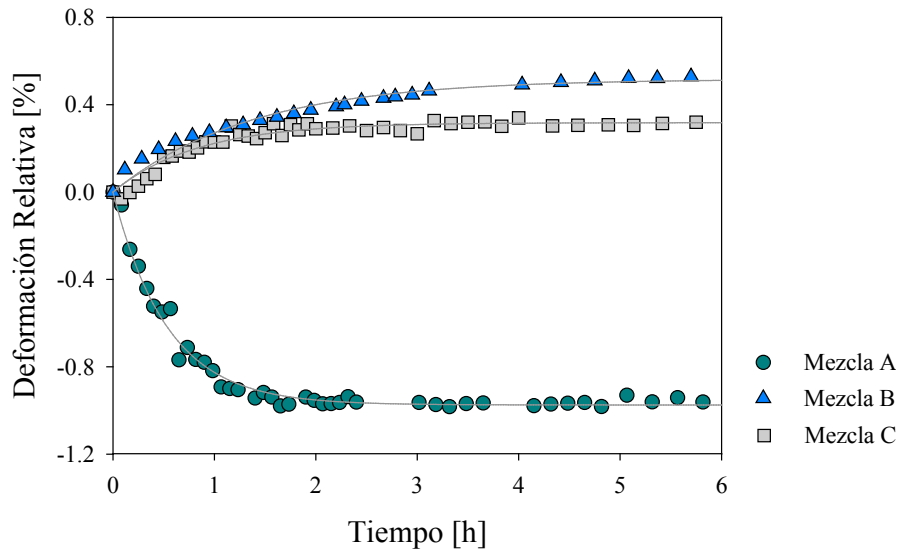


Fig. 5. 33 Evolución dimensional de las mezclas de la serie 1 (medidas a 22°C)

Como es bien sabido, las condiciones ambientales pueden afectar a las reacciones químicas del cemento. Las diferencias en la velocidad de hidratación pueden modificar la velocidad del proceso y el nivel de expansión experimentado. Para tener en cuenta el efecto de la temperatura ambiente, la expansión durante el proceso de endurecimiento de la “Mezcla B”

Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

fue también evaluada a 38°C. Como era de esperar, la tasa de expansión y la deformación relativa fueron bastante superiores en el caso de la temperatura más alta (Fig. 5.34).

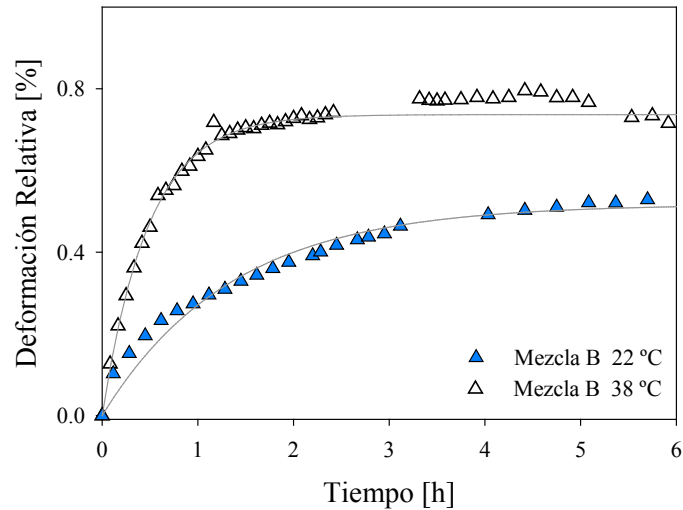


Fig. 5. 34 Efecto de la temperatura ambiente en el cambio dimensional durante el fraguado

Los cambios en el comportamiento de los morteros cuando se incluyeron algunas adiciones minerales se pueden observar en la Fig. 5.35. En este caso todas las mezclas se contrajeron durante el estado fresco, variando la magnitud de la deformación experimentada entre valores cercanos a 0.5 y 0.9% de acuerdo con el material ensayado (cemento + adiciones minerales) y las proporciones utilizadas. Comparando los morteros sin adiciones se puede ver que el mortero H convencional tuvo una contracción menor que el mortero D, debido al mayor contenido de arena (material inerte).

Se puede observar que, durante las primeras seis horas, cuando el material aún no se había endurecido, el *humo de sílice*, al ser un material muy reactivo y fino, aumentó la retención de agua y redujo la contracción del mortero (observar mezclas E y D) mientras que el *relleno calcáreo* aumentó la contracción (observar mezclas F y D). Cuando se usó una cantidad mayor de ambas adiciones de una manera combinada (mortero G) los cambios de volumen fueron más cercanos a la mezcla de referencia (D), pero fueron algo más pequeños [87].



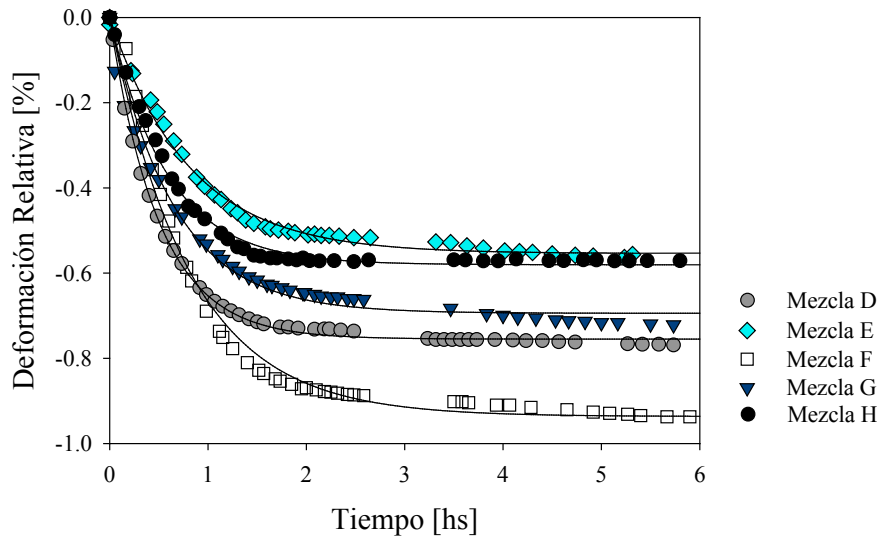


Fig. 5. 35 Evolución dimensional de las mezclas de la serie 2 (medidas a 22°C)

La evolución temporal de la deformación vertical de cada material fue ajustado con una simple curva exponencial del tipo:

$$y(t) = A(1 - \exp[-kt]) \quad (5.5)$$

donde A es la deformación relativa [%] y k es la tasa de evolución [tiempo<sup>-1</sup>]. La Tabla 5.3 muestra los coeficientes correspondientes para los diferentes materiales. Los parámetros de deformación relativa (valores positivos para los procesos de expansión) representan el valor medio límite obtenido después de ocho horas, mientras que k da una indicación acerca de la velocidad del proceso. Como se puede ver, para los materiales utilizados en este trabajo, los principales cambios dimensionales aparecieron en las primeras dos horas. Un aspecto a destacar es la baja dispersión de los resultados de la medición.

Muestra (22°C)	A [%]	K[hs <sup>-1</sup> ]
A	-0.97	1.88
B	0.52	0.74
B (38 °C)	0.74	2.1
C	0.32	1.21
D	-0.75	2.00
E	-0.55	1.24
F	-0.94	1.24
G	-0.69	1.55
H	-0.58	1.71

Tabla 5. 3 Parámetros utilizados para ajustar las curvas de evolución dimensional

### 5.4.3 Medición con interferómetro de Fizeau para diferentes condiciones de restricción

Se utilizaron las configuraciones IFV e IFH con el objeto de evaluar el efecto del molde en el que se coloca la muestra, sobre el cambio dimensional medido. En la Fig. 5.36 se muestra el proceso completo experimentado por la mezcla M2 (263 kg/m<sup>3</sup> de agua, 1360 kg/m<sup>3</sup> de arena, 380 kg/m<sup>3</sup> de cemento Portland) durante 14 días de medición. Una rápida expansión inicial se produjo durante las primeras 2-3 horas aproximadamente, y luego una ligera contracción empezó a tener lugar. Estos cambios que ocurren en las primeras horas no son detectables con las otras técnicas. Se puede ver un nivel diferente de expansión en ambas direcciones. En este esquema, la dirección horizontal se ve favorecida debido a que hay mayor grado de libertad pues, debido al peso de material, es más difícil expandirse en la dirección vertical que en la horizontal.

Es importante tener en cuenta que, si el sensor de Bragg o el comparador mecánico se incluyen en una medición, dado que no son capaces de detectar deformación en las primeras horas, el punto de partida (punto de deformación cero) que ellos adoptan no coincide con el real. La deformación es realmente cero en el momento en que finalizó la preparación de la mezcla, pero la medida en este instante puede hacerse solo con el interferómetro Fizeau. Por ejemplo, si la muestra correspondiente a la Fig. 5.37 hubiera sido medida sólo con la FBG o con el comparador de longitud mecánico, no se habría tenido en cuenta que el material había experimentado una expansión (en las horas previas) y, por lo tanto, el valor total de la deformación que se mediría sería incorrecto.

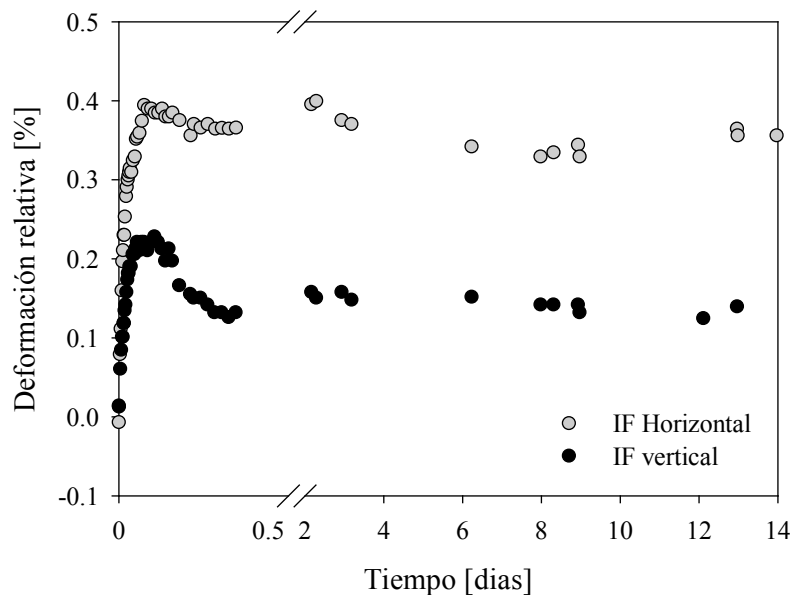


Fig. 5. 36 Evolución dimensional de la mezcla M2 medida con el IF en dos direcciones ortogonales: horizontal y vertical

Por último, con el fin de evaluar el efecto producido por las condiciones de restricción durante el proceso de solidificación del material, la Fig. 5.37 compara la deformación experimentada en la dirección vertical por una misma mezcla (M2) cuando es colocada en un molde con paredes fijas y cuando es colocada en un molde con paredes móviles. En ambos casos, la medición se llevó a cabo con el interferómetro Fizeau. En el caso del molde

## Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco

fijo, éste fue un cilindro de 50 mm de diámetro y una altura inicial de 100 mm. En el caso del molde con paredes móviles, se empleó un molde triple de  $(158 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$  descrito en la sección 5.3.4 (Fig. 5.27). En la Fig. 5.37 se puede observar claramente que cuando el material se expandió en la dirección vertical con paredes fijas, la deformación fue mayor que en el caso de paredes móviles porque la mezcla tenía libertad de movimiento en la otra dirección.

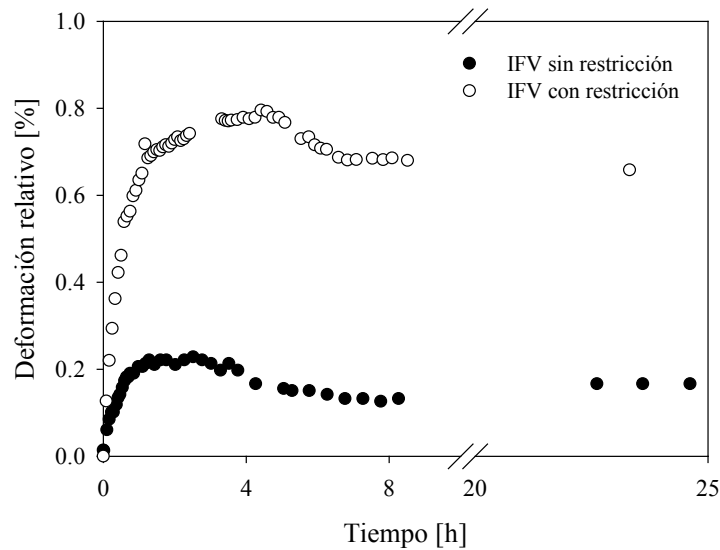


Fig. 5. 37 Comparación de los cambios dimensionales experimentados por M2 en dirección vertical, cuando se colocó en un molde con y sin restricciones

### 5.4.4 Mediciones comparativas en simultáneo utilizando una FBG embebida, el IF y un CM

Como se mencionó previamente, para poder hacer una medición comparativa es necesario que el material haya alcanzado algún grado de solidificación, momento a partir del cual puede medirse con el CM. Por lo tanto, las medidas comenzaron a llevarse a cabo alrededor de 24 horas después de preparadas las mezclas y se realizaron de forma continua durante 16 días. Ambas técnicas ópticas, el interferómetro Fizeau de fibra óptica y el sistema sensor basado en redes de Bragg, mostraron un comportamiento similar al comparador mecánico de longitudes.

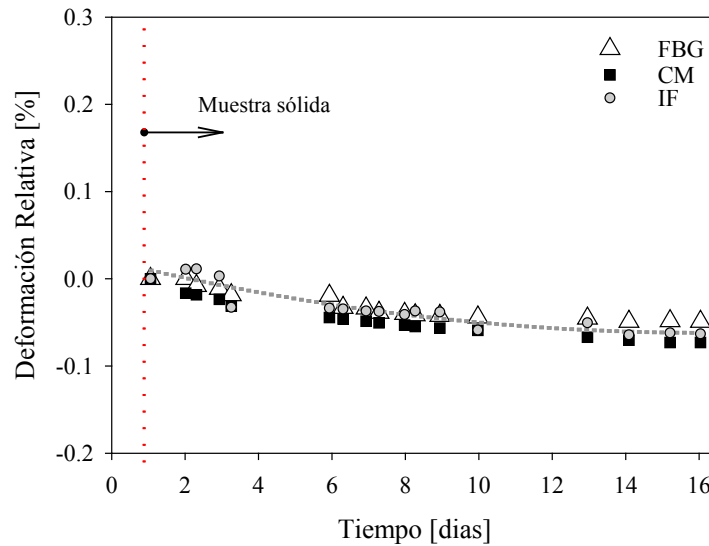


Fig. 5. 38 Comparación de los resultados obtenidos con tres técnicas: FBGs, IF y CM

Los resultados se muestran en la Fig. 5.38, donde se representa el porcentaje de deformación correspondiente al proceso de fraguado de la mezcla M1 (compuesta por 384 kg/m<sup>3</sup> de agua y 1710 kg/m<sup>3</sup> de Grout (Tabla 5.1)). A partir de la medición se puede observar que el material experimentó una leve contracción, alcanzando la misma un nivel de 0,05% después de 16 días.

En la Fig. 5.39 se muestra otra parte del proceso, durante las primeras 8 hs, cuando el material estaba aún en estado fresco. Se puede observar claramente una rápida expansión que ocurre en la muestra durante la primera hora después de la preparación de la mezcla, la cual sólo se observó por el interferómetro Fizeau. Con el fin de demostrar la repetibilidad de estos resultados, diferentes pruebas se realizaron con mezclas idénticas en condiciones similares, pero en diferentes días. En la Fig. 5.39, se representan dos de estos resultados (círculos negros y grises) observándose comportamientos análogos para diferentes muestras preparadas con la mezcla M1. Como puede verse a partir de la misma figura, el sensor FBG fue incapaz de detectar este cambio dimensional de la muestra, probablemente debido a que el material todavía no se había adherido a la fibra óptica, es decir, la FBG estaba libre para moverse dentro del material hasta que el proceso de solidificación comenzó a tener lugar. Además, la termocupla no mostró ningún cambio significativo en la temperatura del material, de modo que el sensor de Bragg no demostró cambios debidos a variaciones de temperatura.

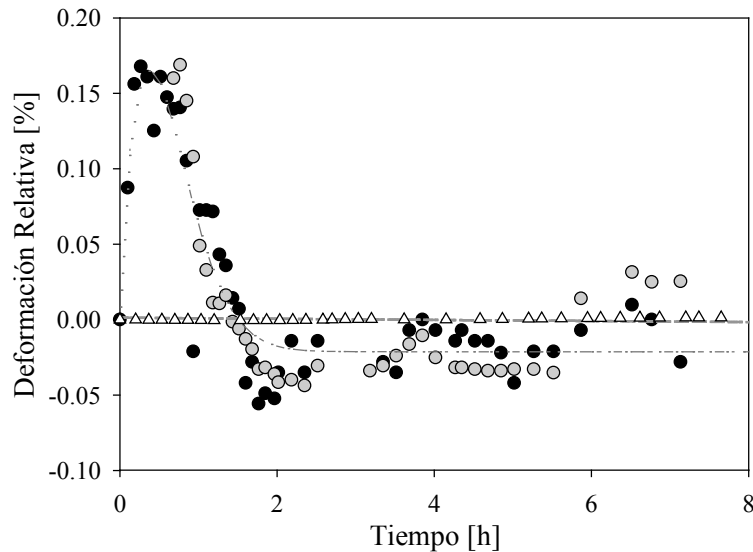


Fig. 5. 39 Evolución dimensional durante el estado fresco de dos muestras idénticas medidas con el Interferómetro de Fizeau (círculos grises y negros) y con el sensor de FBG (triángulos).

## Resumen del capítulo 5

Inicialmente se comparó la medida de una *red de Bragg* con la obtenida con el *comparador mecánico de longitudes* para monitorear los cambios dimensionales que ocurren durante el fraguado de mezclas cementicias. Con esta medida se logró corroborar la factibilidad de aplicación de las redes de Bragg para este tipo de mediciones, aunque sólo después de que el material se adhirió a ellas. Una vez que el material rigidizó como para empezar a medir con el comparador mecánico, se observó una muy buena correspondencia entre los valores obtenidos por ambos métodos.

Con el *interferómetro de Fizeau* se planteó inicialmente una configuración vertical para medir el cambio dimensional en esa dirección. Se determinó que esta técnica es capaz de detectar la contracción o expansión del material inmediatamente después de preparada la mezcla, instante real de deformación “cero”. Luego esta configuración fue modificada con el objeto de medir simultáneamente dos muestras del mismo material con la ayuda de un switch óptico, permitiendo evaluar la repetitividad de la medida. Con esta configuración se monitorearon muestras de mortero de cemento al que se incorporaron diferentes aditivos. Posteriormente también se configuró el interferómetro de Fizeau para medir deformaciones en dirección horizontal y se comparó esta medida con la obtenida en la configuración vertical, con el fin de evaluar diferentes condiciones de restricción impuestas por el molde.

Luego se probaron en simultáneo las tres técnicas (FBG, IF y CM), teniendo en cuenta que el registro de la medida comenzaría inicialmente solo con el IF por ser éste el único de los tres métodos que permite monitorear la muestra desde el instante “cero”. Con el método convencional la muestra debe tener cierto grado de rigidez para poder medir, mientras que con la red de Bragg solo es posible medir desde el momento en que el material se adhiere a ella. Además, es importante aclarar que el IF detecta cambios globales de la muestra, en cambio, la FBG por estar embebida y en contacto directo con la mezcla detecta actividad local. A partir del momento en que fue posible comparar los resultados arrojados por las diferentes técnicas, se observó una total correspondencia entre los mismos, lo que avala la

*Capítulo 5. Caracterización de cambios dimensionales de pastas de cemento y mortero en estado fresco*

aplicación de las técnicas ópticas para analizar los cambios dimensionales de mezclas de cemento desde el estado fresco. En las medidas realizadas no se observaron cambios significativos de temperatura, por lo tanto, se puede prescindir en este caso su contribución.

Para este estudio se trabajó en colaboración con el *Dr. Raúl Luis Zerbino* y la *Dra. Graciela M. Giaccio*, quienes proveyeron los moldes y materiales utilizados para elaborar las mezclas. Ambos se desempeñan en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata y en el LEMIT-CIC.

# Capítulo 6

## *Detección de defectos (grietas) mediante Redes de Bragg con Chirp*

### 6.0 Introducción

En el Capítulo 2 Sección 2.3 ya se han descrito los conceptos previos relacionados con las *redes de Bragg con Chirp* (CFBG) y las técnicas de simulación para este tipo de dispositivos (Capítulo 2 Sección 2.4), destacando el *Método de la Matriz de Transferencia* (MMT) por ser el que se utilizó en este capítulo para estudiar y desarrollar el modelo propuesto.

Las CFBGs grabadas en el núcleo de las fibras ópticas se han utilizado ampliamente en diversos tipos de aplicaciones [21], [90], particularmente en comunicaciones y como componente relevante en el desarrollo de sistemas sensores.

En el área de las comunicaciones, la distancia de transmisión de ondas de luz se ha incrementado dramáticamente por los grandes avances logrados en los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFAs). Como resultado de ello, la dispersión cromática de la fibra monomodo, se convierte en el factor limitante para sistemas de comunicación óptica de largo recorrido a alta velocidad. La solución de esta limitación es la inclusión de tramos de fibra con dispersión positiva o de redes de Bragg con chirp lineal para compensar dicha dispersión. En esta última opción, el grabado de redes es relativamente barato, compacto y compatible con el sistema de comunicación por fibra óptica [91]–[94].

Las CFBGs han sido utilizadas en el área de los sensores por que han demostrado una alta sensibilidad en la detección de esfuerzos, ya que la distribución de la deformación es evidente en el espectro de reflexión de la red. Otra aplicación de las CFBG es en la detección de gases peligrosos (como el metano), por la inmunidad a la interferencia electromagnética y su alta sensibilidad [95].

A partir de un modelo numérico, recientemente se ha simulado la respuesta espectral de una red sujeta a un perfil de deformación genérico [96]. Mientras que una FBG uniforme estándar puede medir solo la tensión promedio en su longitud total, una red chirpeada

puede proporcionar información directa sobre el perfil de deformación distribuido a lo largo de la red misma. De hecho, teniendo un período de red variable, este tipo de sensores tiene, en principio, una correspondencia uno a uno entre la longitud de onda del espectro de reflexión y la posición de la perturbación.

Las redes de Bragg con chirp lineal tienen un período que aumenta monótonamente y la longitud de onda de Bragg cambia linealmente con la posición. Debido a esto, el espectro de reflectividad se vuelve más ancho. En condiciones convenientes, las longitudes de onda del espectro se pueden relacionar con la posición a lo largo de la red. Por lo tanto, se han propuesto CFBG embebidas para localizar grietas en materiales compuestos [97] [98].

Más recientemente, se ha informado de un estudio experimental de desarrollo de daños por fatiga en reparaciones con parches en el material compuesto utilizando CFBG [99].

La detección de la ubicación de grietas transversales (cracks) mediante una red con chirp embebida en un plástico reforzado con fibra de carbono, mediante el análisis del espectro de reflexión de la CFBG en función de la posición a lo largo de la red, ha sido demostrada en publicaciones recientes [8-10].

Con el fin de obtener una metodología precisa para determinar la posición y el ancho de grietas, fisuras o fracturas que se generan en materiales (por ejemplo, durante los procesos de curado o fraguado), en este capítulo se plantea un modelo para el análisis de redes de Bragg con chirp que permite resolver dichas cuestiones mediante la observación de los cambios producidos en el espectro de reflexión y el retardo de grupo por estas fallas, a las que llamaremos “defectos” [100]. Se realizará un análisis riguroso que permitirá presentar un modelo simple en términos de un Fabry-Perot efectivo que represente la mayoría de los resultados obtenidos con las simulaciones numéricas. Este modelo tiene en cuenta la longitud efectiva de una FBG [101]. Finalmente, también se proporcionan algunos resultados experimentales preliminares.

## 6.1 Modelo para determinar la posición de un “defecto” generado dentro de una red de Bragg con chirp analizando el espectro de reflexión y retardo de grupo

A continuación, se describe el *modelo planteado* para determinar *la posición y tamaño de una fractura (crack)* utilizando una red de Bragg con chirp (CFBG). La red es simulada utilizando *el Método de la Matriz de Transferencia (MMT)*. Se realizan diferentes pruebas sobre el modelo propuesto, con el objetivo de analizar cómo es su comportamiento al variar parámetros como el tamaño y la posición de la grieta o fractura.

### 6.1.1 Descripción del modelo

Una red de Bragg con chirp es embebida en un material (por ej. cementiceo, polimérico, etc.) o fijada superficialmente sobre él, y el hecho físico analizado consiste en la *aparición de una grieta (defecto)* en un momento determinado (Fig. 6.1). Como aproximación, se considera que la fractura *no evoluciona*, es decir, que aparece en un determinado instante y su tamaño permanece invariante, mientras que el resto del material se contrae o expande dependiendo del esfuerzo aplicado. En términos del modelo simulado, los análisis de los



resultados deberían ofrecer certeza en la determinación de *la posición y ancho del defecto generado dentro de una red con chirp.*

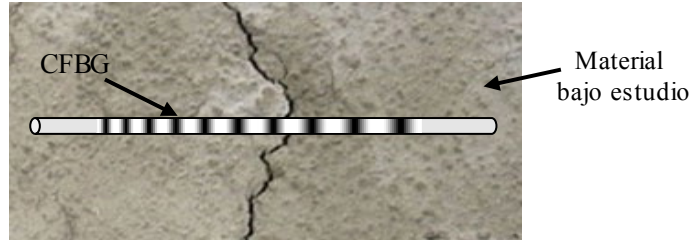


Fig. 6. 1 Ilustración de una CFBG embebida o fijada superficialmente en un material

El modelo consiste en una CFBG dividida en tres sub-redes  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , tal como se ilustra en la (Fig. 6.2) donde la red está sin tensionar (por ello, en la figura se indica el eje  $z$  (eje de la fibra) igual a cero y la longitud de onda  $\lambda$  igual a la longitud de onda inicial  $\lambda_i$ ).

Se asume que la red  $R_2$  corresponde a la fractura que aparecerá en el material, la cual se tratará de localizar. Para ello, en el modelo se presupone el lugar donde se producirá la fractura y su ancho. La red  $R_2$  se denomina “defecto” ya que sus parámetros permanecen invariantes ante cualquier deformación que afecte a la CFBG, por lo tanto, si a la red se le ejerce alguna tensión solo se verán afectadas las porciones de red  $R_1$  y  $R_3$ .

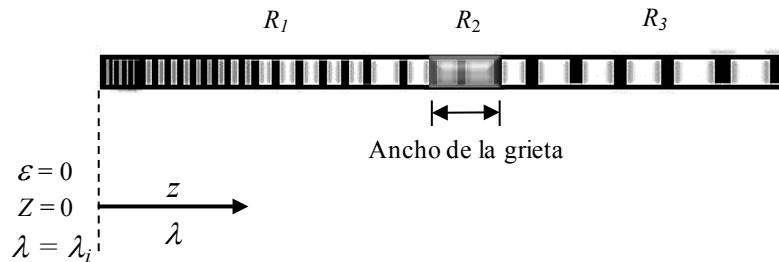


Fig. 6. 2 Detalle de la CFBG usada para la simulación, sin ejercer tensión

#### 6.1.1.1 Definición de los parámetros usados para modelar una CFBG

Para definir los parámetros de cada una de las sub-redes, se supone una CFBG de longitud “ $L$ ”, en la que “ $\lambda_B$ ” es la longitud de onda de Bragg, “ $\Delta n$ ” es la variación de índice de refracción, “ $\Delta\lambda$ ” es el ancho de banda de la red con chirp y “ $N$ ” es el número total de secciones en las que se divide la red. También se definen 2 densidades lineales: una de ellas ( $\sigma_1$ ) para calcular el número de secciones que corresponde a cada una de las porciones en que se divide la red total y otra ( $\sigma_2$ ) para calcular el ancho de banda de cada una de esas porciones ( $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ ). Se calculan primero las densidades correspondientes a  $R_2$  (*defecto*) ya que se suponen conocidos e inalterables su tamaño y posición. Posteriormente se calculan las respectivas densidades de  $R_1$  y  $R_3$ .

Por ejemplo, si la red total tiene una longitud física de 50 mm y si se considera que  $R_2$  está localizada en el centro y que tiene 2 mm de longitud, entonces  $R_1$  tiene el mismo tamaño que  $R_3$  (24 mm cada una). Además, considerando que la CFBG total tiene un ancho espectral  $\Delta\lambda = 1$  nm, está centrada en  $\lambda_B = 1543.81$ nm, y utilizando las expresiones indicadas en las Ecs. (6.1) para calcular  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , resultan los valores indicados en la Tabla

6.1. Para ello, se emplean los valores de las densidades para calcular primero “ $N$ ” y “ $\Delta\lambda$ ” para el defecto ( $R_2$ ) y a partir de allí se hallan los correspondientes a las otras dos redes  $R_1$  y  $R_3$ .

$$\sigma_1 = \frac{N}{L} \quad y \quad \sigma_2 = \frac{\Delta\lambda}{L} \quad (6.1)$$

CFBG	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$L$	24 mm	2 mm	24 mm
$\lambda_B$	$\lambda_{B1} = 1544.07$ nm	$\lambda_{B2} = 1543.81$ nm	$\lambda_{B3} = 1543.55$ nm
$\Delta n$	11e-5		
$\Delta\lambda$	0.48 nm	0.04 nm	0.48 nm
$N$	48	4	48

Tabla 6. 1 Parámetros del modelado de la CFBG

En la Fig. 6.3 se muestra el espectro de reflexión y retardo de grupo de la red con chirp correspondiente al ejemplo mencionado, modelada a partir del subconjunto de tres redes  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ . Se supuso además que la CFBG tiene un 90% de reflectividad. En la figura se representa también el espectro de reflexión correspondiente a un defecto ( $R_2$ ) de 2mm que presenta una forma tipo gaussiana.

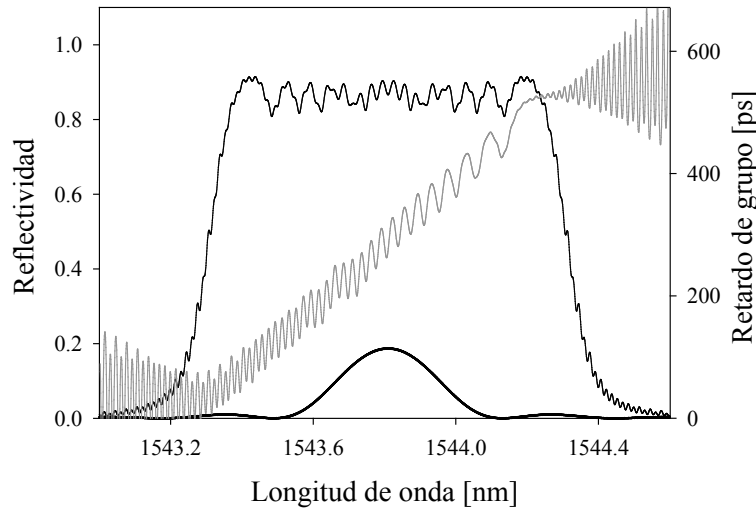


Fig. 6. 3 Espectro de reflexión y retardo de grupo de la CFBG modelada

### 6.1.1.2 Modelado de la deformación de la red

Inicialmente se describió el modelo planteado y se mostró en la Fig. 6.3 la respuesta de la CFBG sin someterla a ninguna deformación. Ahora se va a analizar el mismo cuando la CFBG se tensiona. Dicha deformación se produce debido a que el material bajo estudio se adhiere a la red y las contracciones o expansiones del mismo afectan también a ésta. Para comprender cómo la deformación afecta el modelado de la red, en la siguiente figura se ilustra el sistema de redes ubicándolo sobre una escala espectral. Se observa que, bajo tensión, dos de las redes ( $R_1$  y  $R_2$ ) se superponen (aun cuando  $R_2$  permanece en la posición espectral original) y  $R_3$  se desplaza espectralmente. Esto tiene como consecuencia la aparición de un hueco o ventana espectral, ilustrada en la Fig. 6.4.

Para estudiar el modelo es necesario variar diferentes parámetros y analizar su respuesta. Como ya se había aclarado en el planteamiento del modelo, cuando se deforma la red total, la  $R_2$  (defecto) se mantiene invariante, pero las redes  $R_1$  y  $R_3$  modifican sus parámetros ya que experimentan la deformación. Los espectros de reflexión de estas dos porciones de red ( $R_1$  y  $R_3$ ) se desplazan hacia longitudes de onda más largas cuando se estira la fibra como se representa en la Fig. 6.4.

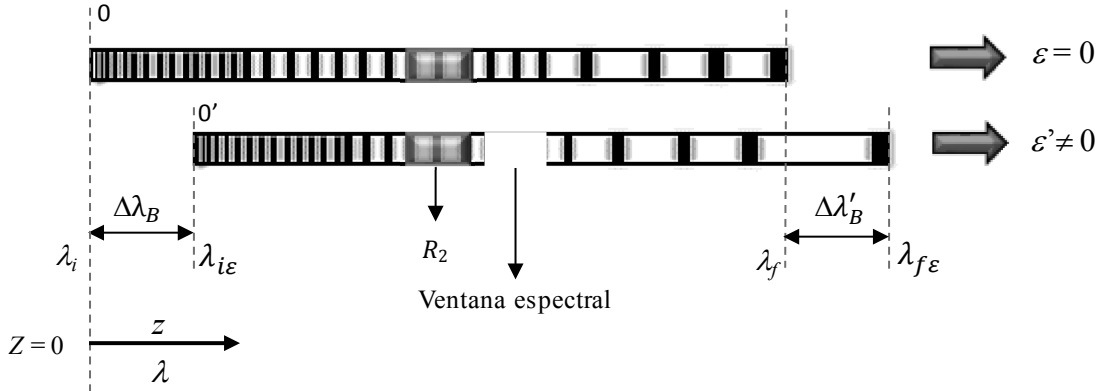


Fig. 6. 4 Representación del efecto espectral del estiramiento de la CFBG

Para calcular la variación de la longitud de onda de Bragg ( $\Delta\lambda_B$ ) de la red  $R_1$  y de la red  $R_3$  por efecto de la tensión aplicada, dando lugar a la aparición de la ventana de transmisión, es necesario retomar la relación de dependencia entre el cambio en la longitud de onda de Bragg y la deformación unitaria producida sobre la red por una tensión externa (ver Capítulo 2, Sección 2.7.3). En general, se tiene:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\varepsilon \quad (6.2)$$

donde  $\Delta\lambda_B$ , es la variación de la longitud de onda de Bragg,  $p_e = 0.212$  es el *coeficiente fotoelástico* de la fibra y  $\Delta\varepsilon$  es el cambio relativo o unitario de longitud.

En nuestro caso,  $\Delta\varepsilon$  es el cambio unitario de longitud de las redes que se deforman, o sea:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta L_{R_1}}{L_{R_1}} = \frac{\Delta L_{R_3}}{L_{R_3}} = \frac{\Delta L'}{L'} \quad (6.3)$$

siendo  $L_{R_1}$  la longitud inicial de  $R_1$ , mientras que  $L_{R_3}$  es la longitud de  $R_3$  antes de aplicar tensión,  $\Delta L_{R_1}$  y  $\Delta L_{R_3}$  son las deformaciones absolutas de cada una de las redes,  $\Delta L'$  el cambio de longitud total experimentado por las porciones de CFBG que se deforman (o sea,  $\Delta L' = \Delta L_{R_1} + \Delta L_{R_3}$ ) y  $L' = L_{R_1} + L_{R_3}$  es la longitud inicial de la porción de la CFBG total que resulta tensionada (ya que la  $R_2$  no se deforma).

Por otro lado, si denominamos “ $l$ ” a una porción o longitud de fibra en la cual está contenida la CFBG, la cual se deformará o cambiará su tamaño en una cantidad  $\Delta l$  por efecto de la tensión experimentada, también se verifica que  $\Delta\varepsilon$  es el cambio relativo de su longitud, es decir:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (6.4)$$

Como se verá más adelante, al implementar experimentalmente la situación modelada, “ $l$ ” es la distancia entre los puntos de fijación de la fibra al material bajo estudio.

### 6.1.1.3 Estudio preliminar del comportamiento del modelo

Después de tener ya planteado el modelo, y de tener claro cuáles son los parámetros necesarios para simular la deformación, se procede a hacer diferentes pruebas a fin de evaluar su comportamiento. En todos los casos se analizarán los espectros de reflexión y las correspondientes distribuciones del retardo de grupo. En la Prueba 1, se aplican diferentes *grados de deformación* al sistema; en la Prueba 2, se cambia la *posición del defecto* y en la Prueba 3, se cambia el *tamaño del defecto*.

#### Prueba 1. Generación de diferentes grados de deformación

En esta prueba se le generó un grado determinado de deformación a la red estirando la fibra. Recordemos que la red  $R_2$  (defecto) mantuvo sus parámetros invariantes, por lo tanto, solo se afectó a las dos redes laterales  $R_1$  y  $R_3$ . En la Fig. 6.5 se muestra la misma red simulada en la Fig. 6.3, pero esta vez sometida a diferentes deformaciones.

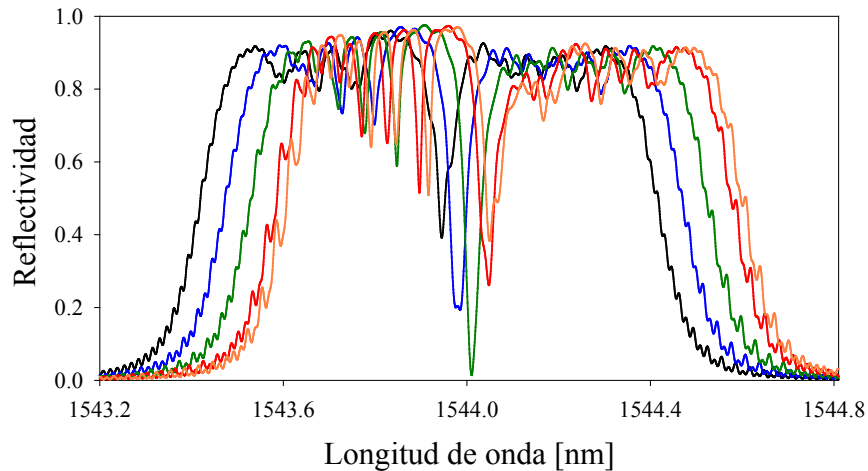


Fig. 6. 5 Espectro de reflexión de una CFBG sometida a diferentes tensiones: (—)  $90 \mu\varepsilon$ , (—)  $136 \mu\varepsilon$ , (—)  $181 \mu\varepsilon$ , (—)  $227 \mu\varepsilon$  y (—)  $245 \mu\varepsilon$

En la Fig. 6.5, se puede notar que a medida que se va tensionando la red, su reflectividad se va desplazando hacia longitudes de onda más altas. El espectro mantiene su forma, sin embargo, a medida que aumenta la deformación, el pico que forma la ventana de transmisión resulta cada vez más pronunciado hasta alcanzar su máxima amplitud. Si se sigue incrementando la tensión, se observa que el pico va disminuyendo su amplitud hasta desaparecer. Es decir, la aparición de la *ventana de transmisión en el espectro de reflectividad de la red, es un proceso cíclico*.

Prueba 2. Cambio de posición del defecto

Aquí se analiza el sistema cambiando la posición del defecto o perturbación sobre la CFBG (aunque se mantiene su tamaño en 2 mm) y se aplica tensión de manera similar al caso anterior. Se plantean tres situaciones: A, B y C como muestra la Fig. 6.6, las cuales corresponden a las siguientes posiciones del defecto sobre la red: 25 mm, 30 mm y 45 mm, medidos a partir del extremo de menor período.

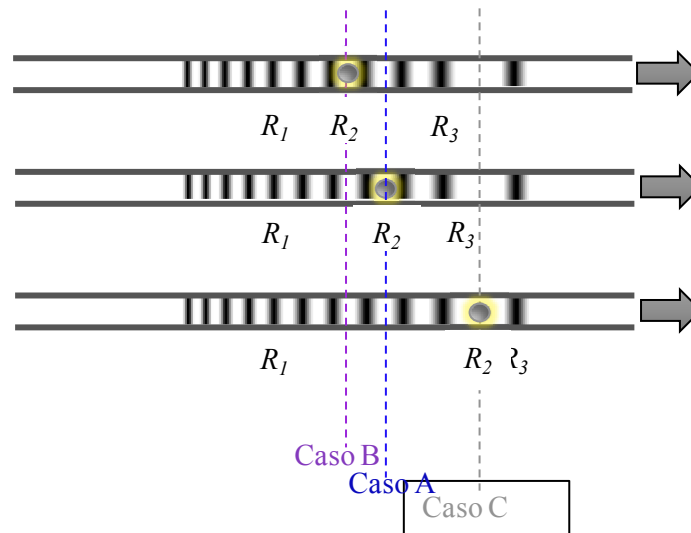


Fig. 6. 6 Cambio de posición de la perturbación sobre la CFBG

De manera similar al caso anterior y debido a la deformación aplicada, las longitudes de onda correspondientes a  $R_1$  y  $R_3$  se desplazan hacia valores más grandes. Partiendo de los resultados de la Prueba 1, para cada posición del defecto se analizaron tanto el espectro de reflectividad como el retardo de grupo. Se investigó su comportamiento en el entorno del valor de tensión para el cual el pico de transmisión (o mínimo de reflectividad) alcanza su mayor amplitud. Para dicho valor de tensión, se produce un cambio de signo en el pico que se observa en el espectro del retardo de grupo. En las Figs. 6.7 (a y b) se muestran los espectros de reflectividad y de retardo de grupo para el Caso A, en dos instantes en el entorno del valor de tensión antes explicado.

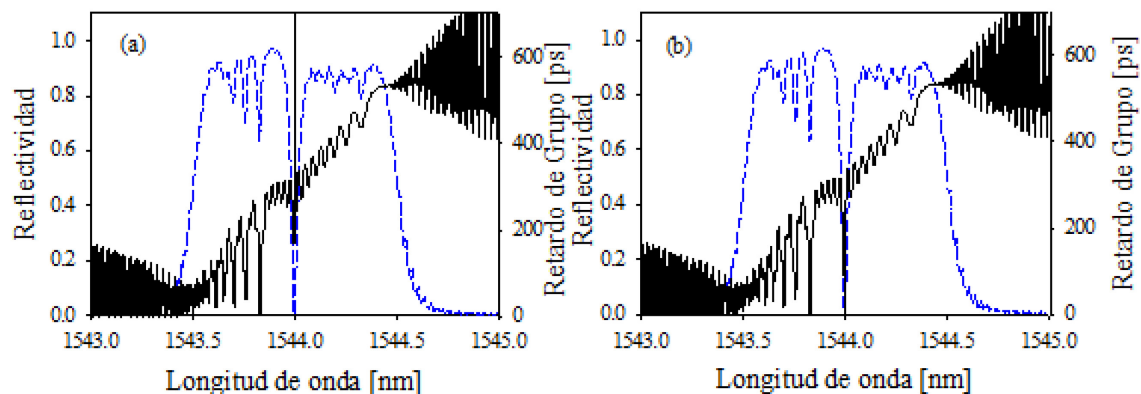


Fig. 6. 7 Caso A con (a)  $\Delta\varepsilon = 164 \mu\varepsilon$  y (b)  $\Delta\varepsilon = 165 \mu\varepsilon$

En las Figs. 6.8 (a) y 6.9 (a) se analiza la respuesta de la fase en esos mismos instantes. Se observa que en la posición espectral donde aparece el pico del retardo de grupo se produce un salto en la fase y también un cambio de dirección. Para resaltar este hecho se hace una ampliación de la zona (señalada en el gráfico) en las Figs. 6.8 (b) y 6.9 (b), respectivamente.

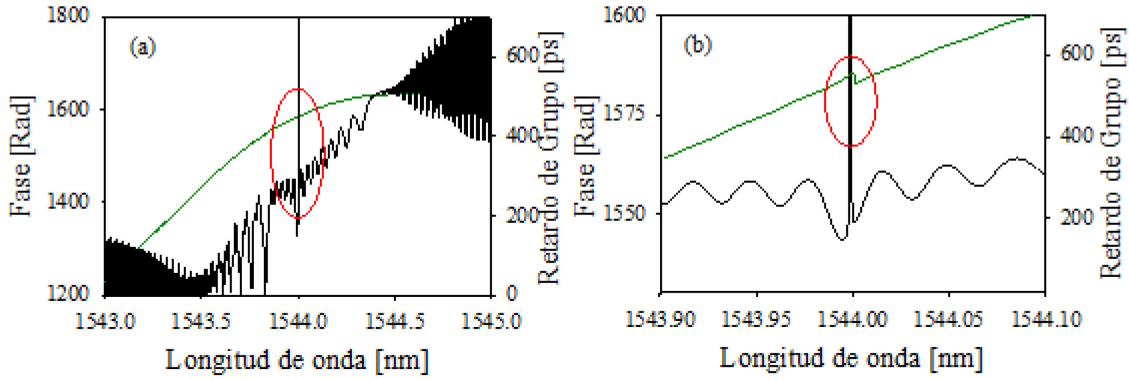


Fig. 6. 8 Caso A (a)  $\Delta\varepsilon = 164 \mu\varepsilon$  y (b) Ampliación de (a)

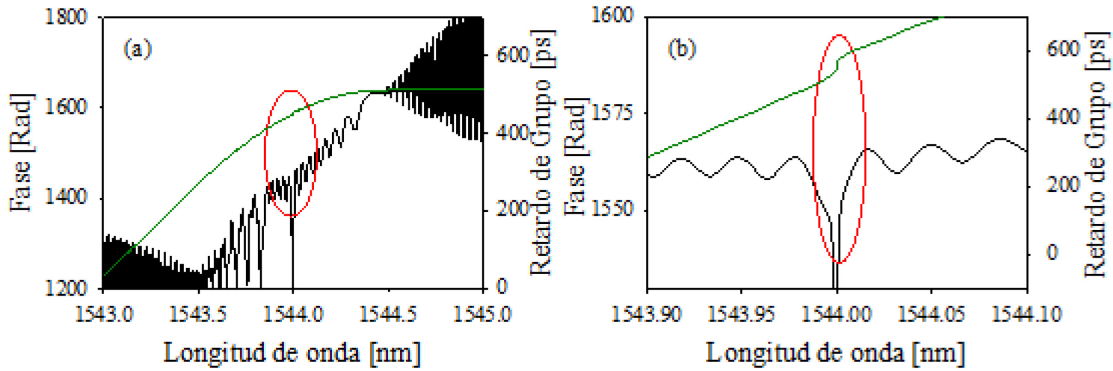


Fig. 6. 9 Caso A (a)  $\Delta\varepsilon = 165 \mu\varepsilon$  y (b) Ampliación de (a)

Se repitió el mismo análisis para el caso B y la deformación unitaria necesaria osciló entre  $\Delta\varepsilon = 175 \mu\varepsilon$  y  $176 \mu\varepsilon$ , mientras que para el Caso C fue  $\Delta\varepsilon = 171 \mu\varepsilon$  a  $172 \mu\varepsilon$ . Se obtuvieron respuestas similares para las tres posiciones del defecto estudiadas, las cuales se muestran en la Fig. 6.10.

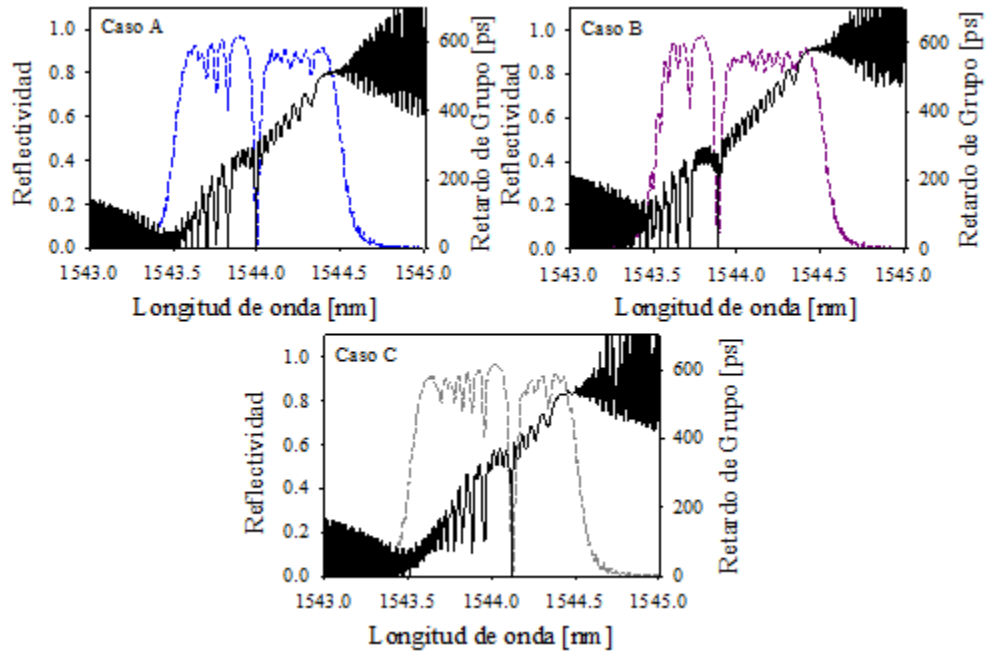


Fig. 6.10 Espectros de reflexión y retardo de grupo para los Casos A, B y C

Como se mostró en la Fig. 6.5, al incrementar la tensión aplicada a la red, se produce un proceso cíclico en el cual varía la amplitud del pico de transmisión del dispositivo, a la vez que se desplaza espectralmente. En la Fig. 6.11 (a) se muestra una ampliación de dichos picos para tres valores diferentes de tensión dentro de un ciclo (136  $\mu\epsilon$ , 181  $\mu\epsilon$  y 227  $\mu\epsilon$ ). Si se consideran los valores de tensión aplicada y la correspondiente posición espectral que va ocupando el mínimo de reflectividad para cada caso, es posible obtener una curva como la mostrada en la Fig. 6.11 (b). En ella, la línea llena corresponde al perfil de transmisión de la red  $R_2$  (defecto). Puede observarse que los puntos obtenidos con los valores antes mencionados, ajustan perfectamente sobre la curva de transmisión de  $R_2$ .

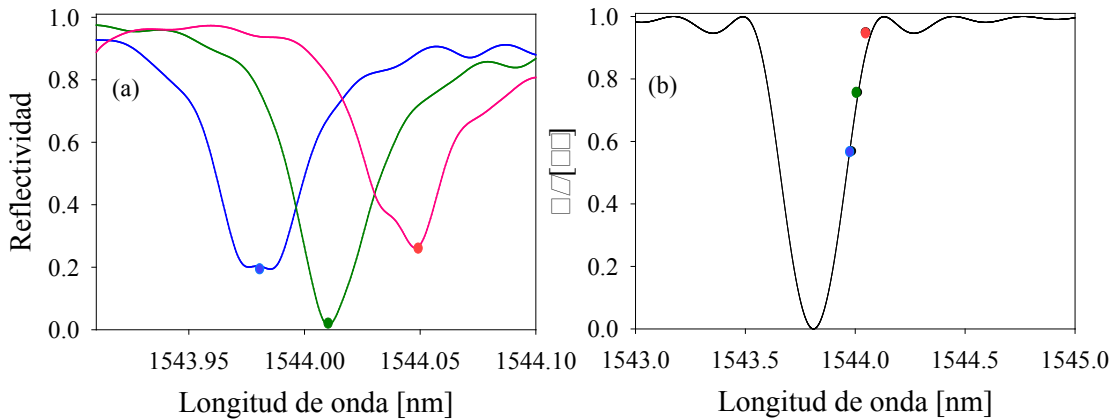


Fig. 6.11 (a) Ampliación del espectro de reflexión destacando los picos que aparecen al tensionar la red y (b) ajuste de los mínimos obtenidos del espectro de reflexión utilizando la curva de transmisión de  $R_2$

Teniendo en cuenta este procedimiento, en la Fig. 6.12 se representa la deformación aplicada sobre la red respecto a la longitud de onda del pico observado en el espectro de

reflexión, para cada uno de los tres casos antes mencionados (A, B y C). Con una normalización apropiada de los datos, se encontró una muy buena convergencia a la localización del defecto haciendo un ajuste de los puntos con la *curva de transmisión de la red  $R_2$*  y considerando como posición espectral del defecto aquella que corresponde a  $\Delta\varepsilon = 0$  [102]. Una vez hallada la localización espectral del defecto, sólo es necesario determinar a qué posición física sobre la red corresponde. Se realizaron estos cálculos y se verificó que la ubicación hallada coincidió perfectamente con la inicialmente considerada para cada uno de los casos A, B y C (25, 30 y 45 mm, respectivamente).

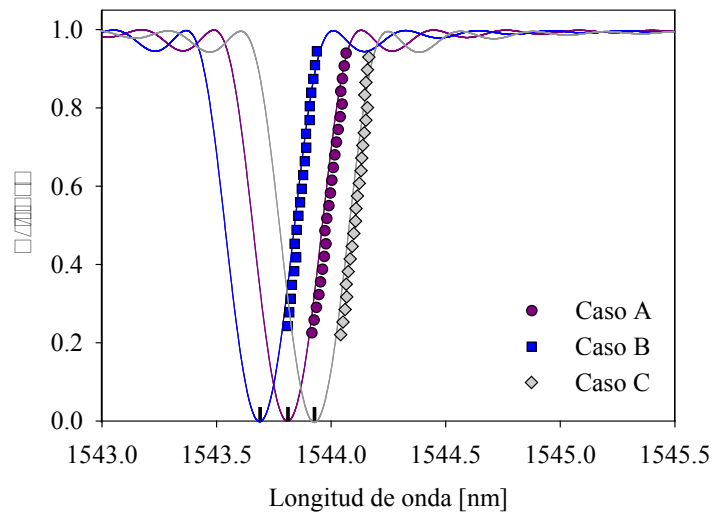


Fig. 6. 12 Determinación de la posición espectral del defecto para 3 casos diferentes

*Prueba 3. Cambio de tamaño del defecto*

En esta prueba se cambió el tamaño del defecto para analizar cómo afecta este parámetro al modelado, y se realizaron 4 simulaciones diferentes ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  y  $t_4$ ). Dicho tamaño coincide con la longitud de la red fija ( $L_{R2}$ ) en las simulaciones realizadas, y en todos los casos se consideró que el defecto está ubicado en el centro de la CFBG, por ello los parámetros de  $R_1$  y  $R_3$  son iguales (como se especifica en la Tabla 6.2).

Pruebas Parámetros	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$
$L_{R2}$ [mm]	1	2	5	10
$L_{R1, R3}$	24.5	24	22.5	20
$N_{R2}$	2	4	10	20
$N_{R1, R3}$	49	48	45	40
$\Delta\lambda_{R2}$ [mm]	0.02	0.04	0.1	0.2
$\Delta\lambda_{R1, R3}$ [mm]	0.49	0.48	0.45	0.4
$\Delta\varepsilon$ [ $\mu\varepsilon$ ]	33	18	36	40

Tabla 6. 2 Parámetros para el modelado, correspondientes a cuatro tamaños diferentes del defecto



donde:

- $L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}$  son las longitudes de las redes  $R_1, R_2$  y  $R_3$ , respectivamente.
- $N_{R1}, N_{R2}, N_{R3}$  son los números de secciones en que se dividen  $R_1, R_2$  y  $R_3$ , respectivamente.
- $\Delta\lambda_{R1}, \Delta\lambda_{R2}$  y  $\Delta\lambda_{R3}$  son los anchos de banda de  $R_1, R_2$  y  $R_3$ , respectivamente.
- $\Delta\varepsilon$  es la tensión aplicada a la CFBG en cada simulación.

En las Figs. 6.13 (a-d) se observan los resultados obtenidos al incrementar el tamaño del defecto (Red 2). En ellas se incluye además en color el perfil correspondiente a  $R_2$  para cada caso. Nótese que, en todos los casos, se representó el instante en el cual se hace máxima la amplitud del pico de transmisión y eso ocurre para diferentes tensiones aplicadas, las cuales dependen del tamaño del defecto. En la Fig. 6.13 (d) el defecto es tan grande con relación a las redes  $R_1$  y  $R_3$  que se comienza a deformar la ventana de transmisión.

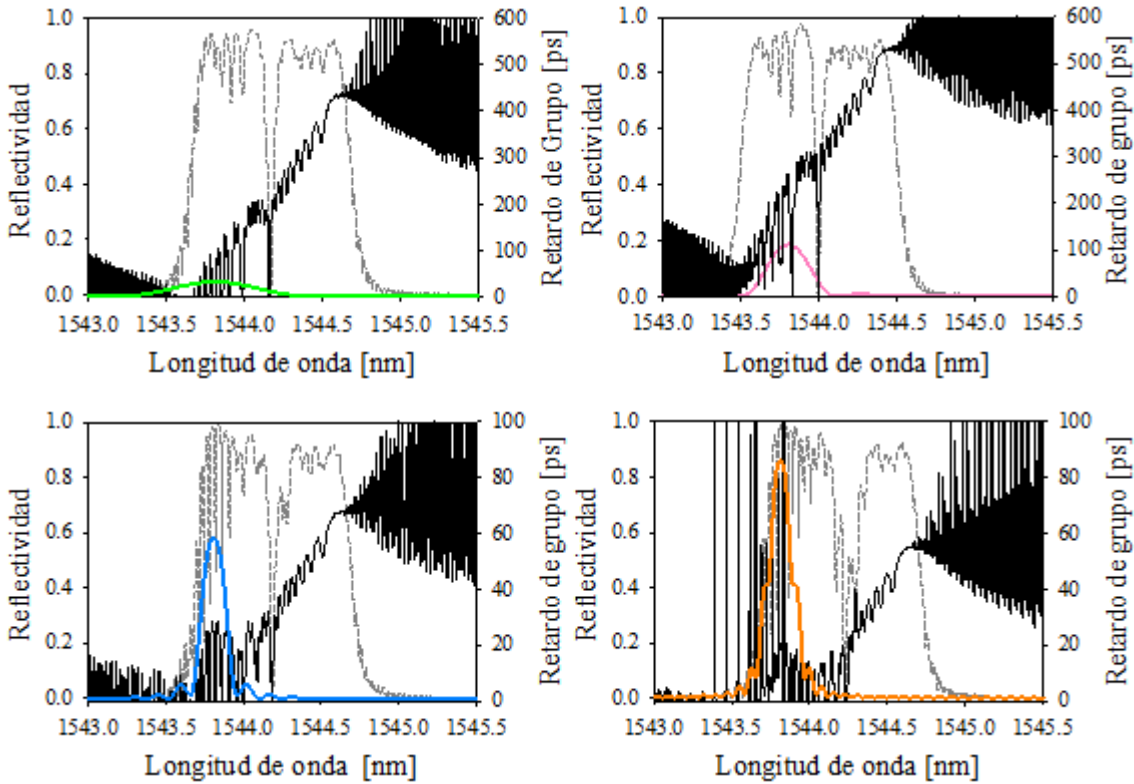


Fig. 6. 13 Comportamiento de la respuesta del modelo para defectos de diferente tamaño (a)  $t_1 : L_{R2} = 1mm$  y  $\Delta\varepsilon = 33\mu\varepsilon$ , (b)  $t_2 : L_{R2} = 2mm$  y  $\Delta\varepsilon = 18\mu\varepsilon$ , (c)  $t_3 : L_{R2} = 5mm$  y  $\Delta\varepsilon = 36\mu\varepsilon$  y (d)  $t_4 : L_{R2} = 10mm$  y  $\Delta\varepsilon = 40\mu\varepsilon$

En la Fig. 6.14 se realiza un procesamiento equivalente al explicado en la Fig. 6.12, para tamaños del defecto que oscilan entre 0.5 y 2 mm, pero aquí se los considera ubicados en el centro de la CFBG. Se observa que los mínimos de todas las gráficas coinciden en la misma posición espectral ya que, como se dijo antes, todos los defectos están ubicados en el mismo lugar de la red.

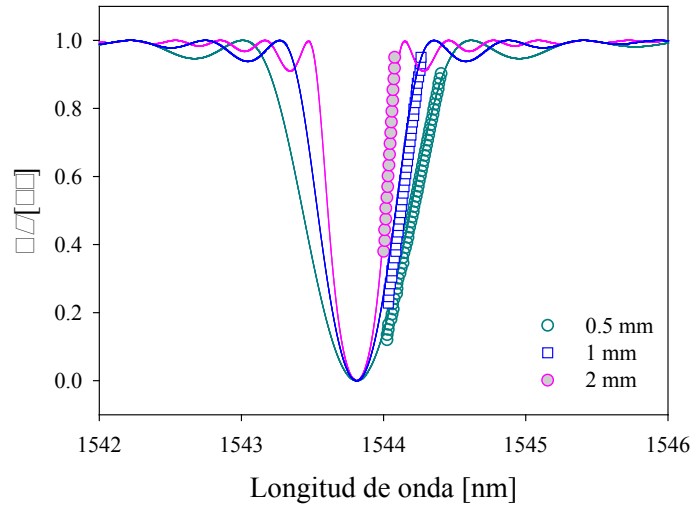


Fig. 6. 14 Respuesta de la CFBG para defectos de 0.5 – 2 mm, con la misma ubicación física sobre la red

A partir de estos resultados, se ve que el comportamiento del modelo sigue siendo coherente con las pruebas que se venían realizando. En este caso, se observó un ensanchamiento de la respuesta espectral, que resulta dependiente del tamaño de la perturbación. También se planteó una primera aproximación para determinar la posición del defecto sobre la CFBG.

## 6.2 Análisis de la respuesta espectral del modelo

A continuación, se hace un análisis de la respuesta espectral del modelo con diferentes condiciones de deformación, empleando la dependencia del índice de refracción efectivo ( $n_{eff}$ ) con la deformación. Se caracterizó el sistema descrito en la Sección 6.1.1.3 con distintos tamaños del defecto (de 0.5 mm a 6 mm). Se parte de una CFBG con chirp lineal de 0.03 nm/mm, de 100 mm de longitud, sin deformar, con las siguientes características espectrales:  $\delta n$  (modulación de amplitud de índice de refracción) =  $2.3 \times 10^{-4}$ ,  $\Lambda_i$  (período inicial) = 514 nm,  $\Lambda_f$  (período final) = 515.1 nm,  $n_{eff} = 1.5$  que determina la banda de reflexión de la red, dada por  $\lambda_i$  (longitud de onda inicial) = 1542.310 nm y  $\lambda_f$  (longitud de onda final) = 1545.310 nm, lo que determina un chirp lineal  $C = (\lambda_f - \lambda_i)/L = 30$  pm/mm. Teniendo en cuenta en cuenta que la velocidad de grupo  $v_g = c/n_{eff}$ , se determina el retardo de grupo promedio por unidad de longitud como:  $[\tau(\lambda_f) - \tau(\lambda_i)]/L = 2(v_g)^{-1} = 10$  ps/mm. Además, el retardo de grupo final resulta:  $\tau(\lambda_f) = 2L/v_g$  entonces finalmente, la dispersión cromática promedio de la red cuando opera en reflexión estará dada por  $[\tau(\lambda_f) - \tau(\lambda_i)]/(\lambda_f - \lambda_i) = 2(C v_g)^{-1} = 333$  ps/nm (Fig. 6.15). Sobre dicha red se genera un defecto (que simula una grieta o fractura) de 1mm de ancho, en una posición espacial dada (por ej. en el centro de la red) [103].

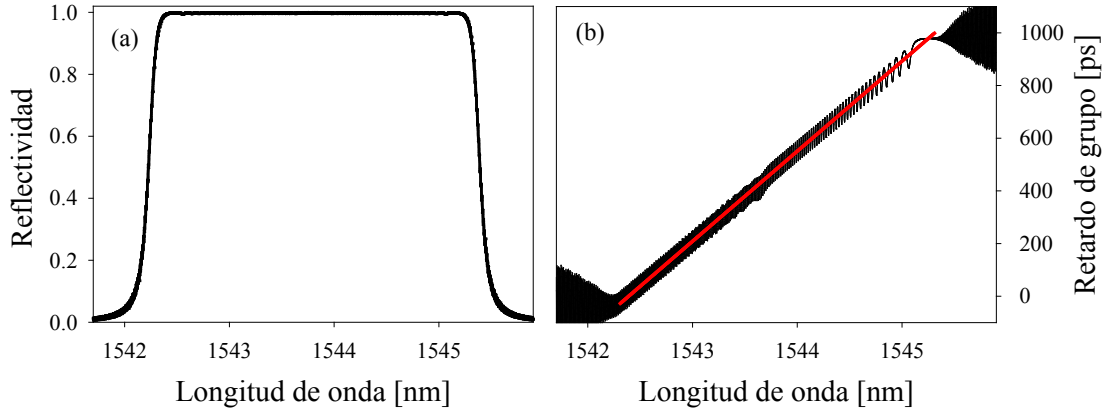


Fig. 6. 15 Simulación del espectro de reflectividad (a) y retardo de grupo (b) de la CFBG inicial. La línea roja es la dispersión cromática promedio de la red sin tensionar

Las Figs. 6.16 (a) y (b) muestran los espectros de la reflectividad y del retardo de grupo correspondientes a un tamaño de defecto  $d = 1$  mm situado en  $z = 50$  mm con respecto al borde izquierdo de la red (donde  $z = 0$ ), y una deformación  $\Delta\varepsilon = 291 \mu\varepsilon$ . Cabe aclarar que, con el objeto de simplificar la nomenclatura, en las explicaciones y ecuaciones que siguen denominaremos “ $d$ ” al tamaño del defecto (anteriormente se lo llamó  $L_{R2}$ ). La deformación genera una resonancia que da lugar a una ventana de transmisión estrecha y a un pico en el retardo de grupo, cuya posición espectral está determinada por la posición espacial de la grieta simulada. Dado que el espectro de la red no perturbada ( $R_2$ ) está ahora superpuesto con el de la red  $R_1$ , pueden observarse algunos picos de interferencia a la izquierda de la resonancia, es decir, en longitudes de onda más cortas.

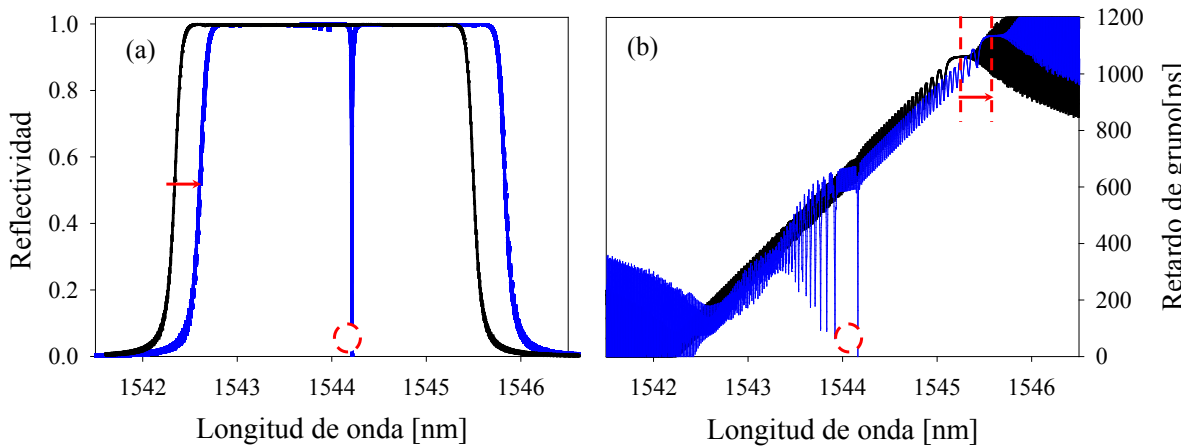


Fig. 6. 16 (a) y (b) CFBG con un defecto de 1mm: (a) espectro de reflexión y (b) retardo de grupo

En la Fig. 6.16 se muestra la respuesta espectral de la red antes de tensionar y luego de ejercer cierto nivel de deformación (por aparición del “defecto” o fisura). Puede observarse que la deformación, además de producir el surgimiento del pico, genera un desplazamiento ( $\Delta\lambda_B$ ) de la respuesta espectral de la red.

Ahora se estudiará el comportamiento del sistema mediante un análisis comparativo del espectro de reflectividad y del retardo de grupo, bajo cierto rango de deformaciones ( $146 \mu\epsilon$  a  $436 \mu\epsilon$ ). En la Fig. 6.17 (a) se muestran algunos espectros de reflectividad y sus correspondientes retardos de grupo superpuestos con el fin de evidenciar el desplazamiento antes mencionado. Se puede notar que la pendiente del retardo de grupo se mantiene constante. En la Fig. 6.17 (b) se hace una ampliación de la Fig. 6.17 (a) para poder analizar el comportamiento del pico de transmisión de ambas respuestas espectrales, a medida que se va tensionado la CFBG. En el *espectro de reflexión*, a partir de una determinada tensión aparece el pico, cuya amplitud va aumentando hasta que llegar a un mínimo de reflexión. Ese instante define la *mitad del ciclo de tensionado* y a partir de allí, la amplitud del pico disminuye hasta finalizar el ciclo. En el caso del *retardo de grupo*, el cambio en su respuesta aparece un instante antes de que el pico de reflectividad se haga máximo, ocurriendo un *cambio de signo* como se señala en la parte inferior de la Fig. 6.17 (b). Al incrementar la tensión aplicada, el pico del retardo de grupo también pierde amplitud hasta desaparecer.

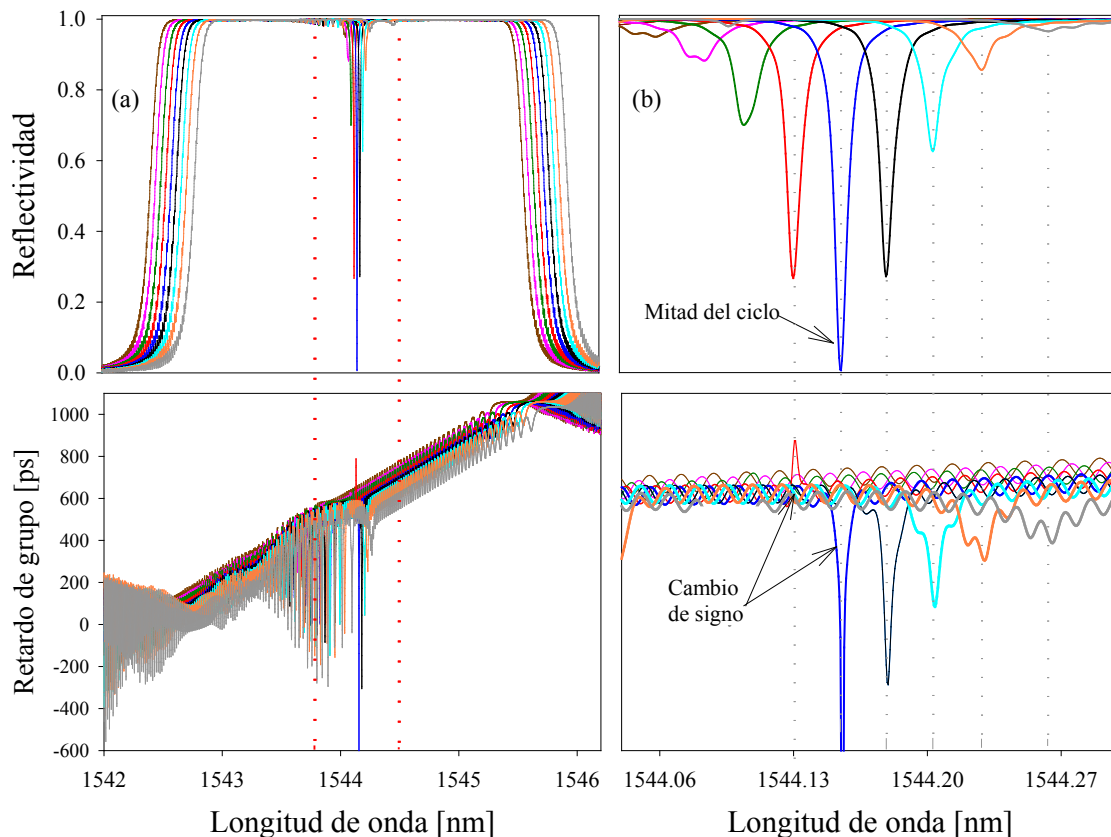


Fig. 6. 17 (a) Espectros de reflectividad y retardo de grupo para diferentes tensiones: (—)  $146 \mu\epsilon$ , (—)  $182 \mu\epsilon$ , (—)  $218 \mu\epsilon$ , (—)  $255 \mu\epsilon$ , (—)  $291 \mu\epsilon$ , (—)  $327 \mu\epsilon$ , (—)  $364 \mu\epsilon$ , (—)  $400 \mu\epsilon$  y (—)  $436 \mu\epsilon$ ; (b) ampliación en la zona de la ventana de transmisión

En la Fig. 6.18 se muestran el espectro de reflectividad y retardo de grupo para tres instantes clave de un ciclo de tensionado. En la Fig. 6.18 (a) se muestra el *inicio del ciclo*, donde aparece la ventana que solo puede apreciarse en el espectro de reflectividad (ver zoom de dicha ventana en el inserto). En el retardo de grupo se observa cierta pendiente casi sin modulación. En la Fig. 6.18 (b) se ilustra el instante a *mitad de ciclo* donde la ventana de transmisión alcanza su máxima amplitud y puede verse tanto en el espectro de reflectividad como en el retardo de grupo. En la Fig. 6.18 (c) se muestra el *final del ciclo* señalado por la aparición de un segundo pico de igual amplitud que el ya existente. Este efecto solo puede apreciarse en el espectro de reflectividad, y en el espectro del retardo de grupo se puede notar una modulación que indica el solapamiento de las redes.

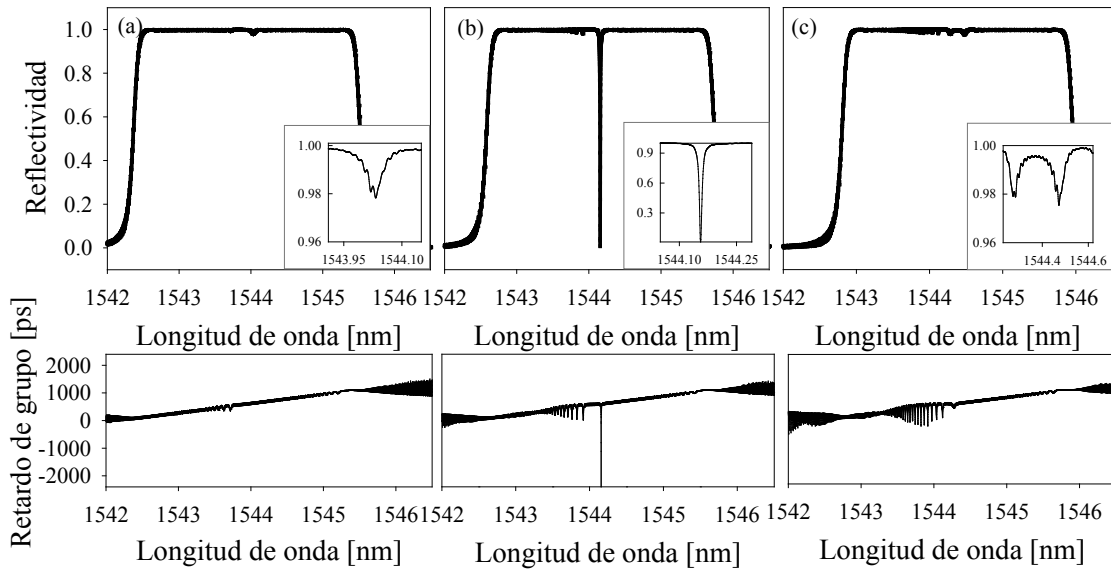


Fig. 6. 18 Espectros de reflectividad y retardo de grupo en los tres instantes clave de un ciclo completo de tensionado: (a) inicio, (b) mitad del ciclo y (c) finalización

Para finalizar esta sección, en las Figs. 6.19 (a) y (b) se comparan los picos de reflectividad y de retardo de grupo para dos casos: a)  $d = 1 \text{ mm}$  y  $\Delta\varepsilon = 291 \mu\varepsilon$ , y b)  $d = 4 \text{ mm}$  y  $\Delta\varepsilon = 173 \mu\varepsilon$ .

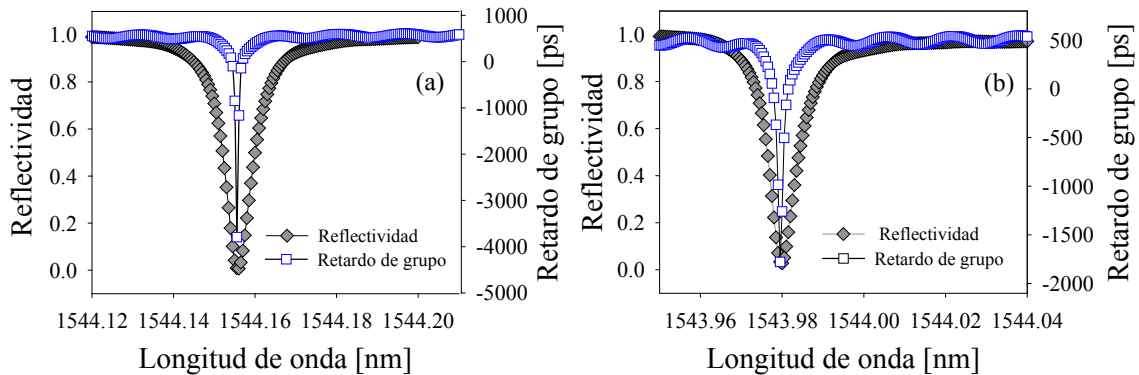


Fig. 6. 19 Ampliación de los picos de reflectividad (rombos grises) y retardo de grupo (cuadrados vacíos azules) para dos casos diferentes: (a)  $d = 1 \text{ mm}$  y  $\Delta\varepsilon = 291 \mu\varepsilon$  y (b)  $d = 4 \text{ mm}$  y  $\Delta\varepsilon = 173 \mu\varepsilon$

Podemos observar que tanto el pico de la reflectividad como el del retardo de grupo están centrados en la misma longitud de onda, siendo más estrecho éste último. El ancho espectral del pico de reflectividad para una grieta de 1 mm es de 7.0 pm mientras que el ancho del pico de retardo de grupo correspondiente es de 1.5 pm. Para el defecto de 4 mm, el ancho de estos picos resulta de 7.5 pm y de 1.5 pm, respectivamente. De este modo, la posición espectral de los dos picos coincide, pero el pico del retardo de grupo proporcionará, en principio, una mejor resolución para determinar la posición de la fisura en un factor 5 a 7.

### 6.2.1 Comportamiento espectral de las respuestas para defectos de diferentes tamaños

En las Figs. 6.17 y 6.18 se describió el comportamiento tanto del espectro de reflectividad como del retardo de grupo en un ciclo completo de tensionado, para un defecto de un 1mm. Luego se comparó el ancho de los picos de reflectividad y retardo de grupo en el punto medio del ciclo, para defectos de 1 mm y 4mm (Fig. 6.19).

Ahora se analiza como son las respuestas en un ciclo completo para diferentes tamaños del defecto (0.5 a 6 mm) y considerando que el mismo está ubicado en el centro de la red. Graficando la amplitud del pico negativo en el espectro de reflectividad obtenido para las diferentes tensiones en un ciclo de deformación, se obtiene la Fig. 6.20, que da una idea de las características de la ventana de transmisión generada (observar que la misma se construye considerando la amplitud de los diferentes mínimos del espectro de reflectividad durante un ciclo, tal como los mostrados en la Fig. 6.17 (b) superior). Además de observarse el corrimiento en longitud de onda de la ventana, se puede notar la variación del tamaño de la misma. Ambos efectos pueden observarse en la Fig. 6.20, donde se grafica la amplitud del pico de transmisión y su posición en longitud de onda, a medida que se incrementa la deformación aplicada. Se puede observar que cuanto menor es el tamaño del defecto, el corrimiento de la ventana de transmisión debido a la deformación se desplaza hacia longitudes de onda mayores [103].

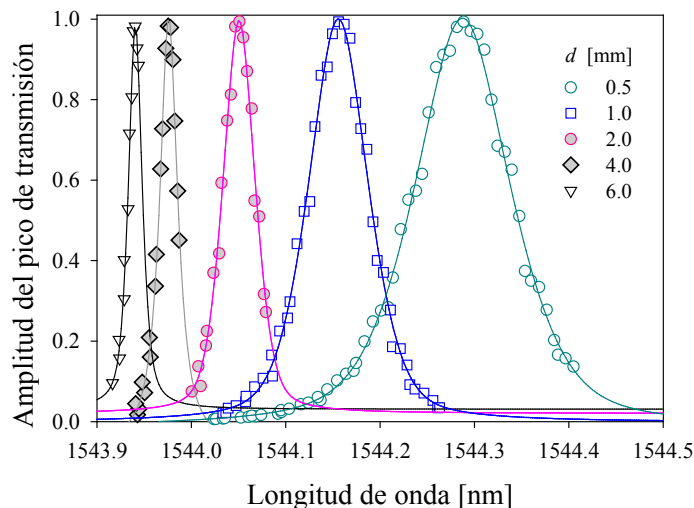


Fig. 6. 20 Respuesta espectral de la amplitud del pico de transmisión para cinco defectos diferentes

En la Fig. 6.21 se muestra la dependencia de la amplitud del pico de transmisión con la deformación (en un ciclo completo de variación), para diferentes tamaños del defecto. Se observa que para defectos mayores a 4 mm el rango de deformaciones que es necesario aplicar es más pequeño y prácticamente el mismo (de  $90 \mu\epsilon$  a  $227 \mu\epsilon$ ). Cada una de las curvas fue ajustada utilizando una función Pseudo – Voigt (aproximación de la función Voigt, la cual es una convolución de una función gaussiana y una lorentziana), pudiendo observarse una muy buena correspondencia con los puntos obtenidos a partir del modelado.

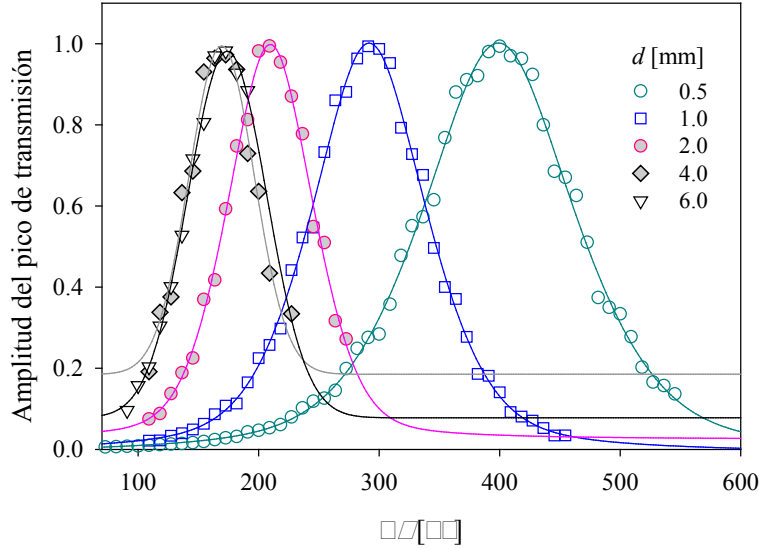


Fig. 6. 21 Amplitud del pico de transmisión con respecto a la deformación por unidad de longitud aplicada, para cinco defectos diferentes

### 6.2.2 Determinación de la posición de la grieta o fractura (defecto)

Los resultados numéricos muestran que al medir la posición espectral de los picos resonantes con respecto al borde de la red con chirp, podemos localizar la posición de una grieta independientemente de la deformación existente dado que, como hemos mencionado al comienzo, se considera como primera aproximación que *la variación del ancho espectral de la red total debido a la deformación, es despreciable ( $\Delta\lambda \sim \Delta\lambda'$ )*. Se considera que la aplicación de tensión sólo produce el corrimiento espectral de la red. La Fig. 6.20 muestra los espectros de reflexión y de retardo de grupo para dos situaciones diferentes: una con el defecto situado en  $L/3$  y otra en la cual el defecto está localizado en  $2/3 L$ , siendo  $L$  la longitud física de la CFBG. Encontramos una correlación perfecta entre la longitud de onda de las ventanas que aparecen en cada espectro y la localización espacial del defecto, es decir, la coordenada  $z$  de la grieta medida respecto de un borde de la CFBG. Para obtener una relación simple entre la respuesta espectral y la localización espacial de la grieta, independientemente de la deformación, definimos  $\Delta\lambda_p = (\lambda_p - \lambda_{i\epsilon})$ , donde  $\lambda_p$  y  $\lambda_{i\epsilon}$  corresponden a las longitudes de onda del pico de transmisión y del borde izquierdo de la red  $R_I$  tensionada, respectivamente (Fig. 6.22). Cuando una tensión es aplicada, la red completa se desplaza a longitudes de onda más largas y ambos valores ( $\lambda_p$  y  $\lambda_{i\epsilon}$ ) cambian,



pero la diferencia está determinada básicamente por la posición espacial de la grieta. Vale la pena mencionar que podríamos tomar la referencia en el borde derecho de la red  $R_3$  ( $\lambda_{d\varepsilon}$ ) y definir  $\Delta\lambda_p'$  como  $\lambda_{d\varepsilon} - \lambda_p$ . Esta opción podría tener la ventaja de evitar la interferencia entre  $R_2$  y el borde izquierdo de  $R_1$  para valores altos de la deformación.

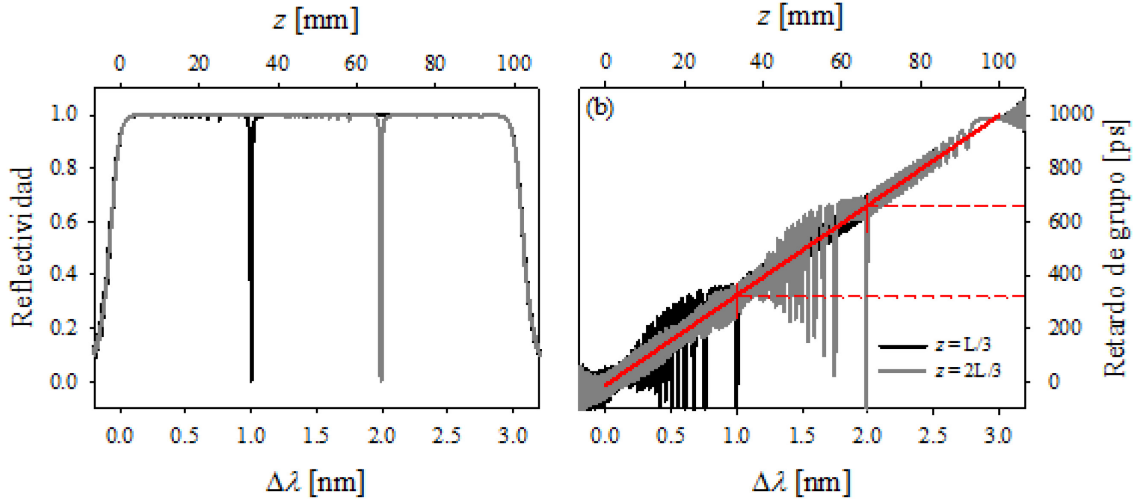


Fig. 6. 22 Espectros para grietas de 1 mm en diferentes posiciones:  $L/3$  y  $2L/3$ : (a) Reflectividad y (b) retardo de grupo

Con el objetivo de ilustrar cómo se obtienen los parámetros requeridos para calcular la posición  $z$  del defecto en la red a partir del espectro de reflectividad, consideremos una de las trazas de la Fig. 6.22 (a) en la Fig. 6.23 (por ej. aquella correspondiente a  $L/3$ ). Se define  $z = (\Delta\lambda_p / \Delta\lambda) L$  donde  $\Delta\lambda$  es 3 nm y  $L$  es 100 mm, los  $\Delta\lambda_p$  y  $\lambda_{i\varepsilon}$  se miden sobre el espectro de reflectividad a mitad de altura. De esta manera se obtienen los valores de la Tabla 6.3, correspondientes a los dos casos mencionados en la Fig. 6.22.

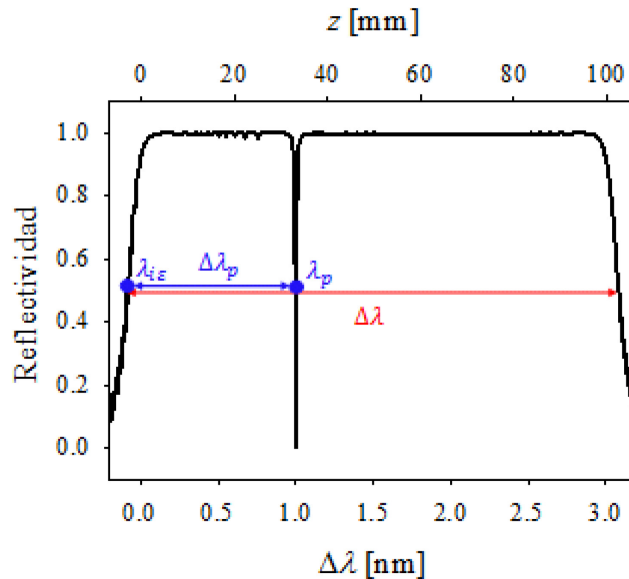


Fig. 6. 23 Identificación de parámetros del espectro de reflectividad requeridos para calcular la posición  $z$  de una grieta o fractura



Posición z de la fractura [mm]	$\lambda_{iz}$ [nm]	$\lambda_p$ [nm]
33.3	1542.6	1543.6
66.6	1542.6	1544.6

Tabla 6. 3 Parámetros para dos posiciones diferentes de una grieta de 1 mm

En el análisis previo se describió cómo es posible determinar la posición del defecto utilizando el espectro de reflectividad de la CFBG tensionada. A continuación, se detalla cómo obtener esta información, pero a partir del análisis del espectro del retardo de grupo (Fig. 6.22 (b)). Para ello resulta útil definir lo que llamamos “posición de resonancia del retardo de grupo” ( $\tau_g$ ). El parámetro  $\tau_g$  es el valor del retardo de grupo que tiene la CFBG en la longitud de onda donde aparece la resonancia debido a la presencia de la grieta o fractura. Para aclarar más la definición, se incluyó en la Fig. 6.22 (b) una línea recta de color que es la dispersión cromática promedio de la CFBG ya mencionada. Además, con líneas horizontales discontinuas se señaló la intersección de dicha recta con las resonancias producidas por la grieta (para los dos casos estudiados), permitiendo determinar los valores de  $\tau_g$  para cada uno de ellos (aproximadamente 319 ps y 1000 ps) y así encontrar el valor de la posición z del defecto.

Con el objetivo de ilustrar cómo se obtienen los parámetros requeridos para calcular la posición z del defecto en la red a partir del espectro de retardo de grupo, consideremos una de las trazas de la Fig. 6.22 (b) en la Fig. 6.24 (por ej. aquella correspondiente a L/3). Se define  $z = (\tau_g / \Delta\tau_g) L$  donde L es 100 mm. Los  $\tau_g$  se miden sobre el espectro de retardo de grupo trazando la pendiente (dispersión cromática promedio) e identificando la posición del pico. Para este caso resulta  $\tau_g = 319$  ps y teniendo en cuenta  $\Delta\tau_g$  de la pendiente ( $\Delta\tau_g = \tau_{gf} - \tau_{gi} = 1000$  ps) se obtiene como resultado una posición  $z = 31.9$  mm  $\sim$  32 mm, lo que resulta coherente con lo indicado en la Tabla 6.2 obtenida a partir espectro de reflectividad.

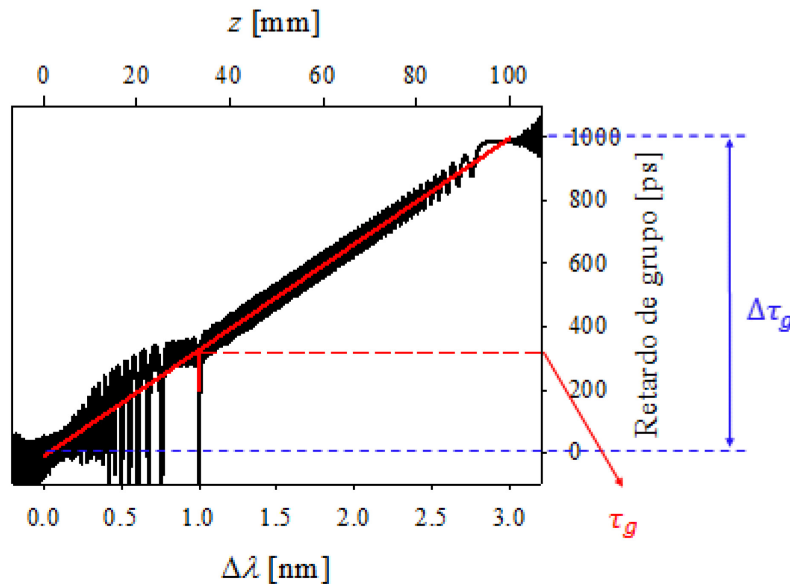


Fig. 6. 24 Identificación de parámetros del espectro de retardo de grupo para calcular la posición z de una grieta o fractura

En la Fig. 6.25 (a) se muestra la diferencia en longitud de onda del pico de reflectividad respecto del comienzo de la red ( $\Delta\lambda_p$ ) y en la Fig. 6.25 (b) la posición de la resonancia en el retardo de grupo ( $\tau_g$ ), a partir de los cuales es posible determinar la posición  $z$  del defecto. Para ello, se calcularon diferentes posiciones del defecto (fractura) utilizando dos tensiones diferentes (291  $\mu\epsilon$  y 691  $\mu\epsilon$ ), las cuales corresponden al instante de “mitad de ciclo”, en dos ciclos consecutivos de tensionado. Más adelante se demostrará la periodicidad del comportamiento de la reflectividad y del retardo de grupo con la tensión aplicada. Se observa que la relación entre la coordenada espacial  $z$  y cada uno de los parámetros  $\Delta\lambda_p$  y  $\tau_g$  es lineal, siendo en cada caso la misma recta para ambos valores de tensión. Por otro lado, los valores de tensión que produjeron la condición de “mitad de ciclo” ( $\Delta\lambda_p$  y  $\tau_g$ ) en 2 ciclos consecutivos, determinan la posición de la grieta independientemente de la tensión considerada (291 y 691  $\mu\epsilon$ ). A partir de nuestros resultados, llegamos a la conclusión de que la posición espectral máxima cae dentro de la ventana espectral generada por la ausencia de espectro de red de  $R_2$  entre  $R_1$  y  $R_3$  una vez que la tensión desplaza la CFBG.

Por lo tanto, para hallar  $z$ , ya sea que se utilice el espectro de reflectividad o de retardo de grupo, sólo será necesario conocer dicho espectro para la red tensionada, de donde se sacarán los parámetros especificados en la fórmula correspondiente antes mencionada. Sin embargo, dado que el pico de retardo del grupo es más estrecho, esto proporcionaría una mejor resolución.

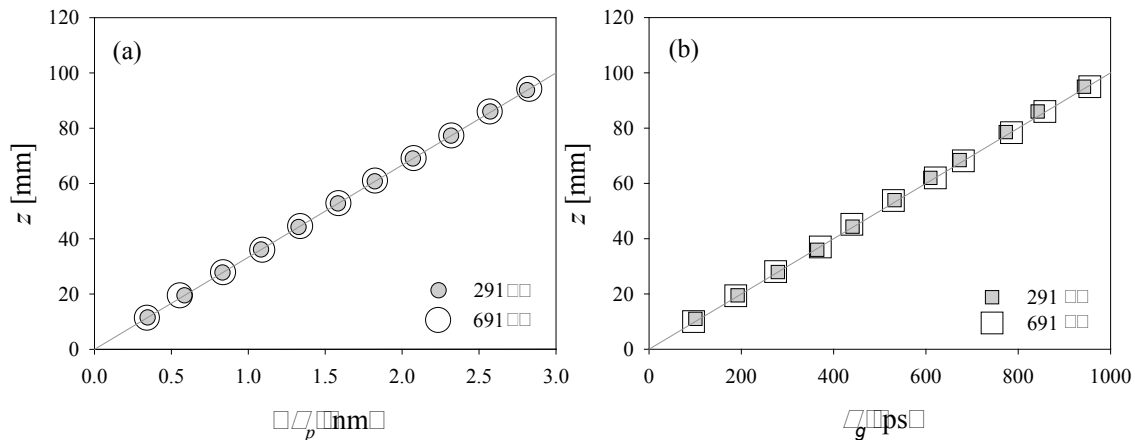


Fig. 6. 25 Posición de la grieta ( $z$  [mm]) versus (a) posición de la longitud de onda ( $\Delta\lambda$ ) y (b) posición de retardo de grupo ( $\tau_g$ ) de la resonancia. Se incluye el punto calculado para dos valores de tensión (291  $\mu\epsilon$  y 691  $\mu\epsilon$ )

### 6.2.3 Ancho del defecto o de la grieta

Las simulaciones numéricas de los espectros de reflectividad y de retardo de grupo como una función de la deformación de la CFBG, muestran un comportamiento relativamente complejo del dispositivo. Cabe recordar aquí que ambas respuestas espectrales describen un ciclo con la tensión aplicada (Fig. 6.26). La Fig. 6.26 (a) muestra la deformación generada por la grieta respecto de la longitud de onda en la cual aparece el pico resonante correspondiente, mientras que la Fig. 6.26 (b) se representa la amplitud del pico de transmisión para las diferentes tensiones producidas. Ambas gráficas corresponden a un

defecto de tamaño  $d = 1$  mm. Si analizamos primero la dependencia de la deformación con la longitud de onda (Fig. 6.26 (a)), encontramos que la respuesta es una especie de escalera con una pendiente media que coincide perfectamente con el desplazamiento en longitud de onda experimentado por una FBG al ser tensionada, considerando una sensibilidad a la deformación  $s_\varepsilon = 1 - p_e = 0.78$ . Si ahora analizamos la evolución de la amplitud de pico con respecto a la deformación (Fig. 6.26 (b)), encontramos que *la respuesta es periódica* y el período  $T_\varepsilon$  ( $433 \mu\varepsilon$  para  $d = 1$  mm) coincide con la altura de los pasos observados en la (Fig. 6.26 (a)). Esta respuesta en forma de escalera pondrá un límite en la resolución con la que podemos determinar la posición de una grieta, como se verá más adelante.

Por otro lado, el mismo comportamiento periódico con la tensión aplicada observado en la respuesta en reflectividad de la red (Fig. 6.26), puede encontrarse si se analiza la respuesta en retardo de grupo de la misma. Esto será discutido en una sección posterior.

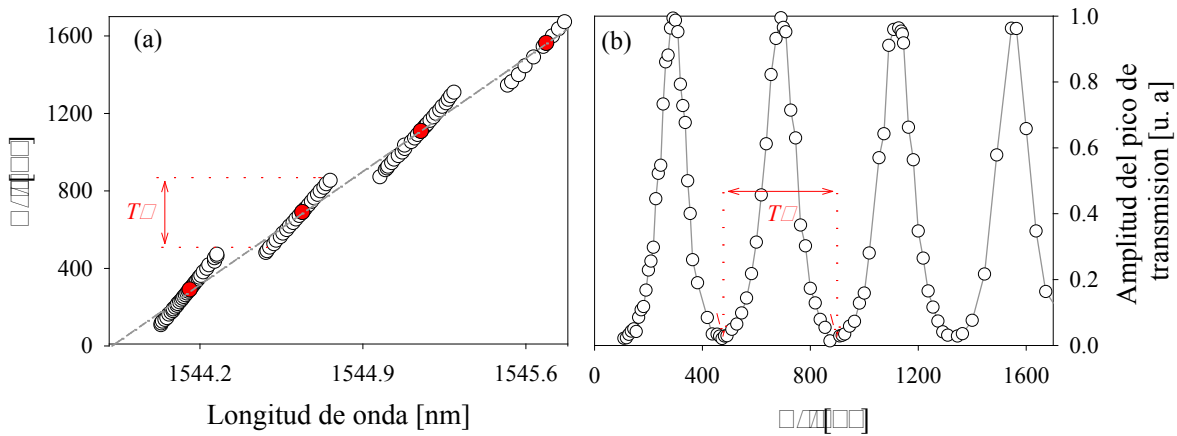


Fig. 6. 26 a) Deformación aplicada vs. longitud de onda del pico resonante y (b) amplitud del pico de transmisión respecto de la deformación aplicada, para  $d = 1$  mm

Con el fin de introducir una descripción física de los efectos de la grieta, consideraremos en una primera aproximación que la sección no perturbada de la CFBG define un *Fabry-Perot* con las redes anterior y posterior (en sentido estricto, sería con el borde derecho de  $R_1$  y el borde izquierdo de  $R_3$ , ya que sus longitudes de onda de Bragg no coinciden). La respuesta espectral real del fragmento de fibra  $R_2$  que forma el defecto en la CFBG original participa en casi nada y su respuesta termina saliendo de la región espectral de interés. Por lo tanto, lo que se podría esperar es que las redes  $R_1$  y  $R_3$  se desplazaran linealmente en función de la deformación y que, en principio, el pico asociado con la grieta seguiría el desplazamiento de  $R_1$  y  $R_3$ . De hecho, esto es lo que se observa en un amplio rango de tensiones si consideramos la pendiente media, o si enfocamos nuestra atención solamente sobre los picos con amplitud máxima. Sin embargo, si  $R_2$  no existiese, no se produciría la ventana de transmisión cuya aparición es fundamental en el funcionamiento del dispositivo.

### 6.2.3.1 Discusión de la aparición de la ventana de transmisión

Como ya se ha mencionado y descrito espectralmente, bajo ciertas condiciones de deformación se genera un pico o ventana de transmisión. Dicho pico se puede explicar a

partir de considerar una cavidad Fabry-Perot formada entre redes con chirp. Para mayor claridad se creyo conveniente describir previamente el funcionamiento de un Fabry-Perot formado entre redes de Bragg uniformes [101].

6.2.3.1.1 Cavidad Fabry-Perot formada por dos redes uniformes analizada en términos de la longitud efectiva

En el artículo referenciado, se describen las propiedades de una cavidad Fabry-Perot formada por dos redes uniformes, se calcula la longitud efectiva de cada una de ellas y la frecuencia de separación entre resonancias consecutivas de dicha cavidad.

Una cavidad corta de fibra se caracteriza por una alta separación entre modos. El espaciado entre modos aumenta al incrementarse la reflectividad de la red, debido al acortamiento de su longitud efectiva.

Se demuestra que la longitud efectiva de la red está determinada por el retardo de grupo de la luz reflejada desde ella, y depende de la eficiencia de difracción de la red y de su longitud física. Dicha eficiencia varía entre 1/2 de la longitud física de la red (cuando la reflectividad es baja) y cero (cuando la reflectividad es alta).

La transmitancia de potencia de la cavidad con dos redes se escribe como:

$$T = \frac{(1 - R_A)(1 - R_B)}{(1 - \sqrt{R_A R_B})^2 + 4\sqrt{R_A R_B} \text{sen}^2(\beta L_0 + \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2})} \quad (6.5)$$

donde  $R_A, R_B$  son los coeficientes de reflexión de las dos redes que forman la cavidad,  $L_0$  es la longitud de la fibra entre redes,  $\beta$  es la constante de propagación del modo fundamental  $LP_{01}$  y  $\varphi_A, \varphi_B$  son las fases de los coeficientes de reflexión de las redes.

En la Fig. 6.27 se muestra el esquema de la cavidad Fabry-Perot, en la cual  $L_A$  y  $L_B$  son las longitudes de las redes  $FBG_A$  y  $FBG_B$ , respectivamente.

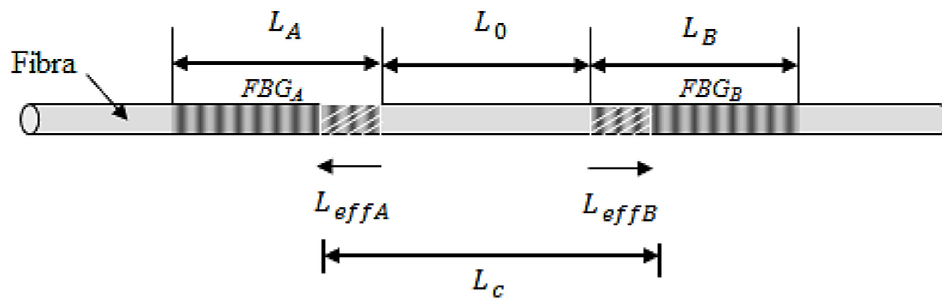


Fig. 6. 27 Esquema de una cavidad Fabry Perot formada por dos redes uniformes

La máxima transmitancia correspondiente a las resonancias del Fabry-Perot es observada cuando el argumento del seno de la Ec. (6.5) es múltiplo de  $\pi$ . A partir de esto, teniendo en cuenta la dispersión de la fibra y de las redes, el rango espectral libre (Free Spectral Range – FSR) o espaciado de modos de la cavidad puede ser expresado como:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2n_g(L_c)} \quad (6.6)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda en el espacio libre,  $n_g$  es el índice de refracción de grupo para el modo fundamental de la fibra y  $L_{effA}$ ,  $L_{effB}$  son las longitudes efectivas de las redes definidas como sigue. Además,  $L_c = L_0 + L_{effA} + L_{effB}$ .

$$L_{effA,B} = \frac{v_g \tau_{A,B}}{2} \quad (6.7)$$

donde  $v_g = c/n_g$  es la velocidad de grupo y  $\tau_{A,B} = \partial \varphi_{A,B} / \partial \omega$  son los retardos de grupo de las redes  $FBG_A$  y  $FBG_B$ .

Recordemos que si en general denominamos  $\theta$  a la fase, el retardo de grupo se define como:

$$\tau = - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (6.8)$$

#### 6.2.3.1.2 Cavidad Fabry-Perot formada en una CFBG donde una pequeña porción de la misma permanece invariante

Hasta aquí se describió el comportamiento de una red de Bragg con chirp lineal en la que se ha fijado una pequeña porción de la misma de manera que no se modificaran sus propiedades bajo un esfuerzo de tracción (o de compresión). Al producirse este hecho es posible, bajo las condiciones de deformación adecuadas, generar un pico de transmisión de ancho de banda muy pequeño (en el espectro de reflectividad de  $\sim 7$  pm y en el espectro de retardo de grupo  $\sim 1.5$  pm).

Además, debemos recordar que en el caso de un Fabry-Perot generado entre redes, la separación efectiva entre “espejos” incluye una parte correspondiente a la longitud de penetración de las redes que lo forman, la cual depende de la reflectividad de las mismas [101]. Tomando como base la sección anterior donde se discutió brevemente la cavidad Fabry-Perot formada por dos redes uniformes, es posible explicar entonces la aparición del pico de transmisión que aparece en el sistema propuesto. En este caso, hay que considerar un *Fabry-Perot* con una separación equivalente al tamaño del defecto más un valor constante, el cual depende de la longitud de penetración en las redes que lo limitan (en nuestro caso, redes con chirp). A medida que el defecto se hace más grande, el número de picos aumenta y su separación disminuye, lo cual está de acuerdo con la hipótesis planteada.

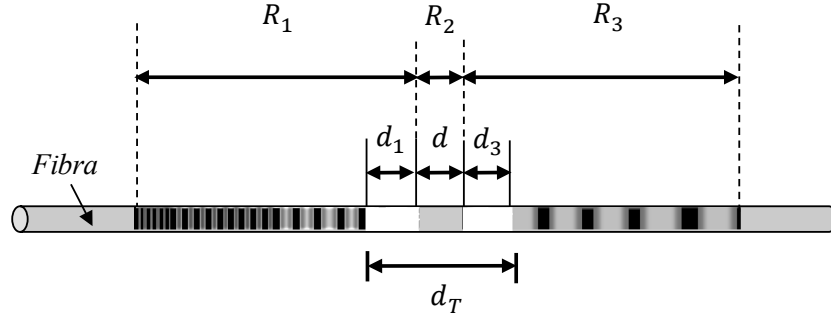


Fig. 6. 28 Esquema del Fabry-Perot entre redes con chirp

En la Fig. 6.28, se muestra un esquema del Fabry-Perot definido por la sección de fibra no perturbada, donde se localiza la grieta (de ancho  $d$ ) y las longitudes efectivas de las redes  $R_1$  y  $R_3$  (es decir,  $d_1$  y  $d_3$ ), las cuales están asociadas a la penetración de la luz en ambas redes. Llamaremos  $d_0 = d_1 + d_3$  y  $d_T = d + d_0$  a la longitud efectiva total de la cavidad Fabry-Perot. Los cambios debidos a la tensión en la CFBG generan una disminución local del índice de refracción ( $\delta n < 0$ ) con respecto al índice efectivo de las redes  $R_1$  y  $R_3$ . En otras palabras, el defecto generado por la grieta es más profundo a medida que aumenta la tensión, en términos de índice de refracción. Así, la diferencia de fase generada por el defecto será proporcional a  $\delta n$  y  $d$ . Dado que el cambio del índice de refracción es proporcional a la deformación aplicada, tendremos:

$$\delta\varphi \propto (-d \delta\varepsilon) \quad (6.9)$$

Este  $\delta\varphi < 0$  hace que una resonancia de Fabry-Perot determinada cambie a longitudes de onda más cortas a medida que aumenta en valor absoluto. En la ventana espectral en la que opera el Fabry-Perot local, esto está limitado por la superposición de las redes  $R_1$  y  $R_3$ . Normalmente, sólo una sola resonancia aparece en el espectro de reflectividad. El rango espectral libre (FSR) del Fabry-Perot ( $\Delta\lambda_{FSR}$ ) corresponde a cada ciclo  $2\pi$  de  $\delta\varphi$ . A medida que  $\delta\varphi$  disminuye, las resonancias se desplazan hacia longitudes de onda más cortas y cuando alcanza el límite del FSR, entonces aparece una nueva resonancia en el lado de longitudes de onda más largas. Eventualmente, si  $d$  aumenta y el FSR es suficientemente pequeño, entonces podemos observar dos resonancias simultáneamente en el espectro de reflexión de la CFBG. En la Fig. 6.29 se muestra dicho comportamiento, para defectos de diferente tamaño (1.0, 4.0 y 6.0 mm). Se ilustran particularmente los instantes en que la ventana de transmisión se hace máxima (o la reflectividad se hace mínima). En el caso de 6 mm, es evidente la presencia de otros picos que acompañan al pico de máxima transmisión (otras resonancias). La mínima deformación necesaria para alcanzar el máximo de transmisión fue diferente para los distintos tamaños del defecto. En particular, los valores necesarios fueron: 291  $\mu\varepsilon$  (para 1 mm) y 172  $\mu\varepsilon$  (para 4 mm y 6 mm).

A medida que el defecto se hace más grande se va modificando la ventana de transmisión en la respuesta espectral, generándose picos laterales dentro la misma. Con el objeto de visualizar dicho comportamiento, la Fig. 6.30 muestra una ampliación de la ventana, para los tres tamaños del defecto graficados en la Fig. 6.29. En las Figs. 6.30 (b) y (c) puede observarse que los múltiples picos tienen separaciones que disminuyen al aumentar el

tamaño del defecto. El ancho espectral de cada pico de transmisión es de 7 pm, constituyéndose en picos muy selectivos. Los picos que aparecen fuera de la ventana de transmisión surgen de la interferencia provocada por el solapamiento entre la red  $R_1$  y la red fija  $R_2$ . La observación del espectro de reflexión indica que a medida que aumenta la deformación, el patrón de los picos de transmisión se va desplazando en forma relativa a las redes  $R_1$  y  $R_3$ , y solo es observable cuando la superposición coincide con la ventana espectral. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento se repite periódicamente al incrementarse la deformación.

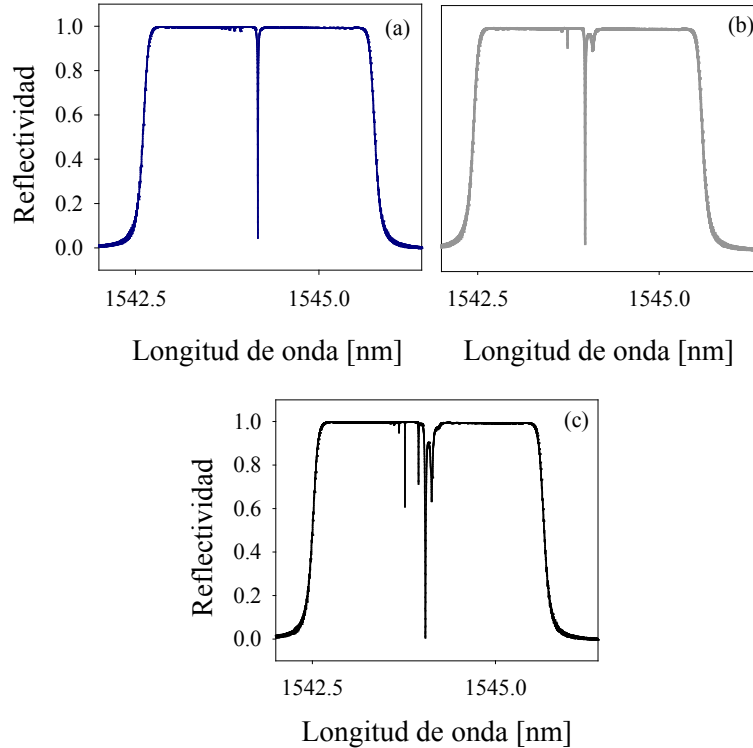


Fig. 6. 29 Espectros de reflectividad para 3 tamaños del defecto: (a) 1 mm (b) 4 mm y (c) 6 mm

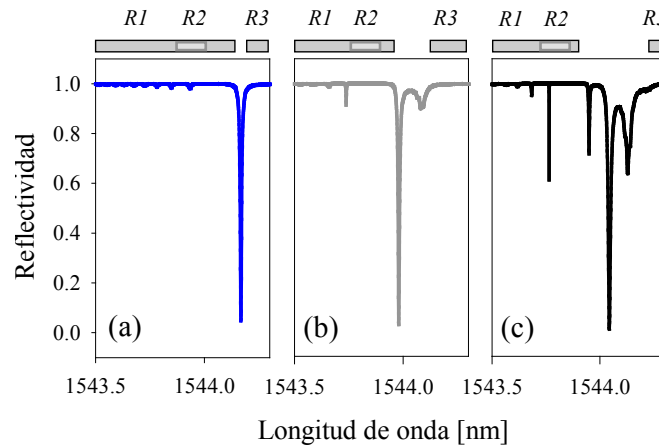


Fig. 6. 30 (a), (b) y (c) Ampliación de las ventanas de transmisión para tres defectos diferentes

Si definimos la fase  $\varphi$  como el ángulo  $\phi$  módulo  $2\pi$  (es decir, la fase  $\varphi$  es el remanente o lo que queda cuando se divide el ángulo  $\phi$  por  $2\pi$ ), podemos escribir el cambio espectral debido al cambio de fase  $\phi$  como:

$$\delta\lambda'_p = -\Delta\lambda_{FSR} \frac{\delta\varphi}{2\pi}, \quad \varphi \in [0, 2\pi] \quad (6.10)$$

El valor de  $\Delta\lambda_{FSR}$  depende inversamente de la longitud efectiva total ( $d_T = d + d_0$ ), donde  $d_0$  es la contribución de las redes locales que depende principalmente de su reflectividad, resultando:

$$\Delta\lambda_{FSR} \propto \frac{1}{(d + d_0)} \quad (6.11)$$

Entonces, reemplazando las Ecs. (6.9) y (6.11) en la Ec. (6.10), el cambio de resonancia  $\delta\lambda'_p$  generada por el cambio de fase  $\delta\varphi$  resulta:

$$\delta\lambda'_p = -B \frac{\lambda_p d \delta\varepsilon}{(d + d_0)} \quad (6.12)$$

donde B es una constante que combina los factores de proporcionalidad definidos en las ecuaciones 6.9 y 6.11 dividido por  $2\pi$  y  $\lambda_p$ . Por lo tanto, la contribución de la grieta a la deformación de la CFBG se puede escribir como:

$$\left[ \frac{\delta\lambda'_p}{\lambda_p \delta\varepsilon} \right]^{(2)} = -B \frac{d}{(d + d_0)} \quad (6.13)$$

Teniendo en cuenta tanto el efecto de *deformación sobre la fibra* <sup>(1)</sup> como *la contribución de la grieta* <sup>(2)</sup>, podemos escribir la pendiente ( $p_d$ ) como una función de la deformación en el *primer ciclo*  $2\pi$  de la fase, de la siguiente manera:

$$p_d = \frac{\delta\lambda_{Total}}{\lambda_p \delta\varepsilon} = \left[ \frac{\delta\lambda}{\lambda_p \delta\varepsilon} \right]^{(1)} + \left[ \frac{\delta\lambda'_p}{\lambda_p \delta\varepsilon} \right]^{(2)} = (1 - p_e) - B \frac{d}{(d + d_0)} \quad (6.14)$$

$$p_d = (1 - p_e) - B \frac{d}{(d + d_0)} \quad (6.15)$$

Para probar este resultado, se calculó la pendiente  $p_d$  para diferentes anchos  $d$  del defecto, para el primer ciclo, es decir, valores pequeños de deformación (véase Tabla 6.4).

$d$ [mm]	$p_d$ [1/ε]
1	0.4485
2	0.3144
4	0.2075
5	0.1838
6	0.1703

Tabla 6. 4 Valores de  $p_d$  calculados para diferentes tamaños de fisuras o grietas



En la Fig. 6.31 considerando  $s_\varepsilon = 1 - p_e = 0.78$  representamos  $(s_\varepsilon - p_d) / d$  contra  $1 / (d + d_0)$  y encontramos una dependencia lineal perfecta tomando  $d_0 = 1.2$  mm,  $B = 0.753$  y pasando por el origen, lo que demuestra que el modelo de Fabry-Perot desarrollado en esta sección parece ser físicamente correcto. La Ec. (6.15) explica la diferencia entre el valor promedio  $s_\varepsilon$  y el valor real  $p_d$  obtenido con las simulaciones. Además, el modelo explica la forma de escalera en términos de la fase módulo  $2\pi$  del defecto generado por la grieta.

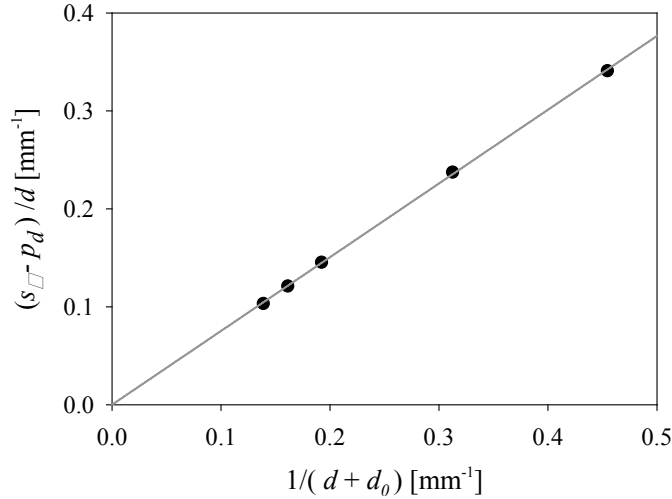


Fig. 6. 31 Dependencia de la desviación de la pendiente con respecto a  $(1 - p_e)$ , normalizado con  $d$ , en  $(d+d_0)^{-1}$

Una vez que se tienen las simulaciones numéricas y un modelo físico, podemos proponer dos aproximaciones para determinar el ancho de una grieta. Asumiremos que existe cierta tensión inicial, producida en el proceso en el que la CFBG es embebida o adherida sobre el material, pero su valor es desconocido. Además, suponemos que somos capaces de aplicar una tensión adicional  $\Delta\varepsilon$  al dispositivo de una manera controlable. Por lo tanto, si podemos medir el valor real de la pendiente  $p_d$ , entonces podemos determinar  $d$  usando la calibración de la Fig. 6.31 que corresponde a la Ec (6.15).

Alternativamente, si se puede medir el período de deformación que define los pasos  $T_\varepsilon$ , entonces se puede determinar la anchura  $d$  de la grieta usando la calibración proporcionada por las simulaciones numéricas y resumidas en la Fig. 6.32 y en la Tabla 6.5. Vemos que es una buena aproximación para considerar una dependencia lineal de  $T_\varepsilon$  con  $(d+d_0)^{-1}$ :  $T \approx C / (d+d_0)$ ,  $C = 786 \mu\varepsilon/\text{mm}$ .

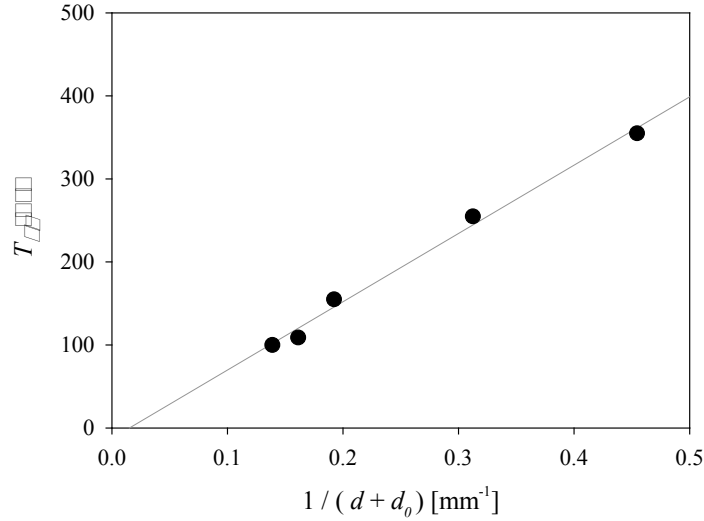


Fig. 6. 32 Dependencia del periodo de deformación con respecto a la longitud efectiva de la cavidad

$T\epsilon$ [ $\mu s$ ]	$d$ [mm]	$1/d+d_0$ [ $mm^{-1}$ ]
355	1	0.4545
255	2	0.3125
155	4	0.1923
109	5	0.1613
100	6	0.1389

Tabla 6. 5 Parámetros para calcular la anchura  $d$  a partir del periodo

#### 6.2.4 Determinación de la posición de la grieta considerando el comportamiento periódico del retardo de grupo con la deformación

Después del análisis llevado a cabo en la sección 6.2.3.1.2, hay dos consecuencias importantes para determinar la posición del defecto o grieta utilizando una CFBG. Primero es el hecho de que la amplitud de los picos de reflectividad y retardo de grupo puede ser pequeña dependiendo del valor real de la tensión, y tal vez no puedan detectarse experimentalmente. Además, en las Figs. 6.29 y 6.30 sabemos que para grietas más grandes se puede observar dos o tres picos en el espectro de reflexión producidos por una sola grieta. En este punto, es importante enfatizar la importancia de poder llevar a cabo una caracterización versus la tensión aplicada. El análisis siguiente se realiza teniendo en cuenta los criterios discutidos en las ecuaciones mostradas en la Sección 6.2.3.1.2 y considerando el comportamiento periódico con la deformación (*respuesta en forma de escalera* representada en la Fig. 6.26 (a)) que limita la precisión al localizar la posición de una grieta. En la Sección 6.2.2 supusimos que la posición espectral de la resonancia es determinada directamente por el chirp de la red, pero después de las simulaciones rigurosas realizadas se concluyó que la respuesta, es más compleja. Si analizamos la Fig. 6.26 (a)

concluimos que la desviación máxima de  $\lambda_p$  con respecto a la pendiente media determina el error máximo, ya que suponemos que la deformación inicial es desconocida. La Ec. (6.12) da el valor de la desviación y su valor máximo corresponde a  $\delta\epsilon = T_\epsilon / 2$ . Por ejemplo, en el caso de  $d = 1$  mm ( $T_\epsilon = 355$   $\mu\epsilon$ ,  $\lambda_p \approx 1.545$   $\mu\text{m}$ ,  $B = 0.753$  y  $d_0 = 1.2$  mm) encontramos una desviación máxima de  $\pm 90$  pm, y según el chirp de la red, el error en la posición  $z$  sería  $\pm 3$  mm. Sin embargo, una vez que se obtiene una primera aproximación, ajustando las simulaciones numéricas para que coincida con la dependencia experimental con la deformación aplicada, debería ser posible refinar la localización de la grieta.

También es posible analizar con cuánta precisión podemos obtener la información sobre la posición de la grieta, fractura o defecto a partir de la medida del retardo de grupo al aplicar una tensión externa. La Fig. 6.33 resume los resultados obtenidos. Como ejemplo se elige el caso para  $d = 1$  mm. Trazamos en esta figura el valor del retardo de grupo medido sobre la pendiente, en la posición de resonancia ( $\tau_g$ ) y el valor real del retardo de grupo en el pico de la resonancia ( $\tau_{gp}$ ) versus la tensión aplicada. El valor esperado (debido al efecto del Fabry-Perot), de acuerdo con la relación básica representada en la Fig. 6.26 (b), sería de 500 ps tal como se indica con una línea de trazos en la Fig. 6.33 (a).

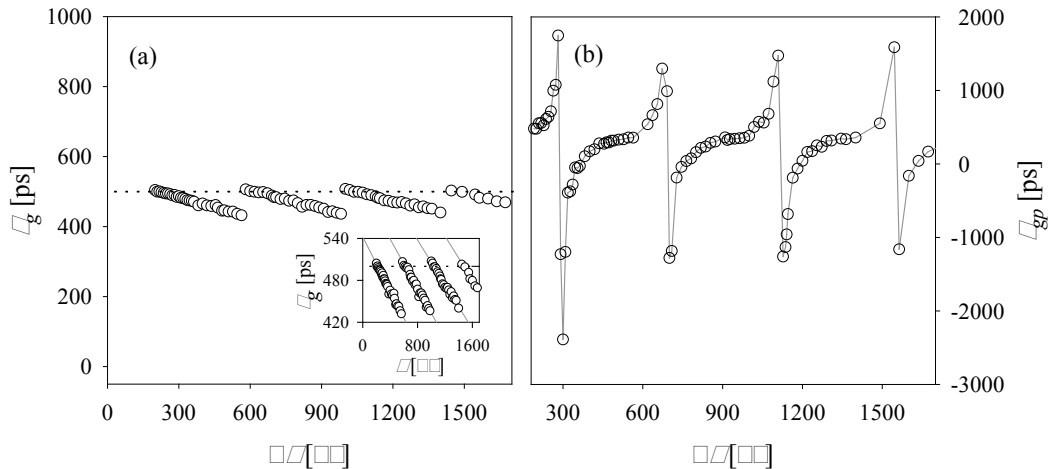


Fig. 6.33 Dependencia de  $\tau_g$  y  $\tau_{gp}$  con la deformación, para  $d = 1$  mm

En la Fig. 6.33 (a) se puede notar que  $\tau_g$  tiene un comportamiento periódico con la tensión que coincide con el período de la escalera ( $T_\epsilon$ ) definido en la Sección 6.2.3.1, Fig. 6.32 (donde  $T_\epsilon = 355$   $\mu\epsilon$  para  $d = 1$  mm). En la Fig. 6.33 (b) también encontramos un comportamiento periódico de  $\tau_{gp}$  frente a la tensión, resultando una curva en forma de diente de sierra horizontal, lo cual es característico de un fenómeno que presente resonancias. Esta fuerte oscilación ayuda a realizar una determinación experimental precisa de  $T_\epsilon$  y  $d$ . Entonces, nuevamente, podemos correlacionar la dependencia del retardo del grupo versus la tensión aplicada con los efectos de Fabry-Perot comentados previamente. Esto permite demostrar que tanto el análisis del espectro de reflectividad como el del retardo de grupo conducen a resultados equivalentes. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, si la medición de  $\tau_g$  frente a la deformación aplicada es factible, entonces con

esta información adicional se podrían ajustar las simulaciones con el experimento y obtener una determinación más precisa de la ubicación espacial de la grieta.

### 6.3 Implementación experimental

A continuación, se muestran algunos resultados experimentales preliminares, obtenidos durante una estadía realizada en el Laboratorio de Fibras Ópticas del Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo de la Universidad de Valencia, España. Algunos problemas surgidos con la fuente de luz necesaria para el grabado de CFBGs en dicho laboratorio, impidieron la realización de un mayor número de mediciones. Una vez en el laboratorio de Fibras Ópticas del CIOp tampoco fue posible continuar con las medidas experimentales, ya que el mismo no cuenta con algunos de los equipos requeridos para realizar dicha tarea. Se decidió mostrar los resultados obtenidos a pesar de lo escasos, ya que concuerdan bastante bien con el Modelo propuesto y analizado.

En las Figs. 6.34 y 6.35, se presenta un esquema de medición simple para aplicar una tensión calibrada con el fin de correlacionar la formación de defectos sobre la red con la deformación que ello induce. De esta manera es posible corroborar experimentalmente el modelo teórico estudiado durante este capítulo. Un segmento de fibra óptica fotosensible de longitud  $l = 110$  mm que contiene a la CFBG, está pegado en dos puntos (**A** y **B**) uno de los cuales (el **A**) se adhirió a un soporte fijo y el otro (**B**) fue adherido sobre un trasladador micrométrico con el fin de aplicar una tensión conocida. El defecto se muestra en una posición particular, que corresponde aproximadamente al centro de la CFBG ( $z \approx 25$  mm). La CFBG tiene una longitud física  $L = 50$  mm, un ancho espectral  $\Delta\lambda = 1.105$  nm y una longitud de onda central de 1543.7775 nm. La misma fue grabada en el Laboratorio de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia, utilizando un láser de Argón duplicado en frecuencia (emisión en 244 nm). Para la medición de la amplitud del espectro de reflexión y del retardo de grupo se utilizó un haz láser sintonizable centrado en 1550 nm, de 0.1 nm de ancho espectral, y un voltímetro vectorial (marca Agilent, modelo 8508A). Durante el experimento, un pequeño segmento de la red de aproximadamente 2 mm (que simulará la grieta o fractura del material), se unió a un elemento rígido para evitar su deformación al aplicar tensión sobre la fibra. La deformación se generó desplazando el trasladador monótonamente en pasos de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  mediante el tornillo micrométrico. De acuerdo a lo antes explicado, la deformación creada sólo afectó a las porciones denominadas  $R_1$  y  $R_3$  de la CFBG total [102].

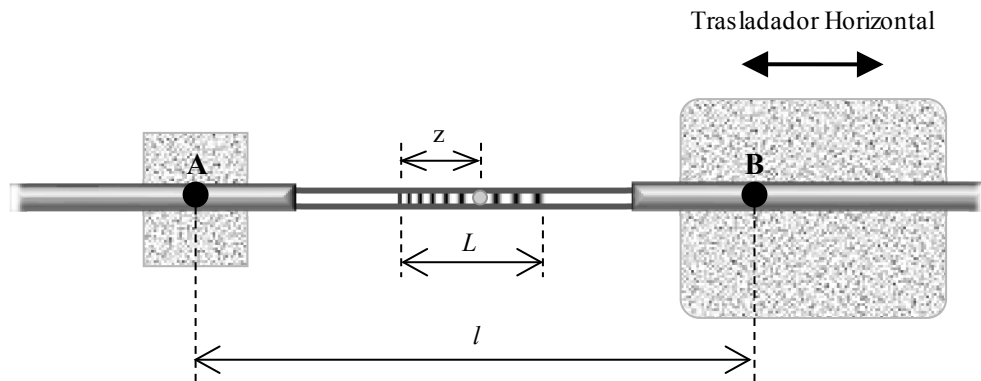


Fig. 6. 34 Vista superior del esquema de medida

En la Fig. 6.35, presentamos la configuración experimental que hemos utilizado para una verificación preliminar del uso de un CFBG para la detección de grietas. De hecho, no hay una CFBG embebida, sino un arreglo experimental alternativo. El efecto de la aparición de dicha grieta se simuló pegando una pequeña porción de la CFBG a un cilindro de aluminio terminado en forma de cono truncado. De este modo, la aplicación de tensiones sobre la fibra no alterará ese segmento de la red.

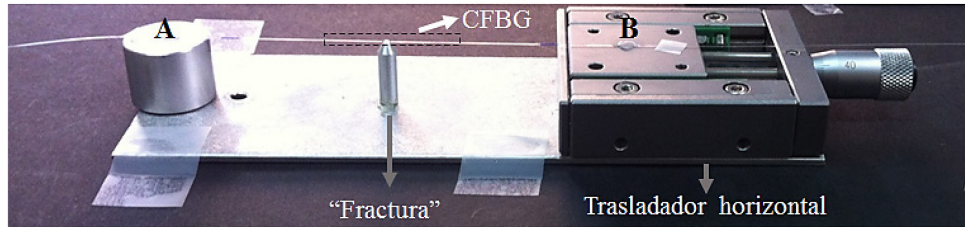


Fig. 6. 35 Montaje experimental

La Fig. 6.36 (a) muestra el espectro de reflectividad y del retardo de grupo de la CFBG obtenidos experimentalmente antes de estirar la fibra con el micrómetro, mientras que la Fig. 6.36 (b) muestra la simulación de tal situación. Aunque no existe ninguna deformación aplicada, los espectros experimentales de la red muestran una leve modulación generada durante la grabación de la misma, así como durante el proceso de curado del pegamento que adhiere el elemento rígido a la CFBG.

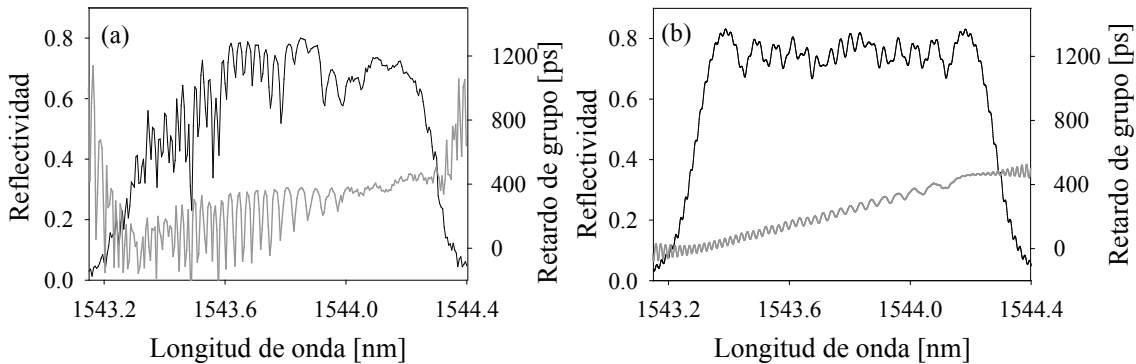


Fig. 6. 36 Condición inicial de la amplitud de reflexión y del retardo de grupo de la CFBG: (a) medida experimental, (b) simulación

La Fig. 6.37 muestra la respuesta espectral de la CFBG luego de aplicar una deformación de  $523 \mu\epsilon$ . Se observa claramente la generación de un pico de transmisión.

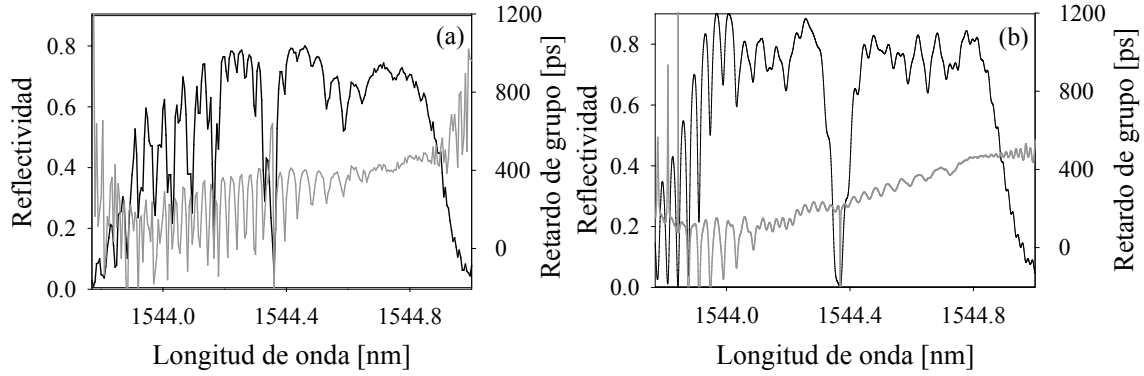


Fig. 6. 37 Reflectividad (trazo negro) y retardo de grupo (trazo gris) para una deformación de 523  $\mu\epsilon$ , (a) experimental, (b) simulación

La Fig. 6.38 representa la posición espacial ( $z$ ) de la falla o fisura en función de la diferencia en longitud de onda ( $\Delta\lambda_p'$ ) entre el pico de transmisión y un borde de la red, para dos valores de la deformación aplicada: 523  $\mu\epsilon$  y 1254  $\mu\epsilon$ . En esta figura, la diferencia de longitud de onda  $\Delta\lambda_p'$  se define desde el pico de transmisión hasta el borde derecho de la red ( $\Delta\lambda_p' = \lambda_{d\epsilon} - \lambda_p$ ), dado que ese lado está mejor definido. A partir de este valor, y recordando que  $z = (\Delta\lambda_p' / \Delta\lambda) L$  donde en este caso es  $\Delta\lambda = 1.105 \text{ nm}$  y  $L = 50 \text{ mm}$ , se calcula el valor de  $z$  para cada una de las deformaciones aplicadas. Observamos que los valores experimentales de  $\Delta\lambda_p'$  para diferentes valores de deformación permanecen aproximadamente constantes, y de acuerdo con la pendiente determinada por el chirp, la posición espacial del defecto obtenida de los experimentos fue de 23.70 y 22.84 mm, que resultan bastante aproximados al valor real fijado por el arreglo experimental (23 mm). Si bien para ambas mediciones la posición física del defecto fue la misma, la diferencia observada en la Fig. 6.39 entre las posiciones obtenidas a partir de la medición, puede atribuirse a errores experimentales, los cuales se estiman en  $\pm 0.45 \text{ mm}$ .

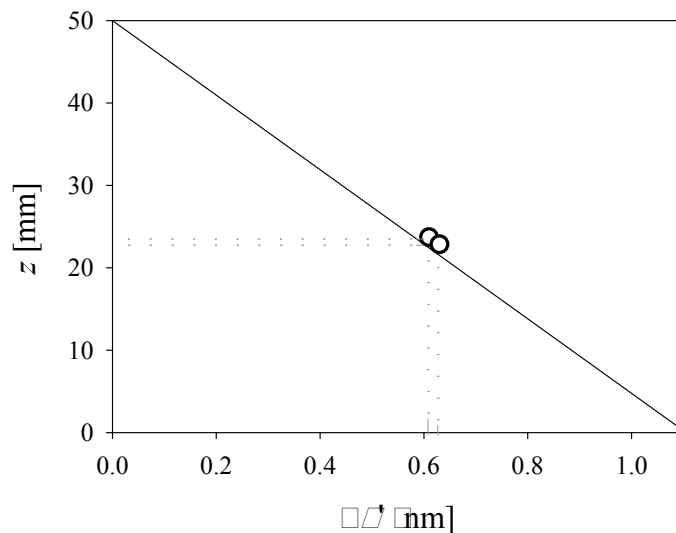


Fig. 6. 38 Determinación experimental de la posición del defecto

Las simulaciones de la Fig. 6.39 (a) y (b) se hicieron ajustando los parámetros teóricos a las medidas experimentales. Aunque solo tenemos mediciones experimentales para 2 valores de tensión (523 y 1300  $\mu\epsilon$ ), hemos procedido a comparar dichos puntos con la dependencia simulada entre la tensión aplicada y la longitud de onda de resonancia (Fig. 6.39 (a)). Podemos ver que los dos puntos experimentales coinciden perfectamente con la respuesta calculada si se considera un tamaño del defecto  $d = 1,6$  mm. Por lo tanto, a pesar de haber supuesto que la zona de red que había sido adherida al elemento rígido era de 2 mm, es evidente que en la práctica resultó algo menor, lo cual es perfectamente atribuible a errores experimentales. Los valores calculados de  $\tau_g$  y  $\tau_{gp}$  se representan en la Fig. 6.40 (a) y (b).

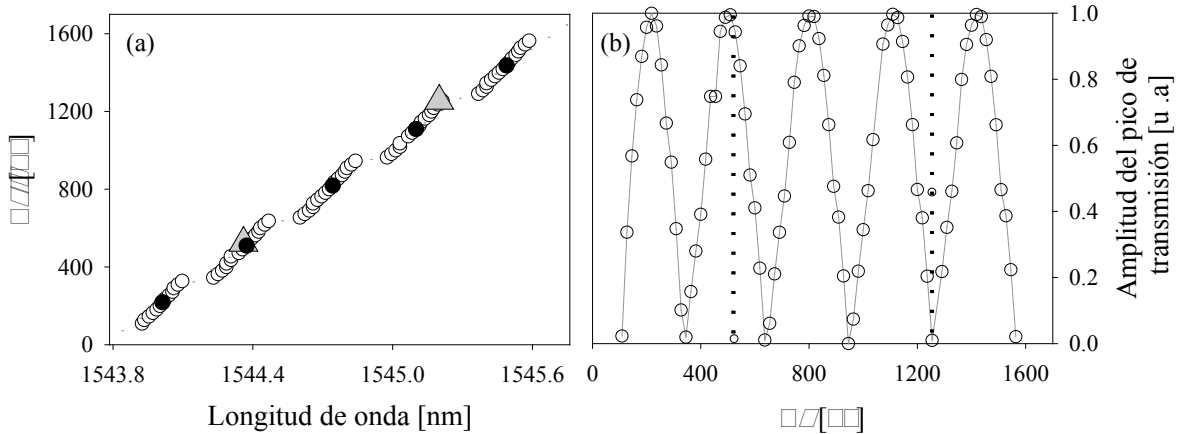


Fig. 6. 39 (a) Deformación aplicada ( $\Delta\epsilon$ ) vs. longitud de onda del pico resonante (simulación: círculos vacíos, puntos experimentales: triángulos grises, mitad de ciclo: círculos llenos), y (b) amplitud del pico de transmisión respecto de la deformación aplicada. En ambos casos  $d=1.6$  mm

Finalmente en la Fig. 6.40 (a) y (b) se muestra el comportamiento del retardo de grupo contra la deformación que describe el proceso de tensión del sistema desde 109  $\mu\epsilon$  a 1600  $\mu\epsilon$ , donde se presentan cinco ciclos. En ambas figuras se puede ver que con 200  $\mu\epsilon$  se llega al primer mínimo de transmisión y con 400  $\mu\epsilon$  se finaliza el primer ciclo. Además, con líneas punteadas se indica que las medidas experimentales están ubicadas en el segundo y cuarto ciclos. Se concluye que el comportamiento obtenido es equivalente al descrito por el modelo planteado.

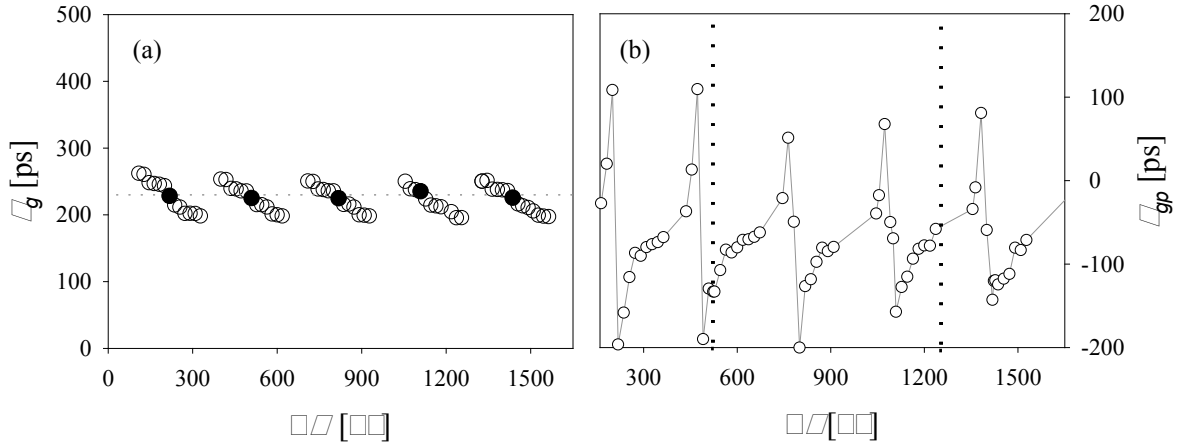


Fig. 6. 40 Dependencia de la posición (a) del retardo de grupo ( $\tau_g$ ) y (b) de su valor en resonancia ( $\tau_{gp}$ ) con la deformación aplicada, para  $d = 1 \text{ mm}$

### Resumen del Capítulo 6

En el Capítulo 6 se planteó un *modelo de una CFBG* formada a partir de un subconjunto de tres redes ( $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ ) utilizando el *Método de la Matriz de Transferencia*. La red  $R_2$  representa una porción de la CFBG que denominamos “defecto” y que permanece invariante ante la aplicación de una deformación. Con el modelo se pretende representar el comportamiento de la CFBG al ser tensionada, excepto una porción de ella que se asimilará a una grieta, fisura o fractura presente en un material al cual se adhiere la CFBG (ya sea superficialmente o embebida en él). Este modelado permite *localizar y caracterizar grietas* producidas en materiales cementicios, poliméricos, etc. en el cual se adhiere la CFBG sensora. Inicialmente se analiza el modelo en presencia de cierta deformación que da lugar a la aparición de una ventana de transmisión tanto en el espectro de reflexión como de retardo de grupo. Se realizaron diferentes pruebas con el objetivo de estudiar el comportamiento del modelo cuando se varían parámetros como el tamaño y la posición del defecto. Mediante una adecuada normalización de los datos, se encontró una primera aproximación para *localizar el defecto o la grieta* utilizando la modulación de la curva de transmisión de la red, dependiente de la deformación aplicada.

Posteriormente, analizando espectralmente el modelo fue posible describir el efecto de la grieta considerando que el defecto (red fija  $R_2$ ) junto con las porciones anterior (red  $R_1$ ) y posterior (red  $R_3$ ) de la red definen un interferómetro de Fabry Perot.

Este análisis demuestra que el uso de CFBG para la caracterización de grietas no es directo y no es posible realizar el análisis con una correlación simple entre la posición espectral de las resonancias y el chirp nominal de la red. Se observó que una sola grieta puede producir varios picos en la respuesta espectral de la red. *Los resultados muestran que midiendo la respuesta frente a la tensión aplicada se pueden superar las principales limitaciones*, ya que la pendiente del desplazamiento de los picos frente a la deformación proporciona *información directa sobre el ancho de la fisura* y permite una *determinación precisa de la posición de la misma*.



## *Capítulo 6. Detección de defectos (grietas) mediante Redes de Bragg con Chirp*

Además, la medición del retardo del grupo frente a la tensión proporciona información redundante que puede utilizarse con fines de verificación o como alternativa a la medición de los espectros de transmisión o reflexión.

Aunque se proporcionan algunos resultados experimentales, todavía se requiere una prueba experimental más precisa para confirmar el modelo con detalle.

## Conclusiones

---

Este trabajo de Tesis tiene como objetivo el diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas basados en redes de Bragg y en el Interferómetro de Fizeau, con vistas a su aplicación en el estudio de materiales (resinas dentales y materiales cementicios), particularmente lo referido a cambios dimensionales, aparición de fisuras, etc.

En el **Capítulo 1**, se hizo una introducción a los *sensores de fibras ópticas* mencionando algunas aplicaciones de los mismos. En el **Capítulo 2**, se describió *detalladamente las redes de Bragg (FBG)* destacando sus técnicas de grabado y caracterización. Además, se planteó un *esquema sencillo para medir vibraciones, en este caso, la frecuencia de resonancia de un cantiléver* utilizando *las FBG* y se implementó la medida experimental para corroborar su funcionamiento.

En la implementación se emplearon redes de Bragg grabadas en el *Laboratorio de Fibras Ópticas del Centro de investigaciones Ópticas - CIOp*. Esta posibilidad de grabar redes con las características espectrales adecuadas a cada necesidad permite el diseño de dispositivos específicos dependiendo de la aplicación.

En el **Capítulo 3**, se mencionaron los principios básicos de los interferómetros y se destacó el *Interferómetro de Fizeau (IF)* por ser de mayor interés para las aplicaciones desarrolladas en la Tesis. También se realizó la medida experimental planteada al final del Capítulo 2 donde se medía la frecuencia de resonancia de un cantiléver, pero esta vez utilizando el IF en fibra óptica. *Las respuestas obtenidas utilizando tanto las FBGs como el IF fueron muy satisfactorias y comparables entre sí.*

En el **Capítulo 4** se aplicaron las dos técnicas ópticas mencionadas anteriormente con el objeto de evaluar *el nivel final de contracción de materiales compuestos fotopolimerizables así como la dinámica del proceso de curado*. Estos materiales se emplean en restauraciones dentales.

Los sensores implementados con FBG tienen la ventaja de poder ser embebidos en el material si degradar sus propiedades. La naturaleza exotérmica de las reacciones de fotopolimerización complica su medición ya que la expansión térmica puede competir con la contracción polimérica. Sin embargo, dado que es posible desafectar la medida realizada con FBG de los efectos térmicos, es posible discriminar en la medición cuál es la contracción que se deriva de la formación de las cadenas de polímero.

En el caso del IF, la implementación de una medida temporal y una medida espectral resultan complementarias y proporcionan una herramienta importante para el análisis del proceso estudiado. La medición temporal permite determinar distancias con alta resolución así como la distancia real al objeto bajo estudio, mientras que la medición espectral elimina la ambigüedad de no conocer la dirección del proceso (cosa que ocurre en la respuesta

temporal). En la medida espectral, el signo de la variación del periodo de las franjas de interferencia determina si se trata de un proceso de expansión o de contracción.

Los métodos discutidos pueden aplicarse no sólo al estudio de la contracción de resinas fotocurables, sino que también *permiten el monitoreo en tiempo real de materiales compuestos* durante el proceso de termocurado.

En el **Capítulo 5**, se analiza la evolución de los cambios dimensionales de morteros a base de cemento desde el estado fresco. Los materiales investigados son mezclas heterogéneas (cemento, materiales de relleno, arena y agua). Inicialmente presentan cierta fluidez y con el paso del tiempo se endurecen convirtiéndose en un sólido, a la vez que las reacciones químicas continúan y este sólido adquiere resistencia. En este tipo de materiales *no se pueden evaluar los cambios dimensionales durante el estado fresco con los métodos mecánicos utilizados convencionalmente*. Este tipo de técnicas pueden ser empleadas solo cuando el material ha alcanzado algún grado de solidificación, lo cual ocurre varias horas después de preparada la mezcla.

En el trabajo aquí presentado fue posible llevar a cabo el seguimiento del proceso de fraguado desde el estado fresco mediante el uso de dos técnicas de medición óptica: un sensor FBG embebido en el material y un interferómetro Fizeau de fibra óptica. En el caso de la red de Bragg, vale la pena resaltar que la medición es posible sólo a partir de que el material se adhiere a ella. En cambio, el IF es capaz de medir variaciones dimensionales desde el instante cero o inmediatamente posterior a preparada la mezcla. Recién cuando la muestra alcanza cierto grado de rigidez, es posible realizar la medición simultánea con técnicas ópticas y mecánicas. La comparación de los resultados obtenidos muestra una muy buena respuesta de los sensores ópticos, similar a la obtenida con técnicas mecánicas convencionales, apoyando así la viabilidad de la medición óptica. Sin embargo, solo el IF es capaz de determinar el instante inicial de deformación cero y a partir de allí medir cambios en el material, los cuales pasan desapercibidos en las otras técnicas que empiezan a medir tiempo después.

Mezclas con diferentes composiciones fueron analizadas y los resultados conseguidos demostraron coherencia con los cambios relativos esperados en función de las formulaciones empleadas. Las pruebas realizadas demostraron una gran repetibilidad. Además, la metodología empleada también permite el uso de pequeñas cantidades de materiales sin pérdida de resolución.

En el **Capítulo 6**, a través del *Método de la Matriz de Transferencia* se logró modelar un sistema de sensado que permitió detectar la posición y ancho de una fisura o grieta en un material en el cual está colocado el sensor constituido por una red de Bragg con chirp (CFBG).

Tanto la respuesta en amplitud como el retardo de grupo de la red, brindan información útil para la caracterización del “defecto” en ella (fisura o grieta). La posición del defecto puede ser determinada gracias al chirp de la red, que fija una correlación entre la posición espacial y los siguientes parámetros: longitud de onda y retardo de grupo. A partir del modelo desarrollado se determinó que midiendo la tensión experimentada por la red a causa de la aparición de la grieta, es posible estimar el ancho de la misma.

En el modelo planteado se consideró la red sensora dividida en tres subredes, una de las cuales se considera invariante y corresponde a la grieta que se quiere emular. Se analizó la respuesta en amplitud y retardo de grupo de la red al variar tanto la posición como el

tamaño del defecto. Al desarrollar el modelo se observó que el defecto en la CFBG daba lugar a la aparición de un pico tanto en el espectro de transmisión de la red como en el del retardo de grupo. Esto puede ser explicado considerando la formación de un interferómetro Fabry-Perot entre las subredes que evolucionan por efecto de la grieta.

Se presentan además resultados experimentales preliminares que verifican los obtenidos a partir de las simulaciones realizadas. Los mismos pueden considerarse como una primera aproximación al análisis de la identificación de fallas generadas durante el curado o fraguado de materiales.

Finalmente, cabe resaltar que *la sensibilidad y resolución de las técnicas ópticas dependen de las características de los instrumentos empleados en las mediciones*. Así por ej. un analizador de espectros ópticos con una resolución de 0.02 nm, permite el desarrollo de sensores de fibra óptica con muy altas prestaciones.

## Perspectivas Futuras

Como trabajo futuro sería de gran interés realizar una medida experimental sobre muestras de material en los que se genere una grieta o fisura debido al desarrollo de procesos físicos o químicos. Esto permitiría aprovechar el conocimiento logrado a partir del análisis del modelo propuesto. Por otro lado, continuar con el análisis del modelo en el caso de la existencia de más de una grieta puede resultar interesante. Además, hasta ahora se realizó todo un estudio del caso en el que aparece una grieta, sería de gran interés estudiar su evolución temporal para aplicaciones por ejemplo en el mantenimiento de estructuras.

A largo plazo, resulta de gran interés el desarrollo de nuevos dispositivos y técnicas de sensado basadas en fibra óptica (sensores de campo evanescente, redes de periodo largo, etc ) e implementación de estos dispositivos en el campo de la ciencia y tecnología. Particularmente una fibra óptica estrechada o “taper” es objeto de estudio en el área de la óptica aplicada desde hace más de dos décadas. Estos dispositivos pueden ser aprovechados como sensor de campo evanescente, principalmente sensores químicos donde se aprovecha la zona más estrecha de la estructura para depositar sustancias cuyas propiedades de absorción óptica cambian en función del parámetro que se desea medir. El Laboratorio de Fibras ópticas cuenta con un equipo para fabricar tapers, lo que constituye una herramienta que facilitaría la implementación de este tipo de sensores.

Por otro lado, el sistema de hidrogenado de fibra que se está implementando en el Laboratorio de Fibras Ópticas – CIOp, permitirá fotosensibilizar diferentes tipos de fibra óptica (dopadas por ej.) facilitando el grabado de distinto tipo de redes (de periodo largo, chirpeadas, con tilt, etc.) sobre ellas. Esto permitirá encarar nuevas aplicaciones enfocadas al sensado de diferentes parámetros.

## Referencias

---

- [1] G. M. y P. Gossing, *Conductores de fibra óptica*. Múnich, 1987.
- [2] O. M. Santa Cruz, “Modulo introductorio principios generales del sistema de fibra óptica,” 2003.
- [3] W. B. Spillman and J. E. Udd, *Field guide to fiber optic sensors*. 2014.
- [4] K. Fidanboyly and H. S. Efendioglu, “Fiber optic sensors and their applications,” in *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*, 2009, pp. 1–6.
- [5] G. Rajan, “Optical Fiber Sensors Advanced Techniques and Applications,” p. 564, 2015.
- [6] B. Gholamzadeh and H. Nabovati, “Fiber Optics Sensors,” *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 42, 2008.
- [7] Félix Rodríguez Barrios *et al.*, “Sensor distribuido Brillouin de deformación y temperatura en fibra óptica asistido con Raman para aplicaciones de ingeniería civil,” pp. 355–360, 2009.
- [8] B. J. Thompson, *Fiber optic sensors*. 2002.
- [9] J. R. Casas and P. J. S. Cruz, “Fiber optic sensors for bridge monitoring,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 362–373, 2003.
- [10] E. Udd, W. Schulz, and J. Sein, “Fiber optic sensor for infrastructure applications,” 1998.
- [11] HBM, “Optical measurement solutions,” 2010.
- [12] J. Villatoro, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “In-Line highly sensitive hydrogen sensor based on Palladium-coated single-mode tapered fibers,” vol. 3, no. 4, pp. 533–537, 2003.
- [13] A. G. Gordo, M. Frövel, M. A. de la T. Lejarraga, and J. M. P. Sanjuanbenito, “Detector de Hidrógeno,” P200302177, 2005.
- [14] N. Davidenko, R. G. Carrodegua, and R. Sastre, “Composites dentales: efecto de la interfase y de otros factores sobre su durabilidad,” *Revista de plásticos modernos*, 2011.
- [15] R. S. and G. Pereira, “Current trends and evolution on dental composites,” 2008.
- [16] E. Holt and M. Leivo, “Cracking risks associated with early age shrinkage,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 521–530, 2004.
- [17] I. del cemento P. A.- ICPA, “Aditivos químicos para hormigones.”
- [18] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method,” *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823–825, 1989.

## Referencias

- [19] B. L. and Y. M. Xiaoyi Dong, Hao Zhang, "Tilted fiber Bragg gratings : principle and sensing applications," *Photonics Sensors*, vol. 1, pp. 6–30, 2011.
- [20] J. Albert, J. Albert, L. Shao, and C. Caucheteur, "Tilted fiber Bragg grating sensors," no. July, 2012.
- [21] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings*. San Diego, California, 2010.
- [22] R. A. Herrera, "Redes de Bragg: fabricación, caracterización y aplicaciones," 2004.
- [23] L. a Weller-Brophy and D. G. Hall, "Analysis of waveguide gratings: application of Rouard's method," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 2, no. 6, pp. 863–871, 1985.
- [24] Agrawal Govind P., "Applications of Nonlinear Fiber Optics," *J. Chem. Inf. Model.*, 2007.
- [25] Y. Qiu and Y. Sheng, "Fiber Bragg Grating modeling," Quebec, Canada, 2000.
- [26] N. K. Berger, B. Levit, B. Fischer, M. Kulishov, D. V Plant, and J. Azaña, "Temporal differentiation of optical signals using a phase-shifted fiber Bragg grating," *Opt. Express*, vol. 15, no. 2, pp. 371–381, 2007.
- [27] S. Udoh, J. Njuguma, and R. Prabhu, "Modelling and simulation of fiber Bragg grating characterization for oil and gas sensing applications," in *First International Conference on Systems Informatics, Modelling and Simulation*, 2014, pp. 213–218.
- [28] E. Paulucci, "Generación y procesamiento de señales ópticas coherentes mediante sistemas de fibra óptica .," 2013.
- [29] I. Micron Optics, "sm125 Optical sensing interrogator," 2006.
- [30] Y. E. Corporation, "AQ6370B optical spectrum analyzer," 2008.
- [31] E. G. Valencia, "Redes de Bragg en fibras ópticas Microestructuradas," Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [32] W. W. Morey, G. Meltz, and W. H. Glenn, "Holographically generated gratings in optical fibers," *Opt. Photon. News*, vol. 1, no. 7, pp. 14–16, 1990.
- [33] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert, "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035–1037, 1993.
- [34] J. M. Lerner, J. Flamand, J. P. Laude, G. Passereau, and A. Thevenon, "Diffraction gratings ruled and holographic - a review," *Period. Struct. gratings, Moirè patterns Diffr. Phenom.*, no. lab 2, 1980.
- [35] M. Okai, S. Tsuji, N. Chinone, and T. Harada, "Novel method to fabricate corrugation for a lambda/4 -shifted distributed feedback laser using a grating photomask," vol. 415, no. 1989, pp. 1987–1990, 1989.
- [36] R. C. Enger and S. K. Case, "Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 20, pp. 3220–3228, 1983.
- [37] N. A. Russo, S. B. Noriega, and R. Duchowicz, "Implementación de sistema óptico para grabado de redes de bragg en fibra óptica," *Inf. Tecnol.*, vol. 22, no. 2, pp. 121–130, 2011.
- [38] S. Noriega, A. Giordana, R. N. A., A. M. M. Yandy, and R. Duchowicz, "Grabado de redes de Bragg en fibra óptica fotosensible utilizando un láser de femtosegundos triplicado en

## Referencias

- frecuencia (póster).” 98ª Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina, 2013.
- [39] P. Pérez-Millán, S. Torres-Peiró, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “Fabrication of chirped fiber Bragg gratings by simple combination of stretching movements,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 49–53, 2008.
- [40] W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas, S. Barcelos, and R. I. Laming, “Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique,” *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 20, pp. 2051–2053, 1995.
- [41] Y. Painchaud, a. Chandonnet, and J. Lauzon, “Chirped fibre gratings produced by tilting the fibre,” *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 3, p. 171, 1995.
- [42] J. Mora, J. Villatoro, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “Tunable chirp in Bragg gratings written in tapered core fibers,” *Opt. Commun.*, vol. 210, no. 1–2, pp. 51–55, 2002.
- [43] HBM, “Redes de Bragg.” [Online]. Available: <https://www.hbm.com>.
- [44] P. P. Parlevliet, *Residual strains in thick thermoplastic composites an experimental approach*. 2010.
- [45] D. H. Gutiérrez, “Sensor de vibraciones con fibra óptica,” Instituto Politécnico Nacional - Escuela superior de Ingeniería mecánica y eléctrica, 2006.
- [46] A. M. M. Y. N. A. R. G. F. A. R. Duchowicz, “Sensor de vibraciones empleando redes de Bragg de fibra óptica (Póster).” 97ª Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina (AFA), Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina, 2012.
- [47] Z. Fang, K. K. Chin, R. Qu, and H. Cai, *Fundamentals of optical fiber sensors* Wiley. 2012.
- [48] J. M. L.-H. A. Quintela, C. Jaúregui, J. Echevarría, “Medida del incremento de índice en fibras fotosensibles usando un interferómetro Mach-Zehnder.”
- [49] L. M. León, “Sensores De Fibra Óptica Codificados En Frecuencia Medida De Voltaje Y Corriente Lluís,” 2002.
- [50] L. de P. Pardo and G. Jodor, “Interferómetro De Sagnac Con Fibra Óptica Para Determinación De Velocidades Angulares,” *An. ...*, 1998.
- [51] Max Born and Emil Wolf, *Principles of Optics*. 1970.
- [52] J. L. Santos, a P. Leite, and D. a Jackson, “Optical fiber sensing with a low-finesse Fabry-Perot cavity,” *Appl. Opt.*, vol. 31, no. 34, pp. 7361–7366, 1992.
- [53] Y. Rao and D. Jackson, “Prototype fibre-optic-based Fizeau temperature sensor using coherence reading and mechanical amplification for medical applications,” *Fiber Opt. Laser Sensors XII*, vol. 2292, no. 1994, 1994.
- [54] F. Pérennès, P. C. Beard, and T. N. Mills, “Analysis of a low-finesse Fabry–Perot sensing interferometer illuminated by a multimode optical fiber,” *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 34, p. 7026, 1999.
- [55] K. I. and T. O. Toshihiko Yoshino, Kiyoshi Kurosawa, “Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and Its sensor applications,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-30, pp. 1612–1621, 1982.
- [56] G. Arenas, “Desarrollo de sensores de fibra óptica: aplicación de un interferómetro de

## Referencias

- Fizeau al estudio de polímeros.,” p. 132, 2009.
- [57] V. G. Ramos, “Investigación y diseño de sensores de fibra óptica por interferometría,” 2014.
- [58] A. Gustavo *et al.*, “Aplicaciones de un sensor de fibra óptica a la medición no invasiva de desplazamientos y vibraciones en el rango micro y sub-micrométrico ,” pp. 1–12, 2007.
- [59] G. F. Arenas and D. Ricardo, “Vitrification of photo-curing resins by embedded cantilever and Fizeau interferometer,” 2011, vol. 8011, pp. 1–7.
- [60] M. A. C. Pardo, “Análisis comparativo in vitro del sellado marginal de restauraciones clase II de resina compuesta realizadas con técnica incremental oblicua versus técnica incremental horizontal,” Universidad de Chile Facultad de odontología, 2014.
- [61] G. F. . Arenas, N. A. . Russo, and R. . c Duchowicz, “Determination of dental composites properties by using a Fizeau fiber interferometer,” *ResearchGate*, no. January, pp. 471–489, 2012.
- [62] G. Arenas, S. Noriega, C. Vallo, and R. Duchowicz, “Polymerization shrinkage of a dental resin composite determined by a fiber optic Fizeau interferometer,” *Opt. Commun.*, vol. 271, no. 2, pp. 581–586, 2007.
- [63] Y. Wang, B. Han, A. Bar-Cohen, and S. Cho, “Fiber Bragg grating sensor to caharacterize curing process-dependent mechanical properties of polymeric materials,” *Elctronic Components Technol. Conf. - IEEE*, pp. 1045–1050, 2007.
- [64] X. G. Vivas, *Fundamentos de operatoria dental*, Segunda ed. 2015.
- [65] 3M Filtek, “3<sup>TM</sup> Filtek<sup>TM</sup> P60 Restaurador Posterior.”
- [66] 3M ESPE, “Filtek<sup>TM</sup> Z250 Restaurador Universal.”
- [67] LUXEON, “Technical Datasheet DS46 -power light source Luxeon III star.”
- [68] G. F. Arenas and R. Duchowicz, “Vitrification of photo-curing resins by embedded cantilever and Fizeau interferometer,” 2011, vol. 8011, p. 80114Y–80114Y–7.
- [69] Angelica María Mesa Yandy; Nélica A. Russo; Gustavo F. Arenas; Ricardo Duchowicz, “Análisis comparativo del empleo de dos técnicas ópticas en el monitoreo de procesos de polimerización de resinas fotocurables (póster).” 98<sup>a</sup> Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina (AFA), San Carlos de Bariloche, Río Negro.
- [70] A. M. M. Yandy, N. A. Russo, G. F. Arenas, J. Antonacci, S. Noriega, and R. Duchowicz, “Analysis of temporal and spectral response of an optical fiber Fizeau interferometer applied to the study of photocurable resins,” *2015 16th Work. Inf. Process. Control. RPIC 2015*, 2015.
- [71] D. R. Antonacci J; Arenas G. F; Mesa Yandy A; Russo N. A., “Estudio complementario de un interferómetro fizeau dual y sus aplicaciones (póster),” 2014.
- [72] J. Antonacci, A. M. Mesa Yandy, N. A. Russo, R. Duchowicz, and G. F. Arenas, “Spectral Fizeau Interferometer applied to dental polymeric resins early shrinkage determination,” 2018.
- [73] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*. 2004.
- [74] H. Gu, G. Song, H. Dhonde, Y. L. Mo, and S. Yan, “Concrete early-age strength monitoring



## Referencias

- using embedded piezoelectric transducers,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 15, no. 6, pp. 1837–1845, 2006.
- [75] B. Glišić and D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. 2007.
- [76] T. A. Hampshire and H. Adeli, “Monitoring the behavior of steel structures using distributed optical fiber sensors,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 53, no. 3, pp. 267–281, 2000.
- [77] W. Liao, C. Lee, J. Chen, and J. C. W. C. Liao, “Monitoring the curing process of concrete composites using plastic optic fiber sensors,” *16th Int. Conf. Compos. Mater. Monit.*
- [78] P. S. André, H. Varum, P. Antunes, L. Ferreira, and M. G. Sousa, “Monitoring of the concrete curing process using plastic optical fibers,” *Measurement*, vol. 45, no. 3, pp. 556–560, 2012.
- [79] D. Luo, Z. Ismail, and Z. Ibrahim, “Added advantages in using a fiber Bragg grating sensor in the determination of early age setting time for cement pastes,” *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 4313–4320, 2013.
- [80] V. Slowik, E. Schlattner, and T. Klink, “Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 473–479, 2004.
- [81] A. C. L. Wong, P. A. Childs, R. Berndt, T. Macken, G. D. Peng, and N. Gowripalan, “Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 6, pp. 490–497, 2007.
- [82] S. J. Mihailov, “Fiber Bragg grating sensors for harsh environments,” *Sensors*, vol. 12, no. 2, pp. 1898–1918, 2012.
- [83] A. V Câmara *et al.*, “Monitoring of Early Age Portland Cement Paste : Optical and RF Approach,” pp. 10–12.
- [84] B. Gli and N. Simon, “Monitoring of concrete at very early age using sti □ SOFO sensor,” *Composites*, vol. 22, pp. 115–119, 2000.
- [85] E. Udd and W. B. Spillman, *Fiber optic sensor an introduction for engineers and scientists*. 2011.
- [86] A. M. Yandy, Raúl L. Zerbino, G. M. Giaccio, N. A. Russo, and R. Duchowicz, “Dimensional stability of materials based on Portland cement at the early stages (Proc. SPIE 9202).,” 2014.
- [87] A. M. Yandy, R. Duchowicz, and R. L. Zerbino, “Characterization of Dimensional Changes of Cement Pastes and Mortars in Fresh State Applying an Interferometric Technique,” vol. 4, no. 10, pp. 530–535, 2015.
- [88] M. Ordoñez, “Fisuras en estructuras de hormigón armado |.” [Online]. Available: <http://arquitectosdejerez.com/fisuras-en-estructuras-de-hormigon-armado/>. [Accessed: 15-Feb-2018].
- [89] J. Kaufmann, F. Winnefeld, and D. Hesselbarth, “Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 5, pp. 541–549, 2004.
- [90] B. Ortega, J. L. Cruz, M. V. Andrés, A. Diez, D. Pastor, and J. Capmany, “Microwave phase

## Referencias

- shifter based on fibre Bragg grating,” *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 21, pp. 2051–2053, 1998.
- [91] F. Ouellette, “Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 847–849, 1987.
- [92] K. O. Hill *et al.*, “Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiberdispersion,” *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 17, pp. 1314–1316, 1994.
- [93] C. Gen-Xiang, L. Xung, Y. Ling, J. Shui-sheng, G. Huang, and W. Wei, “Chirped Fiber Bragg grating for Optical fiber dispersion compensation,” *Chin. Phys. Lett.*, vol. 13, 1996.
- [94] I. Riant, S. Gurib, J. Gourhant, P. Sansonetti, C. Bungarzeanu, and R. Kashyap, “Chirped fiber Bragg gratings for WDM chromatic dispersion compensation in multispan 10-Gb/s transmission,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 5, no. 5, pp. 1312–1324, 1999.
- [95] A. Khare and J. Singh, “Design and Study of Chirped Fiber Bragg Grating for Sensing of Hazardous Gases,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 23, no. 9, pp. 40–43, 2011.
- [96] P. Bettini, E. Guerreschi, and G. Sala, “Development and experimental validation of a numerical tool for structural health and usage monitoring systems based on chirped grating sensors,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, pp. 1321–1341, 2015.
- [97] Y. Okabe, R. Tsuji, and N. Takeda, “Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 1, pp. 59–65, 2004.
- [98] J. Palaniappan *et al.*, “Changes in the reflected spectra of embedded chirped fibre Bragg gratings used to monitor disbonding in bonded composite joints,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 13, pp. 2847–2853, Oct. 2007.
- [99] R. L. Rito, A. D. Crocombe, and S. L. Ogin, “Health monitoring of composite patch repairs using CFBG sensors: Experimental study and numerical modelling,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 100, pp. 255–268, Sep. 2017.
- [100] R. Kashyap and M. D. L. Rocha, “On the group delay characteristics of chirped fibre Bragg gratings,” *Opt. Commun.*, no. July, pp. 19–22, 1998.
- [101] Y. O. Barmenkov, D. Zalvidea, S. Torres-Peiró, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, “Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings,” *Opt. Express*, vol. 14, no. 14, p. 6394, 2006.
- [102] A. M. Yandy, J. L. Cruz, N. A. Russo, R. Duchowicz, and M. V. Andrés, “Determination of the position of defects generated within a chirped fiber Bragg grating by analyzing its reflection spectrum and group delay,” in *paper LTu4A.36*, 2016.
- [103] A. M. Mesa Yandy, J. L. Cruz, N. A. Russo, M. V. Andres, and R. Duchowicz, “Propiedades espectrales de una red de Bragg de periodo variable que incluye un segmento aislado de deformaciones externas,” 2017.