

**ESTUDIO, FABRICACIÓN Y APLICACIÓN DE
REDES DE PERÍODO LARGO EN FIBRAS
ÓPTICAS PARA EL DESARROLLO DE
SENSORES DE HUMEDAD EMBEBIBLES EN
MATERIALES CEMENTÍCEOS**

Ing. Diego Horacio Alustiza

Directora

Dra. Nélide Araceli Russo

Codirector

Dr. Hugo Gerardo Botasso

Tesis para acceder al grado de Doctor en Ingeniería Mención Materiales



Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional La Plata

2023

“Optical fibers are a revolution, comparable to the invention of the telephone or the television”.

(Las fibras ópticas son una revolución tecnológica comparable a la invención del teléfono o la televisión)

Charles Kao

Premio Nobel de Física 2009

Dedicatoria

A mi hermana... a quien extraño con toda mi alma y a quien no veo desde su partida para reunirse con nuestro Creador, aquella tarde fría del 8 de junio del 2002.

A mi madre... porque, sintiéndome abrazado por el amor infinito que desde siempre ella me regaló, sigue iluminando mis pasos desde el cielo invitándome a caminar en la dirección que me haga mejor persona.

Agradecimientos

A los tres amores de vida personificados en mi esposa y mis dos hijas, por la paciencia que me han tenido y por la compañía permanente que me han dado resignando generosamente muchos momentos en familia para que yo pueda enfrentar y responder al desafío de aspirar al título de Doctor.

A mi padre, que con su ejemplo moral y su admirable actitud como profesional de la Ingeniería inspiró en mí el gusto por las cuestiones técnicas relativas a dicha área disciplinar, guiándome y conteniéndome desde mis primeros años en la vida académica.

A mi directora, la Dra. Nélide A. Russo (CIOp – CIC) por sus invaluable aportes, su constante dedicación a mi formación científica, su gran generosidad al momento de aconsejarme cada paso a dar, y su buena predisposición a enseñarme sus métodos conforme a su experiencia profesional y experticia temática. Mis más sentidos agradecimientos a ella, por haberme permitido ser parte de su línea de investigación desde mediados del 2017 brindándome la oportunidad de seguir aprendiendo.

Al Dr. Gerardo Botasso (UTN FRLP) quien, confiando en mí ciegamente, asumió la responsabilidad de codirigir esta Tesis en un estado avanzado de desarrollo.

A la Dra. Anahí López (LEMIT – CIC), por la fuerza y el ánimo que siempre me contagió, por ser quien me impulsó a comenzar mis estudio de posgrado, por oficiar de nexo con las personas y con las facilidades del LEMIT, por colaborar con gran entusiasmo y pujanza en todas las actividades llevadas a cabo en forma conjunta asistiendo con ideas acertadas, por facilitarme su conocimiento de manera plenamente desinteresada y por brindarme la provisión de insumos de importancia capital... pero por sobre todo, por concederme el honor de regalarme su amistad.

Al Ing. Marcos Mineo (CIOp – CONICET), mi gran amigo y compañero de viaje en el CIOp desde el año 2006, por su apoyo, por su inestimable e incondicional ayuda y por sus tanto inspiradas como agraciadas ideas para superar obstáculos.

Al Dr. Yury Villagrán, quien fuese mi codirector hasta mediados del 2022, por la generosa actitud que tuvo en hacerme sentir parte del equipo de trabajo al que él perteneció en el LEMIT, brindándome el campo de aplicación ingenieril del tema de esta Tesis, y por su apoyo de excelencia en el área de los materiales cementíceos.

A la Dra. Fabiana Prodanoff (UTN FRLP) y la Ing. Susana Juanto, por el apoyo incondicional que me dieron para que crezca y avance en mi carrera académica en el marco de las actividades docentes y de investigación que realizo como profesor de la materia Física II y en el Grupo IEC respectivamente (Depto. de Cs. Básicas de la UTN FRLP).

A las autoridades del CIOp (Director Dr. Daniel Schinca y miembros de la Comisión Directiva), por brindarme el apoyo institucional y el permiso de asociarme a la línea de investigación de la Dra. Nélica Russo propiciando así mi ingreso formal al Grupo de Fibras Ópticas del CIOp.

A las autoridades del LEMIT y de la UTN FRLP por permitir, apoyar y alentar el trabajo colaborativo entre instituciones.

A todos los mencionados, muchas gracias por ayudarme a recorrer este largo, empedrado y sinuoso sendero que simboliza el esfuerzo de realizar una carrera académica de la envergadura de un doctorado a los cuarenta y pico de edad... y por supuesto, por animarme a formalizar académicamente lo que se presenta en esta Tesis Doctoral llamada “Estudio, Fabricación y Aplicación de Redes de Período Largo en Fibras Ópticas para el Desarrollo de Sensores de Humedad Embebibles en Materiales Cementíceos”... mi Tesis Doctoral.

Resumen

La necesidad de contar con estructuras civiles confiables es un fuerte desafío de la Ingeniería Civil. La falta de mantenimiento trae como consecuencia un alto costo económico en reparación de estructuras que presentan evidencias de deterioro avanzado. Por este motivo, la implementación de sistemas de alarma temprana que detecten la aparición de procesos agresivos para la salud de las estructuras, es susceptible de ser tenida en cuenta en cualquier proyecto asociado a una estructura de gran porte. Las técnicas de monitoreo de salud de estructuras demostraron ser mecanismos beneficiosos para alcanzar metas de mantenimiento, en particular aquellas vinculadas a estructuras de hormigón armado. En este escenario y considerando la permanente superación tecnológica que se verifica en el ámbito de las fibras ópticas, los sensores implementados con éstas se presentan en la actualidad como elementos de sensado altamente atractivos para asistir a la Ingeniería Civil en el objetivo de lograr sistemas de monitoreo de salud confiables, robustos y durables.

Una estructura de hormigón interactúa con su entorno de diferentes maneras durante su ciclo de vida. Más allá de las interacciones para las que se diseñó, existen otras que pueden generar cambios en su desempeño funcional, de seguridad o estético. Algunos agentes ambientales son considerados nocivos para el hormigón porque representan posibles causas de daño estructural (por ejemplo, pueden aparecer diferentes patologías debido a procesos de carbonatación, ingreso de cloruros y/o sulfatos, entre otros). La presencia de agua (en fase líquida o gaseosa) dentro del material juega un rol preponderante en todos los fenómenos de transporte y de degradación. Por ello, el conocimiento del nivel de humedad interna en diferentes ubicaciones estratégicas de una estructura de hormigón es un elemento de juicio de gran importancia para los ingenieros civiles durante la instancia de tomar decisiones relacionadas con el mantenimiento. Desde el punto de vista físico, el vapor de agua se difunde dentro de la matriz de hormigón debido a un gradiente de concentración del contenido de moléculas de agua que existe entre el entorno que rodea la estructura y el interior del material en sí mismo. Por ello, contar con sensores embebidos en la estructura de hormigón para monitorear la humedad relativa interna representa un recurso tecnológico de gran valor.

En este trabajo de Tesis Doctoral se presentan los resultados obtenidos en el estudio y fabricación local de un tipo de dispositivo grabado dentro de una fibra óptica llamado *red de período largo*, con el objetivo de ser aplicado como elemento sensor en la determinación del nivel de humedad en un dado punto interno de una estructura de material cementíceo. Las acciones asociadas al plan de actividades de esta Tesis Doctoral fueron ejecutadas empleando métodos y técnicas esencialmente experimentales.

Entre los emergentes del trabajo se observa la adaptación, depuración e implementación práctica de una técnica de generación de redes de período largo en fibras ópticas que potencialmente puede proveer de este tipo de elementos tanto al Sistema Científico y Tecnológico Nacional como al campo industrial privado, considerando que no existen antecedentes publicados al respecto en el ámbito nacional.

Los resultados de los estudios realizados acreditan el esfuerzo de evaluar el uso de los materiales y dispositivos ópticos ensayados para un potencial desarrollo de un sensor de HR basado en los emergentes de la misma. Se concluyó que tanto la simpleza de implementación de las técnicas empleadas como las bondades observadas en los resultados de desempeño general del sensor de HR, son elementos de juicio que merecen ser evaluados en caso de efectivizarse un desarrollo tecnológico orientado al diseño de un sensor basado en redes de período largo en fibra óptica.

Abstract

The need for reliable civil structures is a really tough challenge for Civil Engineering. The lack of maintenance generates a high economic cost in repairing structures which have evidence of advanced deterioration. For this reason, the implementation of early warning systems that detect the appearance of aggressive processes for the health of structures is likely to be taken into account in any project associated with a large structure. Structure health monitoring techniques have proven to be beneficial mechanisms to achieve maintenance goals related to reinforced concrete structures. In this scenario and considering the continuous technological improvement in the field of optical fibers, the sensors implemented with them are nowadays presented as highly attractive sensing elements to assist Civil Engineering in order to achieve reliable, robust and durable monitoring systems.

A concrete structure interacts with its environment in different ways during its life cycle. Beyond the interactions for which the structure was designed, there are other interactions that can generate changes in its functional, safety or aesthetic performance. Some environmental agents are considered harmful to concrete because they represent possible causes of structural damage (for example, different pathologies may appear due to carbonation processes, entry of chlorides and/or sulfates, among others). The presence of water (liquid or vapor) within the material plays an essential role in all transport and degradation phenomena. For this reason, knowledge related to the internal humidity level in different strategic places of a concrete structure is a highly important element of judgment for civil engineers when making maintenance decisions. From a physical point of view, water vapor diffuses within the concrete matrix due to a concentration gradient of water molecule that exists between the structure surrounding environment and the interior of the material itself. Therefore, having sensors embedded in the concrete structure to monitor internal relative humidity represents a technological resource of great value.

This Doctoral Thesis presents the results obtained in the study and local manufacture of a type of device engraved inside an optical fiber called *long period grating*, with the aim of being applied as a sensor element in the determination of a civil structure internal humidity level. All the actions related with the activity plan were executed using essentially experimental methods and techniques.

One of the main goals of this Doctoral Thesis is the adaptation, improvement and practical implementation of a technique to generate long period grating in optical fibers that can potentially provide this type of elements to both, the National Scientific and Technological System as well as the private industrial field.

The results presented here justify evaluating the use of the materials and optical devices studied and tested in this Thesis for a potential development of a humidity sensor based on long period gratings in optical fiber. It is concluded that both the simplicity of implementation of the techniques used and the acceptable results of the general performance of the humidity sensor are elements of judgment that deserve to be evaluated in a potential technological development oriented towards the design of a sensor like the one implemented in this Thesis.

Índice

Dedicatoria	V
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice	XIII
Lista de figuras	XIX
Lista de tablas	XXIII
Notación	XXV
Acrónimos, abreviaturas y siglas	XXVII
1. Introducción	1
1.1. Presentación del tema de la Tesis.....	3
1.2. Antecedentes	5
1.3. Justificación / Fundamentación teórica	6
1.4. Definición del problema científico	7
1.5. Objetivo de la Tesis	7
1.6. Organización del Trabajo de Tesis.....	7
1.7. Referencias.....	8
2. Marco conceptual	9
2.1. Introducción	11
2.2. Durabilidad del hormigón	11
2.3. Indicadores de durabilidad.....	15
2.4. Métodos convencionales para determinación de algunos parámetros de evaluación 17	
2.4.1. Permeabilidad al aire	17
2.4.2. Permeabilidad al agua	18
2.4.3. Absorción capilar.....	18
2.4.4. Penetración de cloruros	18
2.4.5. Velocidad de carbonatación.....	19
2.5. Diseño enfocado a la durabilidad de las estructuras	19
2.6. Sensores	20
2.6.1. Generalidades	20
2.6.2. Sensores de fibra óptica.....	21

2.6.2.1. La fibra óptica.....	23
2.6.2.2. Principio de funcionamiento de un OFS.....	24
2.6.2.3. Clasificación de los OFS	25
2.6.3. Aplicación de OFS en el campo de los materiales cementíceos	26
2.6.4. Redes de período largo en fibras ópticas (LPG)	27
2.6.4.1. Generalidades	27
2.6.4.2. Determinación de las características de acoplamiento entre modos de propagación en una LPG	34
2.6.4.3. LPG empleadas como elementos sensores.....	37
2.6.4.4. Análisis de sensibilidades	38
2.6.4.5. Ventajas de los sensores basados en el uso de LPGs.....	42
2.7. Estado del arte del empleo de LPGs en materiales cementíceos	43
2.8. Referencias.....	44
3. Fase experimental I. Generación de LPGs	49
3.1. Comentarios previos	51
3.1.1. Técnicas de fabricación de LPGs.....	52
3.1.1.1. Inducción mecánica.....	53
3.1.1.2. Inducción por exposición UV.....	53
3.1.1.3. Inducción por ablación láser	55
3.1.1.4. Inducción por arco eléctrico.....	56
3.1.2. Antecedentes locales	57
3.2. Técnica implementada para la generación de LPGs	57
3.2.1. Arreglo experimental	61
3.2.2. Proceso aplicado para la formación de un μ -taper.....	67
3.3. Respuesta espectral típica de una LPG generada localmente	68
3.4. Ciclo de crecimiento del pico de atenuación durante la generación de la LPG	69
3.5. Sintonización de la ubicación del pico de atenuación en función del período de la red	70
3.6. Modelo de predicción de la posición del pico de atenuación.....	71
3.7. Variabilidad del proceso de fabricación	72
3.8. Características típicas de las LPGs generadas localmente	74
3.9. Determinación de sensibilidades	75
3.9.1. Sensibilidad a cambios del índice de refracción del medio circundante (n_{mrf})	75
3.9.1.1. Arreglo experimental implementado.....	75

3.9.1.2. Resultados	78
3.9.2. Sensibilidad a cambios de la temperatura (T)	79
3.9.2.1. Arreglo experimental implementado.....	79
3.9.2.2. Resultados	80
3.9.3. Sensibilidad a cambios de <i>strain</i> (ϵ)	82
3.9.3.1. Arreglo experimental implementado.....	82
3.9.3.2. Resultados	83
3.10. Referencias.....	84
4. Fase experimental II. Implementación de LPGs para el sensado óptico de humedad	87
4.1. Introducción	89
4.1.1. Motivaciones tecnológicas	89
4.1.2. Definiciones fundamentales relativas a HR.....	90
4.1.3. Implementación de una LPG como sensor de humedad	91
4.2. Mejora de la sensibilidad a cambios de la HR.....	93
4.2.1. Criterio de selección del material para la conformación del <i>coating</i> de HR.....	95
4.2.2. Generación del <i>coating</i> de HR.....	96
4.2.2.1. Uso de PU	96
4.2.2.2. Uso de PU+TiO ₂	97
4.2.2.3. Uso de PVA	97
4.2.2.4. Uso de PVA+TiO ₂	97
4.2.2.5. Método de deposición del <i>coating</i> sobre la fibra óptica	97
4.2.3. Arreglo experimental utilizado para la determinación de la sensibilidad a cambios de la HR	100
4.2.3.1. Descripción de la Cámara de HR	101
4.2.3.2. Software de soporte.....	107
4.2.3.3. Dinámica de la cámara de humedad.....	108
4.2.4. Consideraciones relativas al uso del instrumental.....	109
4.3. Validación del aumento de sensibilidad a la HR con los <i>coatings</i> propuestos	110
4.3.1. PVA	110
4.3.2. PVA + TiO ₂	111
4.3.3. PU	112
4.3.4. PU + TiO ₂	113
4.3.5. Elección del <i>coating</i>	114

4.4. Diseño estructural del sensor embebible en mezcla cementícea.....	115
4.4.1. Diseño conceptual del encapsulado.....	116
4.4.2. Descripción geométrica.....	117
4.4.3. Sellos laterales (tapones)	118
4.4.4. Termocupla (TC)	118
4.4.5. Configuración física alcanzada en la fase 2	121
4.6. Referencias.....	121
5. Fase experimental III. Ensayos en pasta de cemento	125
5.1. Comentarios previos	127
5.2. Estrategia de avance 1	128
5.2.1. Instalación del sensor experimental en la probeta de mezcla cementícea	128
5.2.2. Preparación de la probeta de PDC	133
5.2.3. Descripción del ensayo.....	136
5.2.4. Resultados y discusión preliminar de la estrategia 1	137
5.3. Estrategia de avance 2	137
5.3.1. Instalación del sensor experimental en la probeta de mezcla cementícea	139
5.3.2. Preparación de la probeta de PDC	141
5.3.3. Descripción del ensayo.....	144
5.3.3.1. Colocación del sensor experimental dentro del encapsulado y montaje de la probeta dentro de la cámara de humedad	145
5.3.3.2. Acondicionamiento de la probeta.....	148
5.3.3.3. Ejecución del ensayo	149
5.3.4. Resultados de la estrategia 2	149
5.4. Referencias.....	150
6. Discusión.....	151
6.1. Respecto de los resultados alcanzados.....	153
6.1.1. Fase experimental 1: Generación de LPGs.....	153
6.1.2. Fase experimental 2: Implementación experimental de un sensor de humedad	155
6.1.3. Fase experimental 3: Ensayos en pastas de cemento.....	156
6.1.3.1. Respecto del arreglo experimental implementado	157
6.1.3.2. Influencia de factores ambientales no controlados.....	157
6.2. Limitaciones de los estudios realizados	159
6.2.1. Respecto del material usado para embeber el sensor experimental	159

6.2.2. Respecto del efecto del arreglo experimental sobre el comportamiento de la fibra óptica.....	160
6.2.3. Respecto del tratamiento estadístico de los ensayos ejecutados	160
6.3. Consideraciones relativas a los sensores basados en LPG en el campo de la Ingeniería Civil	161
6.4. Referencias	161
7. Conclusiones	163
7.1. Comentarios previos	165
7.2. Conclusiones generales	166
7.2.1. Fase experimental 1	166
7.2.2. Fase experimental 2	167
7.2.3. Fase experimental 3	167
7.3. Investigaciones futuras	168
7.4. Desarrollos tecnológicos futuros.....	170
7.5. Publicaciones y presentaciones vinculadas con el trabajo de Tesis.....	171
7.5.1. Congresos y reuniones científicas	171
7.5.2. Revistas nacionales e internacionales.....	172
Apéndices.....	175
A.1. Código del programa CH03V06.....	175
A.2. Interfaz de usuario de la aplicación <i>Interrogador Cámara de Humedad</i>	181

Lista de figuras

Figura 2. 1. Representación de un sensor en términos de la teoría de señales y sistemas.	20
Figura 2. 2. Confinamiento de luz en una fibra óptica.	23
Figura 2. 3. Interacción entre un OFS y el medio que lo rodea.....	25
Figura 2. 4. Esquema de una LPG en fibra óptica. Acoplamiento de luz del núcleo al revestimiento de la fibra óptica al atravesar una LPG.	30
Figura 2. 5. Arreglo experimental para la determinación del espectro de transmisión de una LPG.	31
Figura 2. 6. Espectro de la radiación luminosa: (a) antes y (b) después de atravesar la LPG.	32
Figura 2. 7. Descripción geométrica de una LPG.	33
Figura 2. 8. Modelo de tres capas de un segmento rectilíneo de fibra óptica.	35
Figura 2. 9. Perfil radial del índice de refracción.	36
Figura 2. 10. Efecto de la variación de n_{mrf} , T y ϵ sobre la posición del <i>dip</i> de atenuación.	38
Figura 3. 1. Formación de una LPG inducida mecánicamente.....	53
Figura 3. 2. Formación de una LPG inducida por exposición UV.	55
Figura 3. 3. Formación de una LPG inducida por ablación láser.	56
Figura 3. 4. Formación de una LPG inducida por arco eléctrico.	57
Figura 3. 5. Perfil axial de un segmento de una fibra óptica que posee un μ -taper en la zona central.	58
Figura 3. 6. Perfil de la fibra óptica antes y durante la aplicación de un arco eléctrico para la formación del μ -taper.	59
Figura 3. 7. Modelo geométrico para el cálculo del estiramiento conforme a la reducción del diámetro.	60
Figura 3. 8. μ -taper logrado en el laboratorio.	61
Figura 3. 9. a) Vista transversal de la disposición de la fibra entre los electrodos de la empalmadora; b) zona de influencia del arco eléctrico.....	62
Figura 3. 10. Esquema del montaje utilizado.	63
Figura 3. 11. Arreglo experimental para la generación de LPGs.	64
Figura 3. 12. Arreglo experimental completo (con monitoreo de evolución del espectro de transmisión) para la generación de LPGs.	65
Figura 3. 13. Fotografía de una fibra óptica con una LPG grabada localmente.	66
Figura 3. 14. Captura de pantalla del OSA	68
Figura 3. 15. Respuesta a la transmisión de una fibra con y sin LPG grabada.	69
Figura 3. 16. Ciclo de crecimiento del pico de atenuación durante la fabricación de una LPG.	70
Figura 3. 17. Características de transmisión de un conjunto de LPGs de diferente período de la red.	71
Figura 3. 18. Posición del pico de atenuación (λ) vs. período de red (Λ).	72

Figura 3. 19. Esquema del arreglo experimental implementado para el ensayo de sensibilidad al cambio de n_{mrf} (arriba); arreglo físico (abajo).....	76
Figura 3. 20. LPG embebida en un líquido de índice de refracción conocido.	77
Figura 3. 21. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. índice de refracción del medio que rodea a la fibra (n_{mrf}).	78
Figura 3. 22. Esquema del arreglo experimental montado para el ensayo de sensibilidad al cambio de T (arriba); cámara de aislación con la fuente de radiación IR (abajo).	80
Figura 3. 23. Variación de la posición espectral del pico de atenuación debido a la variación de la temperatura.	81
Figura 3. 24. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. temperatura (T).	81
Figura 3. 25. Esquema del arreglo experimental montado para el ensayo de la sensibilidad al cambio de \mathcal{E} (arriba); montaje físico (abajo).....	83
Figura 3. 26. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. <i>strain</i> (\mathcal{E}).....	84
Figura 4. 1. La existencia de capilares y poros en el seno del hormigón propician el ingreso de aire humedecido.	90
Figura 4. 2. Efecto del cambio del contenido de agua en el medio que rodea la fibra sobre la posición espectral del pico de atenuación presente en la característica de transmisión de una LPG.	92
Figura 4. 3. Sistema empleado para realizar el tercer paso del procedimiento de deposición de la capa sensibilizadora sobre la LPG.	99
Figura 4. 4. Termocupla inserta en el disco de aluminio.	99
Figura 4. 5. Esquema de la cámara de HR con sus medidas y sistema de cierre.	102
Figura 4. 6. Diagrama en bloques de la cámara de HR construida.	103
Figura 4. 7. Arreglo experimental empleado para realizar los ensayos de barrido en HR.	106
Figura 4. 8. Diagrama de comunicación digital Arduino – PC/Notebook.	108
Figura 4. 9. Respuesta temporal de la cámara de humedad ante la apertura de la batea humidificadora.....	109
Figura 4. 10. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PVA.	111
Figura 4. 11. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PVA+TiO ₂	112
Figura 4. 12. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PU.....	113
Figura 4. 13. Posición espectral del pico de atenuación en función de la HR para una LPG con coating de PU + TiO ₂	114
Figura 4. 14. Diagrama conceptual del encapsulado implementado.....	117
Figura 4. 15. Características dimensionales del tubo.	117
Figura 4. 16. Arreglo físico implementado para realizar el proceso de aplicación del pegamento en los extremos del encapsulado.	118
Figura 4. 17. Arreglo experimental montado para determinar la curva de calibración de la TC.	119
Figura 4. 18. Detalle de la instalación de la TC sobre la platina térmica para la ejecución del ensayo de caracterización.....	120

Figura 4. 19. Fuerza electromotriz inducida por efecto Seebeck en los terminales de la TC vs. la temperatura de la platina.	120
Figura 4. 20. Configuración física final del sensor experimental de HR.	121
Figura 5. 1. Estructura de soporte del sensor para su manipulación (caballete).	129
Figura 5. 2. Ubicación del sensor sobre el caballete.	130
Figura 5. 3. Ubicación del caballete dentro de la probeta de PDC.	130
Figura 5. 4. Montaje del sensor comercial usado como referencia.	131
Figura 5. 5. Ensamble sensor experimental/DHT22/caballete.	132
Figura 5. 6. Ensamble ubicado en un molde triple.	133
Figura 5. 7. Molde con la preparación en estado fresco. Se observan los accesos de los puertos de fibra óptica, los cables de la TC y el sensor de referencia.	135
Figura 5. 8. Arreglo experimental montado para la realización del ensayo siguiendo la estrategia 1.	136
Figura 5. 9. Molde diseñado para la realización de las probetas prismáticas usadas en la estrategia 2.	139
Figura 5. 10. Corte en chapa para la conformación del molde personalizado.	140
Figura 5. 11. Detalle de la colocación del encapsulado en el molde.	140
Figura 5. 12. Presentación del encapsulado de fibra de carbono en el molde.	141
Figura 5. 13. Instancia previa al proceso de mezclado y volcado de la PDC en el molde personalizado.	142
Figura 5. 14. Curado de la probeta personalizada.	142
Figura 5. 15. Asiento bajo relieve para el sensor DHT22.	143
Figura 5. 16. Desmolde de la probeta.	144
Figura 5. 17. Diagrama del arreglo experimental de la estrategia 2.	145
Figura 5. 18. Sensor con conector FC/PC en un extremo (parcialmente conectorizado).	146
Figura 5. 19. Fibra óptica enhebrada en el encapsulado por el extremo no conectorizado.	146
Figura 5. 20. Sensor plenamente conectorizado.	147
Figura 5. 21. Ejemplo del montaje del sistema de polea/masa y punto fijo tomado en un extremo de la fibra que contiene al sensor ya enhebrado en el encapsulado.	148
Figura 5. 22. Posición espectral del pico de atenuación en función de la HR de la LPG cuyo encapsulado fue embebido dentro del prisma de PDC.	149

Lista de tablas

Tabla 2. 1. Indicadores fundamentales de durabilidad.	16
Tabla 3. 1. Características generales de los lotes.	73
Tabla 3. 2. Resumen de características básicas del conjunto de LPGs producidas.	73
Tabla 3. 3. Descriptores estadísticos.	74
Tabla 3. 4. Características básicas de una LPG generada localmente (espécimen típico).	74
Tabla 3. 5. Condiciones ambientales.	75
Tabla 4. 1. Condiciones experimentales.	110
Tabla 5. 1. Preparación de la probeta.	133
Tabla 5. 2. Características fundamentales del cemento usado.....	135
Tabla 5. 3. Composición química.	136

Notación

λ	Longitud de onda
n	Índice de refracción
λ_m	Longitud de onda de resonancia del m-ésimo modo de propagación del revestimiento
$n_{\text{eff}}^{\text{co}}$	Índice de refracción efectivo del núcleo
$n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$	Índice de refracción efectivo asociado al m-ésimo modo de propagación del revestimiento
L	Longitud de la red
Λ	Período de red
T_m	Transmisividad evaluada en el m-ésimo modo de propagación del revestimiento
β_m	Constante de propagación del m-ésimo modo
k_m	Coefficiente de acoplamiento del m-ésimo modo de propagación del revestimiento
T	Temperatura
n_{mrf}	Índice de refracción del medio que rodea a la fibra
ε	<i>Strain</i>
m	Masa
lw	Longitud de zona de transición de un μ -taper
Z_0	Longitud de cintura de un μ -taper
P_s	Presión de saturación
P_r	Presión real
T_h	Temperatura de termómetro húmedo
T_s	Temperatura de termómetro seco
T_{rs}	Temperatura del punto de rocío
ϑ	Coefficiente psicrométrico
ℓ	Longitud de marca
N	Número de marcas de una LPG

$S_{n_{\text{mrf}}}$	Sensibilidad al índice de refracción
S_T	Sensibilidad a la temperatura
S_ε	Sensibilidad al <i>strain</i>
Po; Pop	Potencia óptica

Acrónimos, abreviaturas y siglas

AD	Anodic Deposition
ASTM	American Society for Testing and Materials
bps	Bauds per second
BW	Band Width
CIC	Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Bs. As
CIOp	Centro de Investigaciones Ópticas
CIRSOC	Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
CPF	Cemento Portland con Filler
CW	Continuous Wave
ESA	Electrostatic Self-assembly
FBG	Fiber Bragg Grating
FC-APC	Fiber Connector Angled Physical Contact
FC-PC	Fiber Connector Physical Contact
FOB	Free on Board
FRLP	Facultad Regional La Plata
FWHM	Full Width at Half Maximum
HR	Humedad Relativa
IL	Insertion Loss
IR	Infra Rojo
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
LbL	Layer-by-Layer
LEMIT	Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica
LPG	Long Period Grating
MCT	Mode Coupled Theory

MFD	Mode Field Diameter
MMF	Multi-mode Fiber
ND	No disponible
OFS	Optical Fiber Sensor
OSA	Optical Spectrum Analyzer
PDC	Pasta de Cemento
PICT	Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PMF	Polarization Maintaining Fiber
PMMA	Polimetilmetacrilato
PRG	Programa
PU	Polyurethane
PVA	Polyvinyl Alcohol
RAS	Reacción Álcali-Sílice
RIU	Refractive Index Units
SHM	Structural Health Monitoring
SLD / SLED	Super Luminescent Diode
SMF	Single Mode Fiber
SNCyT	Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología
SP	Spin Coating
TC	Thermocouple
TEC	Thermo Electric Cooler
TIR	Total Internal Reflection
UNLP	Universidad Nacional de La Plata
USB	Universal Serial Bus
UTN	Universidad Tecnológica Nacional
UV	Ultravioleta
VAC	Volts (Corriente Alterna)

1. Introducción

1.1. Presentación del tema de la Tesis

El hormigón es un material de construcción que está formado esencialmente por una mezcla de agregados (finos y gruesos) y pasta (cemento portland y agua), siendo esta última un aglomerante hidráulico que actúa como agente ligante. En estado endurecido es un material resistente a la compresión, que no pierde sus propiedades mecánicas bajo el agua siendo a su vez en estado fresco, una masa plástica y trabajable que facilita su manipulación y moldeado. Debido a esto es el material más utilizado en el mundo para la ejecución de obras de construcción.

A causa de la elevada demanda de hormigón se consumen más de 4.000 millones de toneladas de cemento anuales a nivel mundial. Esto representa el 8% de las emisiones antropogénicas del CO₂ a nivel planetario [1]. Existen estudios publicados que indican consumos de 10 a 11 billones de toneladas de agregados por año, lo cual requiere energía para la extracción, el procesamiento y el transporte. Estos procesos de adquisición de agregados afectan adversamente la ecología de las regiones de producción [2]. Siendo un material conformado por componentes no renovables, actualmente se producen 10.000 millones de metros cúbicos de hormigón por año en el mundo, resultando contrapuesto conceptualmente a lo que se considera como desarrollo sostenible de la sociedad.

Una estrategia para mitigar el impacto ambiental generado por la producción del hormigón es disminuir la proporción del clínker utilizado para la producción del cemento, sustituyéndolo parcialmente por otros elementos que cumplan con sus funciones pero que demanden procesos productivos que impliquen menos emisiones de CO₂. Otra estrategia planteada consiste en el uso más eficiente del cemento como material constituyente del hormigón [3]. Finalmente una tercer estrategia se yergue sobre la base del empleo de hormigones durables o cuyo mantenimiento minimice y prevenga el uso de más material destinado a sostener en el tiempo la vida útil de la estructura que conforma. Esto último es uno de los hechos que fundamentan la importancia del campo de estudio de la Ingeniería Civil cuya temática es relativa a la durabilidad del hormigón [2], considerando a ésta como la capacidad que presenta el material para resistir la acción de agentes deletéreos en tiempo de servicio. Por otro lado cabe mencionar que el campo de estudio abordado por la durabilidad del hormigón tiene implicancias de índole económica, no sólo ambientales. El monitoreo de indicadores que brindan información asociada al nivel de degradación del hormigón permite la ejecución temprana de acciones de mantenimiento ante situaciones que atenten contra la vida útil de la estructura, sea en sus aspectos funcionales, de seguridad o estéticos [4].

Luego del curado, el hormigón continúa madurando con el transcurrir del tiempo dependiendo tanto de la composición y propiedades del mismo, como de las condiciones ambientales a las que éste se encuentre sometido durante su etapa de servicio. La mayoría de las señales que alertan la existencia de deterioro son consecuencia del accionar de agentes que pueden clasificarse como químicos, físicos y biológicos. En el caso del ataque por agentes químicos existe un tiempo que tardan las sustancias agresivas en ponerse en contacto con las sustancias reactivas que constituyen el hormigón (tiempo de iniciación). La detección del ingreso de sustancias agresivas dentro de este período de tiempo, es estratégica para la toma de decisiones

concernientes a la ejecución de tareas de mantenimiento predictivo con sus consecuentes beneficios económicos.

En función de lo antedicho, puede resumirse que el reto tecnológico que representa la detección temprana del ingreso de sustancias agresivas en estructuras civiles es justificado por:

- La realización de acciones que propicien la preservación de los materiales mejorando su vida útil en pos de minimizar el impacto ambiental aparejado por la demanda de mayor cantidad de materiales en caso de que la disposición final sea la demolición de la estructura y su posterior reposición.
- El beneficio económico que conlleva la ejecución de las acciones de mantenimiento adecuado.

Existen diferentes métodos para detectar el deterioro del hormigón. Éstos pueden clasificarse en invasivos y no-invasivos. Actualmente el monitoreo de la salud de estructuras (*Structural Health Monitoring*, o SHM) es un proceso que provee información precisa concerniente a la condición y al desempeño estructural, empleada para planificar y diseñar actividades de mantenimiento en virtud de garantizar la seguridad y la funcionalidad de estructuras. Consiste en la observación y el registro permanente de parámetros como indicadores asociados a magnitudes o procesos físico/químicos de interés en el campo de la durabilidad que reflejan algún aspecto del desempeño de la estructura bajo monitoreo. Los parámetros relevados dependen básicamente del tipo y del propósito de la estructura, así como de los materiales empleados y las condiciones ambientales en las que se encuentre [5]. La mayoría de las técnicas asociadas al SHM son del tipo no-invasivas.

En actividades de monitoreo de salud estructural, los parámetros de interés se clasifican en mecánicos (deformación, desplazamiento, fisuración), físicos (temperatura, humedad) y químicos (presencia y penetración de iones cloruro/sulfato, pH, profundidad de carbonatación, corrosión de armaduras, entre otros). La durabilidad de una estructura se evalúa teniendo en cuenta muchos de estos parámetros. Por ejemplo, la detección de la presencia y concentración de iones cloruro junto a mediciones de pH en la zona cubierta por el espesor del material de recubrimiento de las armaduras pueden emplearse para evaluar la posibilidad de corrosión en las mismas.

Si bien la determinación convencional de tales parámetros es realizada mediante el empleo de elementos sensores basados en el uso de principios mecánicos, eléctricos y electroquímicos (siendo estos últimos los más comunes), durante los últimos años se observó la aparición de un nuevo tipo de sensores basados en principios ópticos de funcionamiento (aún no instaurados fuertemente a nivel comercial como opción o alternativa a los sistemas convencionales). Éstos presentan características únicas en el campo de las tecnologías de sensado: mediciones de alta calidad y precisión, alta confiabilidad, muestreo automatizado fácilmente implementable, instalación sencilla, gran vida útil, inmunidad a interferencias electromagnéticas, son pasivos desde el punto de vista eléctrico, etc. [5]. La gran mayoría de los sensores ópticos aplicados en el campo de SHM miden deformación y temperatura mediante el uso de las llamadas

redes de Bragg en fibras ópticas, pero como se mencionó, existen otros parámetros que también son útiles para caracterizar la evolución del accionar de agentes deletéreos dentro del hormigón y que no son evaluados normalmente en las técnicas convencionalmente usadas en SHM. A este respecto es oportuno mencionar que si bien el monitoreo de la evolución de la concentración de determinadas especies químicas dentro del hormigón es una alternativa atractiva desde el punto de vista ingenieril (debido a que brinda un enfoque diferente a la problemática del monitoreo de salud estructural), actualmente demanda la utilización de técnicas invasivas que implican la ejecución de acciones agresivas en alguna medida. Cabe preguntarse entonces: ¿puede una técnica de medición óptica ser aplicada para la determinación de existencia y/o concentración de determinados agentes químicos así como son aplicadas para la determinación de deformaciones y temperatura? La implementación de técnicas ópticas que brinden información de cómo es la evolución química interna del hormigón puede potencialmente complementar las acciones de monitoreo de los parámetros convencionales abordados por las técnicas SHM. Esta Tesis Doctoral aporta conocimientos relativos a la implementación de técnicas ópticas no convencionales en actividades de SHM que brindan información de interés en el campo de la durabilidad del hormigón. Se explora la implementación de dispositivos grabados en fibra óptica llamados *redes de período largo* para la determinación del nivel de humedad interna de una estructura constituida de materiales cementíceos, siendo el agua una sustancia cuya presencia está fuertemente relacionada con la durabilidad del material.

1.2. Antecedentes

Si bien la aplicación de sensores ópticos, en particular de fibra óptica, para la determinación de parámetros de interés en el campo de la Ingeniería Civil es factible conforme a las evidencias publicadas en estos últimos 30 años [6], aún no es una práctica convencional.

El mercado de monitoreo de salud de estructuras a nivel internacional, ofrece mayormente la medición de deformación y temperatura mediante sensores de fibra óptica basados en el empleo de redes de Bragg. A nivel comercial no se verifican antecedentes al día de redacción de este manuscrito, respecto a la implementación de sensores de fibra que empleen redes de período largo en particular (u otro tipo de dispositivo en general) como alternativa a las redes de Bragg.

Como antecedente local y respecto a la utilización de sensores de fibra óptica en el campo de la Ingeniería Civil, se ha desarrollado en el CIOp (Centro de Investigaciones Ópticas dependiente de CONICET, CIC y UNLP) una Tesis Doctoral en la cual se estudió entre otras, la aplicación de dispositivos de fibra óptica para la detección de fisuras en estructuras de hormigón [7].

Además, cabe mencionar como antecedente regional la ejecución en el CIOp de un proyecto del tipo PICT Start-Up (2020-2023) financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, desarrollado en forma colaborativa con el LEMIT (Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, dependiente de CIC). El mismo tiene por objeto el diseño, desarrollo e implementación

de un sistema óptico para detectar y medir deformación en estructuras de hormigón mediante sensores basados en redes de Bragg embebidos en la estructura durante el proceso de construcción o montados superficialmente en estructuras preexistentes, conjuntamente con un equipo interrogador óptico cuya función es el monitoreo de los sensores. Cabe destacar que este desarrollo está siendo llevado a cabo íntegramente en forma local.

Al momento de redacción de este documento no se encontraron más antecedentes de investigaciones científicas relativas a la aplicación y desarrollo de técnicas ópticas en el campo de la tecnología de materiales de base cementícea en el ámbito de la República Argentina.

1.3. Justificación / Fundamentación teórica

Algunos procesos de deterioro del hormigón se caracterizan por la aparición o cambio en el tiempo de la concentración de determinados agentes químicos dentro del mismo. Debido a que una red de período largo en fibra óptica puede utilizarse para detectar la presencia de especies químicas en su entorno o medir la concentración de las mismas, en esta Tesis Doctoral se propone el uso de este tipo de dispositivo de fibra óptica para la determinación del nivel de humedad en el seno de una estructura de hormigón, agente que está fuertemente ligado a los procesos de deterioro mencionados y por ende, a la durabilidad de tal estructura.

La elección de centrar el Trabajo de Tesis en el uso de redes de período largo y no en otro tipo de dispositivo óptico sensible a cambios de concentración de moléculas de agua en su entorno, es debido a que se cuenta localmente con suficiente experiencia en su generación, apropiada manipulación y medición de la respuesta de este tipo de estructura de fibra óptica. Si bien existen otros sensores ópticos que utilizan el fenómeno de “campo evanescente” para interactuar con su entorno (basados en *microfibras*) y el CIOp cuenta con la posibilidad de generarlos y caracterizar su respuesta, en general son estructuras que presentan un alto nivel de fragilidad. Esto último dificulta su manipulación teniendo en cuenta que se pretende el abordaje de estudios que implican la implementación de sensores que potencialmente soporten ser embebidos en el seno de estructuras constituidas por materiales de base cementícea, motivo por el cual se espera una alta solicitud mecánica actuando sobre ellos.

Esta investigación aporta información en lo que al uso de sensores ópticos basados en redes de período largo se refiere, para la determinación del nivel de humedad dentro estructuras construidas con materiales cementíceos.

Cabe comentar que existen sistemas de medición que brindan información del contenido de humedad en estructuras de hormigón, pero la mayoría están basados en la implementación de sensores que emplean principios electroquímicos o eléctricos para su funcionamiento. Los sensores ópticos presentan ventajas frente a los sensores convencionales (como será descripto en el Capítulo 2 de esta Tesis) que los transforma en una alternativa competitiva.

1.4. Definición del problema científico

Actualmente, la aplicación de sensores de fibra óptica en técnicas asociadas al SHM se encuentra mayormente acotada al uso de redes de Bragg para la medición de deformación y mapeo térmico de estructuras. Tanto en el ámbito de la oferta comercial de sensores ópticos como en el ámbito científico asociado a la investigación y al desarrollo, se observa un área de vacancia en lo que se refiere a aplicación de sensores basados en redes de período largo en fibras ópticas como elementos para la determinación del nivel de humedad. En función de lo anterior y dada la sensibilidad de estos dispositivos ópticos a los cambios en el entorno que los rodea, cabe preguntarse por qué no considerar la aplicación de este tipo de tecnologías alternativas al problema de la medición de humedad en el seno de una estructura de hormigón.

1.5. Objetivo de la Tesis

El objetivo general planteado es estudiar con profundidad el potencial uso de redes de período largo en fibras ópticas para generar información del nivel de humedad en el entorno del sensor óptico explorando e indagando su aplicación en técnicas no convencionales de medición que enriquezcan y/o complementen las técnicas actualmente usadas en actividades relativas al monitoreo de salud de estructuras de base cementíceas. Para ello, se pretende medir humedad en el interior de probetas de materiales cementíceos aspirando en una fase de transferencia al perfeccionamiento de su implementación tecnológica, y demostrando la factibilidad de que éste tipo de tecnología sea parte normal de las habitualmente usadas en SHM.

1.6. Organización del Trabajo de Tesis

La ejecución de las tareas asociadas al Plan de Tesis verificó la cronología convencional de un proceso investigativo. Se identifican cuatro fases básicas:

- Fase de formulación general del tema de Tesis: cuyos emergentes son expuestos en el presente capítulo (Capítulo 1. “Introducción”).
- Fase de búsqueda de información vinculada al eje temático de la Tesis: implicó la recopilación de referencias científicas publicadas en los últimos años, la ejecución de lecturas afines y la realización de cursos de posgrado, todo lo cual dio soporte a la generación del marco conceptual (Capítulo 2. “Marco conceptual”).
- Fase experimental: fase que implicó la realización de tareas y actividades de laboratorio que permitieron la recolección de los datos experimentales. Se generaron las siguientes sub-fases:
 - Fase 1: implicó el conjunto de actividades experimentales avocadas al desarrollo y puesta en funcionamiento de una técnica que, siendo acorde con las facilidades de laboratorio disponibles,

- permitiese la generación local de redes de período largo en fibras ópticas (Capítulo 3. “Generación de LPGs”).
- Fase 2: implicó el conjunto de actividades de laboratorio avocadas al diseño, construcción y evaluación de un sensor experimental de humedad relativa basado en el uso de redes de período largo en fibras ópticas (Capítulo 4. “Implementación de LPGs para el sensado óptico de humedad”).
 - Fase 3: implicó la serie de ensayos en probetas de pasta de cemento que definieron la validación de la caracterización y funcionamiento del sensor experimental en estado embebido (Capítulo 5. “Ensayos en pasta de cemento”).
- Fase de conclusión: implicó la discusión emergente de la evaluación realizada sobre los resultados experimentales y la elaboración de una conclusión general relativa al eje temático central de la Tesis (Capítulo 6. “Discusión” y Capítulo 7. “Conclusiones”).

1.7. Referencias

- [1] Lehne, Johanna y Preston, Felix. *Making concrete change - Innovation in low-carbon cement and concrete*. s.l.: The Royal Institute of International Affairs - Chatham House, 2018.
- [2] Balzamo, H. y et al. *Ese material llamado hormigón*. [ed.] Noemí G. Maldonado y María F. Carrasco. s.l. : Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2016.
- [3] *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Scrivener, Karen L., John, Vanderley M. y Gartner, Ellis M. December de 2018, Cement and Concrete Research, Vol. 114, págs. 2-26.
- [4] *Introducción a la durabilidad y patologías de las estructuras de hormigón armado*. Traversa, Luis P y Villagrán Zaccardi, Yury Andrés. 2010. IX Jornada “Técnicas de restauración y conservación del patrimonio”.
- [5] Glisic, B. y Inaudi, D. *Fibre optic methods for structural health monitoring*. s.l. : Wiley, 2007.
- [6] *Fiber optic sensors in concrete structures: a review*. Merzbache, C. i., Kersey, A. D. y Friebele, E. J. 1996, Smart Mater. Struct., Vol. 5, págs. 196-208.
- [7] Mesa Yandi, Angélica M. *Diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas: aplicación al estudio de materiales y estructuras*. La Plata, Buenos Aires, Argentina : Facultad de Ingeniería - UNLP, 4 de Abril de 2018.

2. Marco conceptual

2.1. Introducción

La naturaleza del tema de esta Tesis demanda el abordaje de diferentes campos del saber tecnológico y científico. A modo ilustrativo puede entenderse al contenido del marco conceptual del tema de Tesis como el resultado de la intersección de los conjuntos formados por los conceptos involucrados en la “Teoría de durabilidad de los materiales cementíceos”, la “Teoría de sensores” y finalmente la “Teoría que describe los principios ópticos involucrados en el desarrollo sensores basados en fibra óptica”.

El capítulo presenta una breve reseña de los conceptos teóricos fundamentales que relacionan a la durabilidad de los materiales de base cementícea, con la aplicación de técnicas basadas en el uso de fibras ópticas como elemento sensor para la determinación/detección de magnitudes/procesos de interés en el campo de la Ingeniería Civil.

2.2. Durabilidad del hormigón

El concepto de durabilidad de un dado material de uso civil de base cementícea está relacionado con su capacidad para resistir la acción de agentes deletéreos que, debido a la generación de uno o varios procesos simultáneos de deterioro iniciados por tales agentes provocan su degradación en algún aspecto que se manifiesta por la pérdida progresiva del nivel de desempeño [1].

El proceso de diseño, cálculo y emplazamiento de estructuras civiles contempla el cumplimiento de requerimientos de seguridad, funcionalidad y estética durante un período de tiempo mínimo sin que éstas demanden inversiones económicas no programadas tanto en mantenimiento como en reparaciones. Estas últimas dos actividades ingenieriles dependen a su vez de dos tipos fundamentales de procesos que actúan sobre la estructura en consideración:

- Procesos intrínsecos: surgen de la interacción permanente de la estructura con las cargas a las que se encuentra sometida y son esencialmente determinísticos. Por ejemplo: el peso propio de la estructura o potenciales sobrecargas contempladas en tiempo de diseño.
- Procesos extrínsecos: que surgen de la interacción de la estructura con el entorno (medio ambiente) en el que se encuentra inmersa y son de carácter aleatorio. Por ejemplo: acción del clima.

Los procesos extrínsecos son los que dan base a la existencia de los problemas de durabilidad [2]. Una estructura construida con un material durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originalmente proyectadas cuando esté expuesta al ambiente dentro del cual preste servicio [3] [4].

Desde el punto de vista histórico el interés por la durabilidad de las construcciones civiles condujo a numerosos estudios orientados a la búsqueda de conocimientos relativos a los materiales con los que son implementadas. En el caso de los materiales cementíceos tales estudios fueron determinantes para la obtención de

saberes específicos respecto, por ejemplo, a la microestructura y su modificación ante el accionar de fenómenos de deterioro.

Como se mencionó, la evolución del deterioro de una estructura construida en base al uso de un material cementíceo depende de la influencia del entorno en el que se encuentra y de las condiciones de exposición al mismo, siendo esto debido al accionar de agentes agresivos que provocan el daño de los materiales debido al avance de los procesos de deterioro que éstos producen. Los agentes pueden clasificarse, según su naturaleza, en:

- Agentes físicos: son fenómenos de naturaleza física que al interactuar con el material pueden tener un impacto en sus propiedades o su comportamiento. La interacción de los diferentes agentes físicos con el material produce numerosos procesos. Algunos de ellos son mencionados a continuación:
 - Meteorización: procesos en los que el material sufre la acción de los agentes atmosféricos, dando origen a diversas modificaciones en su superficie. Es un proceso que engloba una gran cantidad de procesos específicos (congelación y deshielo, erosión y desgaste, etc).
 - Congelación y deshielo: en construcciones civiles ubicadas en locaciones geográficas en las que predominan condiciones meteorológicas como el clima frío y húmedo, se producen ciclos de congelación y deshielo. Tales ciclos generan esfuerzos internos en el hormigón húmedo, si existe agua libre en cantidad suficiente contenida en los poros y capilares. El agua aumenta el volumen que ocupa debido a su congelación, provocando un aumento de la presión hidrostática del agua libre restante (no congelada), y produciendo así la fisuración del material cuando tales tensiones superan la resistencia a la tracción de la pasta del hormigón.
 - Mojado y secado: los cambios volumétricos provocados por las variaciones del contenido de humedad en el seno del material es otra de las causas de la aparición de fisuras en el hormigón. Éstas, además de afectar la estética superficial, representan vías de ingreso de sustancias agresivas provenientes del exterior.
 - Efectos térmicos: las variaciones de temperatura producen variaciones volumétricas de la masa del hormigón que pueden provocar fisuras, sobre todo en aquellos casos en los que la estructura está sometida a restricciones mecánicas que interfieran su expansión o contracción. Además, las elevaciones de temperatura debido a incendios causan una deshidratación brusca haciendo que el hormigón pierda la cohesión de los elementos de la matriz.

- Erosión: se manifiesta como un desgaste superficial del material debido a la acción mecánica de un agente externo, ya sea por abrasión (debido a desgaste/fricción) o por cavitación (debido a la acción hidráulica de un fluido desplazándose a gran velocidad sobre la superficie del material).
- Agentes biológicos:
 - Líquenes: el ácido oxálico producido por el metabolismo de diversas especies de líquenes que colonizan las superficies carbonatadas del hormigón, se combina con el calcio provocando la degradación superficial del mismo. Además el crecimiento del talo del liquen daña físicamente la superficie sobre la cual éste prolifera originando tensiones de tracción que producen fisuras y desprendimiento de pequeñas láminas. La colonización liquénica es fundamentalmente perjudicial para la estética superficial manifestándose a través de pátinas y machas. Las especies típicas son *caloplaca citrina* y *lecanora albescens* [5].
 - Moluscos/algas/percebes/erizos y bacterias: perforan la superficie del material por una acción combinada química y mecánica [6].
- Agentes químicos:
 - Ataque por sulfatos: son procesos que se verifican en estructuras en contacto con aguas y suelos sulfatados. Los sulfatos reaccionan con los compuestos aluminicos del cemento portland hidratado, produciendo etringita y yeso. Estos son productos expansivos que generan tensiones internas que pueden provocar fisuras.
 - Corrosión de armaduras: las barras de acero que conforman las armaduras del hormigón armado, sufren la debilitación de la capa protectora (despasivación) cuando la alcalinidad del medio que la rodea cae por debajo de 9 en la escala del pH. El hormigón es un medio altamente alcalino (pH ~ 12,5) debido a la presencia de hidróxido de calcio fundamentalmente, hidróxido de sodio y potasio (en el líquido contenido en los poros). La lixiviación y la carbonatación son dos factores que alteran el nivel alcalino del hormigón disminuyéndolo con el paso del tiempo, y consecuentemente aumentando las probabilidades de producir la corrosión de las armaduras. Por otro lado el ingreso de iones cloruro también genera corrosión, no por disminuir el nivel alcalino del medio sino por ataque directo a la capa protectora del acero.
 - Ataque por ácidos: provocan la degradación del material a causa de la disolución o erosión de los compuestos hidratados del cemento portland que constituyen la matriz del hormigón generando que los agregados se disgreguen.

- Lixiviación: la circulación de agua en grandes cantidades es capaz de remover productos solubles de la microestructura del hormigón (principalmente el hidróxido de calcio), produciendo una descalcificación. Esto causa un efecto similar al ataque por ácidos pero normalmente es un proceso que se extiende en un período de tiempo más prolongado.
- Reacción álcali-sílice (RAS): el proceso de deterioro se desarrolla debido a la reacción entre álcalis y sílice amorfa o pobremente cristalina, de modo que es un ataque interno. Los álcalis son aportados principalmente por el cemento y la sílice amorfa está presente en algunos tipos de agregados naturales cuyo uso es conveniente evitar. La presencia de agua brinda el canal de contacto necesario para que se produzca la reacción entre ellas.

Siendo los fenómenos de deterioro consecuencia de numerosas causas, el ingreso de sustancias agresivas al seno del material que compone la estructura se muestra como una de las causas más importantes. Además, uno de los temas de interés en el campo de la durabilidad es la velocidad de ingreso de tales agentes agresivos dado que esto es lo que define mayormente al período de tiempo asociado a la vida útil de la estructura.

Las características de durabilidad de los materiales empleados para la construcción de estructuras, deben ser evaluadas debido a su impacto económico sobre los presupuestos de los proyectos. Se ha verificado que durante la vida útil de las estructuras el costo de reparación y mantenimiento se incrementa debido a diferentes factores vinculados a los cambios que los agentes ambientales generan en el desempeño de los materiales. Actualmente se estima que el 40% de los recursos totales de la industria de la construcción es destinado a acciones de reparación y mantenimiento de estructuras ya existentes [4].

Además, existe una correlación entre “durabilidad de los materiales” e “impacto ambiental” debido a que el empleo de materiales durables implica un menor uso de los recursos naturales y menor generación de CO₂ por causa de los procesos de producción involucrados. Asimismo, se conoce que el impacto ambiental producido por la industria del hormigón puede reducirse a través de la mejora de los procesos productivos que implican el uso de los recursos, como así también a través de la minimización de las demandas energéticas que los mismos implican [7] [8]. Para ello se destaca que el diseño y la implementación de una estructura abordados mediante un enfoque desde la durabilidad, propicia la extensión de su vida útil a través del incremento de la eficiencia en el uso de los recursos no renovables. Esto último es debido a que las construcciones duraderas requieren menores consumos de recursos para ser reemplazadas o reparadas cuando éstas ya no cumplen con las condiciones de servicio.

Por lo expuesto, la evaluación de la durabilidad de estructuras de hormigón es un tema de capital importancia económica y ambiental. En términos formales, para la realización de esta evaluación se implementan mediciones que determinan el valor de numerosos parámetros llamados indicadores de durabilidad.

2.3. Indicadores de durabilidad

Los “indicadores de durabilidad” son medidas cuantitativas o cualitativas que se utilizan para evaluar una variable o un fenómeno vinculado a la durabilidad. Éstos están relacionados con las propiedades del material (hormigón) y permiten realizar estimaciones de su desempeño en términos durables. Por ejemplo, velocidad de succión capilar, absorción capilar, porosidad, resistencia a la compresión, resistividad eléctrica, permeabilidad, contenido de cloruros, reserva alcalina, entre otros.

El hormigón es un material esencialmente poroso. Por ello, su estructura presenta vías de ingreso/egreso de sustancias contenidas en el ambiente que lo rodea. El proceso de penetración de tales sustancias dependerá de la estructura de poros en cuanto a su volumen, la calidad de la conectividad y la distribución de tamaños. El ingreso y circulación interna de sustancias agresivas desde el ambiente exterior del hormigón, se produce por distintos mecanismos (procesos de transporte de masa). Teniendo en cuenta el fenómeno físico involucrado, éstos pueden clasificarse en [1]:

- Permeación: consiste en el movimiento de un fluido (sustancia penetrante) a través de una barrera semipermeable debido a la existencia de una diferencia de presión entre dos puntos del espacio, uno dentro de hormigón (de menor presión) y otro fuera del mismo (de mayor presión).
- Absorción capilar: consiste en el movimiento de un fluido (en fase líquida) debido al desbalance existente entre las fuerzas de cohesión de sus moléculas y las fuerzas de adhesión de tal fluido contra la superficie que lo contiene. Tal desbalance produce la aparición de fuerzas de tensión capilar entre el líquido contenido en los poros y los canales que los comunican.
- Difusión: consiste en el proceso de transporte de un constituyente dentro de un dado medio debido al efecto de la agitación aleatoria de las partículas que lo conforman. Este fenómeno se da a escala molecular y se manifiesta cuando existe una diferencia de concentración de partículas entre dos puntos del medio produciendo un movimiento neto del constituyente desde la zona de mayor concentración (punto exterior a la pieza de hormigón) hacia la de menor concentración (punto situado dentro de la pieza de hormigón).

La determinación de la estructura de poros y canales es uno de los principales tópicos a tener en cuenta para predecir la durabilidad del material.

Por otro lado, una forma de evaluar el grado de facilidad con la que una sustancia ingresa al seno del material es a través de la evaluación de la penetrabilidad, siendo ésta una propiedad considerada como una variable importante para la evaluación de la durabilidad del mismo. La mayoría de los indicadores de durabilidad describen en algún aspecto el grado de penetrabilidad del material.

La **Tabla 2. 1** muestra a modo de reseña, los indicadores básicos de durabilidad junto al concepto que lo describe y al proceso de transporte másico involucrado [9].

Tabla 2. 1. Indicadores fundamentales de durabilidad.

Indicador	Concepto	Proceso de transporte
Permeabilidad al aire	Refiere a la propiedad del material que caracteriza la facilidad con la que el aire lo atraviesa ante un gradiente de presión.	Permeación
Permeabilidad al agua	Refiere a la propiedad del material que caracteriza la aptitud que presenta a ser atravesado por agua ante un gradiente de presión.	Permeación
Coefficiente de absorción capilar	Refiere a la propiedad del material que caracteriza la tendencia del mismo a absorber y transmitir agua a través de su masa.	Absorción capilar
Coefficiente de difusión de cloruros [10]	Refiere a la capacidad del material para permitir el ingreso de iones cloruro al seno del volumen que ocupa.	Difusión Absorción capilar Permeación
Contenido crítico de cloruros [10]	Refiere al valor umbral de contenido de cloruros que produzca una disminución del pH tal que provoque que los óxidos pasivantes de las armaduras de refuerzo sean inestables desde el punto de vista electroquímico para cumplir con su función de protección (dejando camino libre a la potencial generación de procesos de corrosión).	Difusión Absorción capilar Permeación
Resistencia a la compresión	Refiere a la capacidad del material para soportar una carga mecánica por unidad de área. Se lo puede emplear como parámetro de evaluación de la resistencia a la penetración de cloruros.	-
Velocidad de carbonatación	Refiere a la tasa temporal con la cual el proceso de carbonatación se produce en el seno del material.	Difusión

Contenido de humedad	Refiere a la cantidad total de humedad dentro del material ya sea en forma líquida o gaseosa y se expresa como un porcentaje de la masa.	-
Resistividad eléctrica	Refiere a la propiedad del material que describe la aptitud de éste para oponerse óhmicamente al paso de cargas eléctricas a su través. Es un parámetro que permite relacionar la microestructura del material con el desempeño durable del mismo.	-

2.4. Métodos convencionales para determinación de algunos parámetros de evaluación

Para que un parámetro característico del material sea considerado indicador de durabilidad debe ser cuantificable, reproducible y repetible [11]. Los indicadores de durabilidad son ponderados (es decir, medidos o determinados) en el laboratorio o en el lugar de emplazamiento de la estructura, mediante la aplicación de una determinada técnica de medición reproducible. La diferencia entre las propiedades medidas en el laboratorio respecto de aquellas que son medidas in-situ (campo) es que las primeras son propiedades potenciales del hormigón, y las segundas son efectivas ya que representan mejor el comportamiento de las estructuras en servicio, por estar afectadas por la compactación y el curado en obra. De esto último se deriva la gran importancia técnica de la evaluación de los indicadores de durabilidad en tiempo de servicio de la estructura. En esta sección se describen en forma simplificada los diferentes métodos ya mencionados para la determinación de algunos parámetros de evaluación [9].

2.4.1. Permeabilidad al aire

Uno de los métodos más ampliamente utilizados es el llamado método de Figg. Es un método invasivo que consiste en la realización de un orificio por el que se introduce aire hasta que es alcanzado cierto nivel de presión. Luego se mide la evolución del cambio de presión en el orificio debido al movimiento de aire a través de la red de poros del material. Con esta información se calcula un índice de permeabilidad [12]. Existen también métodos que no requieren la creación de un orificio (métodos no invasivos), por ejemplo el método Torrent [13]. Éste básicamente implica la creación de un gradiente de presión de aire entre la superficie y la red de poros cercana a la superficie mediante el uso de una cámara de vacío. Este método es más habitual en Argentina, sobre todo para la caracterización in-situ.

2.4.2. Permeabilidad al agua

Los métodos para la determinación de la permeabilidad al agua son similares a los de la permeabilidad al aire, con la diferencia que el fluido penetrante es líquido. La permeabilidad al agua puede ser ensayada mediante métodos no invasivos in-situ o en el laboratorio mediante la evaluación de una muestra tomada de la estructura o preparada para tal fin. Los instrumentos utilizados en los ensayos de campo cuentan con un reservorio de agua que es conectado a la superficie del hormigón. Una bomba de vacío genera la diferencia de presión necesaria para el ensayo. Finalmente un sensor monitorea la presión durante el proceso. Por otro lado la mayoría de los métodos de laboratorio consisten en someter la muestra a una diferencia de presión mientras que se registra la cantidad de agua que penetra a la misma. En Argentina el método comúnmente empleado (normalizado por IRAM 1554) es el de penetración de agua a presión.

2.4.3. Absorción capilar

En hormigón no saturado la tasa de ingreso de agua u otros líquidos es básicamente controlada por el fenómeno de absorción debido al comportamiento de éstos fluidos en los capilares del material. La absorción consiste en la penetración de líquidos en el hormigón como consecuencia del accionar de fuerzas capilares. Si bien no es general, en algunos materiales de construcción el comportamiento del ascenso capilar es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. La nueva norma IRAM 1871 acepta un coeficiente como la raíz cuarta del tiempo, que es más habitual para materiales de base cementícea que tienen un comportamiento anómalo. La constante de proporcionalidad es llamada *coeficiente de absorción capilar*.

Uno de los métodos más conocidos es el llamado *absorción capilar*. En este método el único mecanismo de penetración de agua es el debido a la acción de las fuerzas capilares. Normalmente la etapa predominante en este tipo de ensayos es el acondicionamiento (especialmente el secado) de los especímenes a ser sometidos al ensayo.

Existen métodos para la determinación de la absorción capilar en campo, los cuales se dividen en aquellos basados en la absorbancia superficial (método no invasivo) y los que requieren la generación de un orificio en el que se mide la absorbancia (método semi- invasivo).

2.4.4. Penetración de cloruros

Uno de los intereses técnicos más importantes en las estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes en los que existen altas concentraciones de cloruros, es la determinación de la resistencia del material a la penetración de tales iones.

El proceso de penetración de cloruros en el hormigón es lento, por lo cual no puede ser evaluado en forma directa en un marco de tiempo factible desde el punto de vista ingenieril. Por ello, para realizar determinaciones de indicadores de penetración de cloruros se implementan métodos que aceleran el proceso (ASTM C1202, NT Build 492.).

El ingreso de iones cloruro al material genera el incremento de su concentración provocando, a partir de la superación de un determinado nivel (contenido umbral o crítico de cloruro), la despasivación de las armaduras de acero y por ende el comienzo del proceso de corrosión de las mismas.

2.4.5. Velocidad de carbonatación

El proceso de carbonatación del hormigón es esencialmente un fenómeno de naturaleza química que ocurre cuando el dióxido de carbono del aire se mezcla con el agua encerrada en los poros y reacciona con los compuestos de hidróxido de calcio dando lugar a la formación de carbonatos. Como consecuencia de esto, el pH del hormigón desciende gradualmente trayendo aparejadas ciertas situaciones que atentan a la salud del material porque se reduce la protección contra la corrosión de las armaduras y disminuye la resistencia a la compresión.

Es un proceso que ocurre de forma natural y su velocidad depende de la concentración de dióxido de carbono y de la humedad relativa del ambiente que rodea a la estructura y dentro de la masa del hormigón. También depende tanto de la porosidad como de la permeabilidad del material. Uno de los principales intereses técnicos relacionados con el proceso de carbonatación es el relativo a la velocidad del proceso debido a que es uno de los factores condicionantes de la vida útil de la estructura [14]. Básicamente ésta describe la tasa con la que el material bajo estudio se carbonata.

2.5. Diseño enfocado a la durabilidad de las estructuras

Las técnicas de construcción de obras civiles han sido objeto de evolución y mejora permanente en la Ingeniería Civil. Uno de los aspectos que demandó gran atención técnica fue la interacción del medio ambiente con la estructura, con el objetivo de controlar las consecuencias de los procesos de deterioro que no sean producto de los efectos de cargas consideradas en tiempo de proyecto (diseño estructural). En Argentina, y conforme a la importancia de tales consecuencias, el diseño de estructuras regido por consideraciones de durabilidad es un enfoque de diseño que ha sido incorporado como requerimiento en la reglamentación CIRSOC 201.

En mérito al requerimiento reglamentario mencionado, la medición de indicadores de durabilidad adquiere un valor capital al momento de monitorear el desempeño de la estructura ante su inevitable interacción con el medio ambiente. Para la ejecución del relevo de parámetros y magnitudes de interés en el ámbito del diseño de estructuras con el enfoque de la durabilidad, la implementación de sensores se

convierte en parte fundamental de la logística necesaria destinada al monitoreo antedicho.

2.6. Sensores

2.6.1. Generalidades

Un sensor es un dispositivo que responde a un estímulo físico/químico produciendo una señal de naturaleza eléctrica (adecuada para ser procesada empleando técnicas digitales o analógicas), que describe al estímulo que la generó a través de alguna ley. Por esta razón los sensores son empleados para detectar y/o medir magnitudes o eventos del entorno con el que interactúan. Entiéndase por “señal” a cualquier representación o manifestación física que puede transmitirse, procesarse o interpretarse y cuya evolución temporal conlleva información. Desde el punto de vista de la teoría de señales y sistemas un sensor puede modelarse como una “caja negra” caracterizada por la relación entre la señal de salida $s(t)$ y el estímulo de entrada $e(t)$ [15], en donde t es la variable asociada a la magnitud física *tiempo*. La Figura 2. 1 muestra un esquema que representa lo dicho.

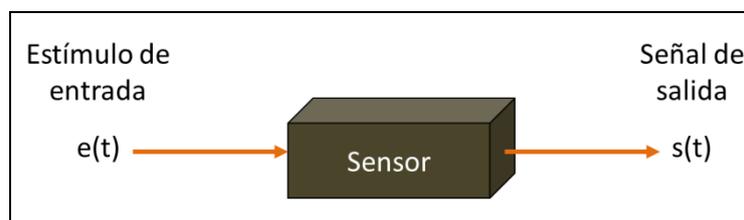


Figura 2. 1. Representación de un sensor en términos de la teoría de señales y sistemas.

Dentro del dispositivo sensor existen una o más etapas de transducción que generan la señal $s(t)$ como consecuencia de la existencia del estímulo $e(t)$. Debido a la naturaleza del sistema de transducción interno del sensor, el estímulo está relacionado con un proceso físico/químico sobre el cual se tiene un dado interés técnico. De esta manera la señal $s(t)$ contiene la información del mensurando de interés representado físicamente por el estímulo de entrada.

Un sensor es normalmente parte de un sistema más complejo llamado sistema de medición. En éste intervienen diferentes bloques como el de detección y acondicionamiento de señal, conversión analógica a digital, recolección, procesamiento y almacenamiento de datos, representación visual, entre otros. Específicamente el sensor se considera parte del bloque de detección. Conceptualmente y en términos generales, un sistema de medición es un conjunto de dispositivos y procedimientos organizados de manera sistemática cuyo objetivo principal es obtener valores

numéricos o información cuantitativa sobre una variable o propiedad bajo estudio (magnitud física, química o cualidad de un sistema). Puede entenderse a un sistema de medición como el enlace entre un dado observador y un dado proceso bajo observación, siendo el primero el ente que requiere información del proceso que se manifiesta cuando varían las magnitudes que lo caracterizan.

La relación entrada/salida de cualquier sensor puede representarse analíticamente mediante la función de transferencia f , la cual puede ser expresada en términos de una tabla, un gráfico o una expresión matemática. Cabe destacar que si bien f modeliza la relación entrada/salida en el dominio del tiempo, en algunas aplicaciones es conveniente un abordaje matemático en el dominio de la frecuencia. La expresión (2.1) muestra la función de transferencia que relaciona al estímulo $e(t)$ de entrada con la señal $s(t)$ de salida.

$$s(t) = f(e(t)) \quad (2.1)$$

Conocer la función f implica que el conocimiento de la señal $s(t)$ permite determinar el valor del estímulo $e(t)$ mediante el empleo de la función inversa f^{-1} .

Una de las principales características de desempeño de un sensor es su sensibilidad que se define como la mínima variación del estímulo de entrada $e(t)$ que produce un cambio detectable en la señal de salida $s(t)$. Matemáticamente se lo determina mediante la expresión (2.2).

$$sens = \frac{ds}{de} = \frac{df(e)}{de} \quad (2.2)$$

Existen requerimientos técnicos fundamentales que todo sensor debe cumplir al momento de ser aplicados en el campo de la Ingeniería Civil. Desde el punto de vista físico debe presentar una gran robustez y en la mayoría de los casos un mínimo tamaño. Desde el punto de vista de desempeño debe cumplir con una gran durabilidad, estabilidad a largo plazo, exactitud (lo cual implica precisión), confiabilidad, especificidad y sensibilidad. Finalmente, desde el punto de vista productivo debe ser reproducible y de bajo costo.

2.6.2. Sensores de fibra óptica

Durante los últimos 30 años se ha observado una extraordinaria evolución de la optoelectrónica y de la industria de las comunicaciones ópticas. Esta evolución mejoró la producción y calidad de los componentes ópticos usados en sistemas de comunicación basados en el uso de la fibra óptica. La aparición de componentes y de nuevos tipos de fibras propició también la evolución de las aplicaciones en las que se emplean derivándose en usos fuera del campo de las comunicaciones, como por ejemplo en el campo del sensado.

Un sensor de fibra óptica (OFS, *optical fiber sensor*) es en esencia un dispositivo que permite que un agente físico o químico interactúe, a través de un mecanismo de transducción determinado, con el haz de luz guiado en una fibra óptica en donde tal

interacción se produce en una región del espacio interna o externa a la misma y se manifiesta a través de la modificación de alguna propiedad del haz de luz guiado [16].

En el contexto mencionado previamente y con el correr de los años, los OFS se convirtieron en opciones altamente competitivas comenzando a desplazar a los sensores basados en tecnologías convencionales en una gran variedad de sistemas de instrumentación debido a sus inherentes ventajas [17], las cuales son sintéticamente mencionadas a continuación:

- **Tamaño y peso reducido:** su configuración física es normalmente menor en lo que a dimensiones geométricas se refiere con respecto a sensores que usan principios de operación no ópticos (eléctricos o químicos, por ejemplo).
- **No necesitan ser alimentados eléctricamente:** lo cual implica la implementación de una transducción pasiva desde el punto de vista eléctrico. Esto es ampliamente ventajoso en ambientes sensibles a fenómenos relacionados con descargas electrostáticas (ambientes explosivos, por ejemplo).
- **Alta sensibilidad:** debido principalmente a la naturaleza de los fenómenos ópticos usados para detectar los mensurandos.
- **Gran ancho de banda:** lo cual los hace extremadamente rápidos en responder a estímulos relacionados con el mensurando.
- **Inmunidad a radiación electromagnética:** no son perturbados ante radiación electromagnética ambiental. Por ello pueden ser implementados en entornos en los que existan campos eléctricos extremadamente potentes sin sufrir interferencias (por ejemplo, centrales generadoras de energía eléctrica).
- **Posibilidad de implementar esquemas de multiplexado** que permiten el empleo de redes de sensores en una única fibra óptica. Esto posibilita el uso de una única fuente de luz y de un único sistema de detección en el equipo interrogador, con la consiguiente disminución de costos.
- **Capacidad de ser interrogados en forma remota** sin necesidad de implementar repetidores que aumenten los costos en hardware del sistema de medición.

La caída de costos de los componentes usados en sistemas ópticos de comunicaciones (fibra óptica, fuentes, detectores, divisores de haz, conectores y varios otros componentes pasivos) que se produjo en los últimos 20 años, es un aspecto económico que se agrega al conjunto de los beneficios de los OFS, debido a que tanto los sistemas de comunicaciones como los de sensado comparten bloques en sus respectivas arquitecturas [16].

2.6.2.1. La fibra óptica

Una fibra óptica es una estructura cilíndrica fina y flexible constituida de un material que permite el guiado de luz a su través conservando significativamente la intensidad del haz transmitido mediante el confinamiento logrado gracias al fenómeno de reflexión interna total (TIR, *Total Internal Reflection*) [18]. Un modelo sencillo que explica su funcionamiento consiste en un cilindro conformado por un material transparente al paso de luz en un determinado rango de longitudes de onda (núcleo de la fibra) caracterizado mediante su índice de refracción. Este cilindro está contenido dentro de un casquete cilíndrico (revestimiento de la fibra) concéntrico con el anterior pero compuesto de un material cuyo índice de refracción es levemente inferior al del cilindro interno. La Figura 2. 2 muestra la propagación de un haz de luz (flecha roja) dentro del núcleo de una fibra óptica conforme a la aplicación del modelo antedicho. Allí se observa un segmento de fibra óptica que guía un haz de luz representado gráficamente por el rayo que se propaga de izquierda a derecha. También se indican las estructuras que dan forma al núcleo y al revestimiento de la fibra.

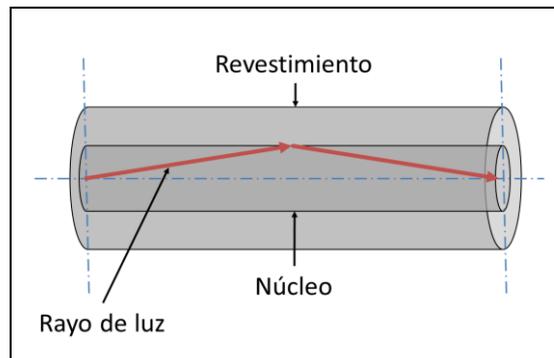


Figura 2. 2. Confinamiento de luz en una fibra óptica.

En su configuración más simple una tercera capa cilíndrica (normalmente compuesta de acrilato en fibras de comunicación estándar) llamada recubrimiento o cubierta, envuelve al conjunto mencionado con el objetivo de brindar protección mecánica y cierta flexibilidad para prevenir daños físicos ante manipulación o interacción general con el medio.

Existen dos tipos de fibra conforme a la cantidad de posibles caminos ópticos que puede describir un haz que se propaga dentro de ella.

- Fibras multimodo (MMF, *Multimode Fiber*): la fibra permite muchos caminos de propagación como guía de luz.
- Fibras monomodo (SMF, *Single Mode Fiber*): la fibra permite un único camino por el cual la luz transita para propagarse.

Otras clasificaciones de las fibras ópticas fueron establecidas en función del material, estructura interna, capacidad de mantener el estado de polarización de la luz guiada, tipo de perfil radial del valor del índice de refracción, etc.

2.6.2.2. Principio de funcionamiento de un OFS

La Figura 2. 3 muestra un esquema típico que representa parte de un sistema de medición que implementa un OFS como elemento de transducción. Está representado por una caja prismática que interactúa con el medio del que proviene una perturbación determinada, estando ésta última relacionada con el mensurando de interés. En tal figura un haz de luz guiado por una fibra óptica se inyecta al sensor por el extremo izquierdo del mismo. El punto de ingreso de luz al esquema del montaje de sensado es llamado puerto de entrada. El OFS modifica en algún aspecto al haz de luz que circula a su través en respuesta a la perturbación proveniente del medio en el que se encuentra emplazado. Tal modificación es detectada mediante la instrumentación adecuada cuando el haz de luz alcanza el puerto de salida (cabe aclarar que en algunos esquemas de sensado el puerto de entrada es a su vez el puerto de salida).

En términos de la teoría de telecomunicaciones, la luz actúa como la señal portadora de la información, mientras que la estructura que conforma al OFS actúa como elemento modulador de la señal antedicha. La consecuencia del efecto modulador del OFS sobre el haz de luz se manifiesta a través del cambio de una o más propiedades del mismo. Teniendo en cuenta que la modulación de alguna propiedad del haz de luz es consecuencia de la existencia de un dado proceso físico mensurable, los cambios que experimenta el haz detectado en el puerto de salida del esquema mostrado en la Figura 2. 3 reflejan tales procesos. Las características de la luz que son susceptibles de ser modificadas debido a la interacción del OFS con su entorno son:

- Densidad espectral de potencia óptica (firma espectral).
- Intensidad.
- Estado de polarización.

...siendo todas ellas procesadas luego de que la luz sea detectada por un elemento sensible (fotodetector). El sistema que procesa la información es comúnmente conocido como *etapa de demodulación*, omitida en la Figura 2. 3.

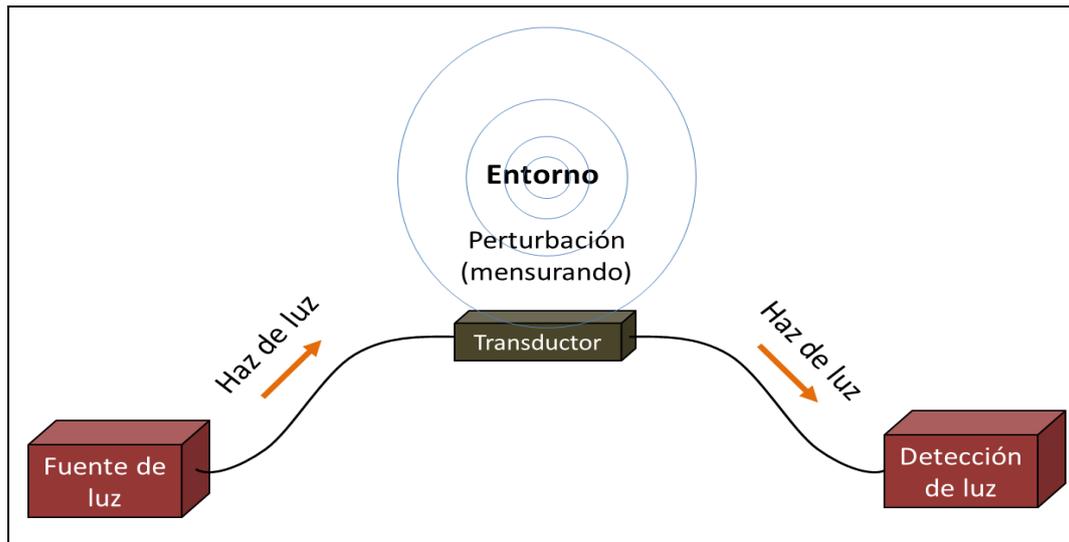


Figura 2. 3. Interacción entre un OFS y el medio que lo rodea.

2.6.2.3. Clasificación de los OFS

Los sensores de fibra óptica son clasificados en dos grupos [19] según el lugar en donde se produce la interacción entre la perturbación proveniente del medio que lo rodea y el haz de luz que se propaga por el mismo:

- **Extrínsecos:** (también llamados híbridos) en este tipo de sensores las propiedades de la luz son modificadas en una región del espacio situada fuera de la fibra óptica. Una vez que el haz de luz es ingresado en el puerto de entrada, la fibra brinda un camino de acceso a una región del espacio en la que la perturbación proveniente del medio interactúa con ella generando un cambio en alguna de sus propiedades, para luego ser reinyectada al tramo de fibra óptica que oficia de puerto de salida. Es decir, el fenómeno de transducción se produce fuera de la fibra óptica.
- **Intrínsecos:** (también llamados “*all-fiber sensors*”) en este tipo de sensores las propiedades de la luz son modificadas dentro de la fibra. El fenómeno de transducción se produce debido a la interacción de la fibra misma con el medio que la rodea, para luego ser la fibra óptica responsable del o los cambios de las propiedades de la luz oficiando de este modo como intermediario entre la perturbación y el haz propiamente dicho.

Los OFS pueden clasificarse según el tipo de aplicación en [20] [21]:

- Sensores de magnitudes físicas.
- Sensores de magnitudes químicas.
- Sensores de parámetros biológicos.

2.6.3. Aplicación de OFS en el campo de los materiales cementíceos

Se han registrado numerosos antecedentes científicos del empleo de OFS para la determinación de magnitudes de interés en el campo de la Ingeniería Civil y en particular en la caracterización de materiales de base cementícea. Diversos tipos de OFS fueron evaluados en laboratorios de diferentes locaciones del mundo. Dichas evaluaciones arrojaron conclusiones que evidencian la factibilidad técnica de su implementación en campo. Desde la década del 90, se han reportado variadas evaluaciones científicas de sensores basados en diferentes fenómenos ópticos que se verifican en sistemas de fibra óptica. Algunos ejemplos de éstos son los sensores basados en el cambio de la intensidad de luz guiada por la fibra debido al cambio del mensurando, los basados en la variación del estado de polarización, o del patrón de interferencia en el caso de la implementación de un interferómetro de fibra óptica. También se han reportado las respuestas de sensores basados en redes de difracción en fibras ópticas como por ejemplo las llamadas redes de Bragg (*Fiber Bragg Gratings*, o *FBG*) [22].

Los OFS presentan características muy atractivas al momento de proyectar su aplicación en el campo de la Ingeniería Civil, por ejemplo el hecho de ser potencialmente embebibles en el seno del material de construcción, su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, como también su capacidad de ser fácilmente interrogados en forma multiplexada cuando son implementados en arreglos complejos de sensores [22].

Una de las aplicaciones más difundidas consiste en la determinación del *strain* interno en diferentes puntos de una estructuras de hormigón con el fin de complementar mediciones normalmente usadas en técnicas de monitoreo de salud estructural (*Structural Health Monitoring*, o *SHM*) [23] [24] [25] [26]. Para la implementación de estos sistemas de medición, se usan normalmente sensores de fibra basados en FBGs [27] [28] [29].

Otro tema abordado mediante la implementación de OFS es la detección de procesos de fisuración [30] [31], y el estudio de la estabilidad dimensional de probetas conformadas con materiales cementíceos [32] [33] [34].

Más orientado a los fenómenos químicos internos que se producen dentro de una estructura de hormigón, una aplicación que presenta fuertes antecedentes es la detección de procesos de corrosión en las barras de refuerzo del hormigón armado [35]. Se han publicado investigaciones basadas en el uso de técnicas espectrométricas [36], reflectométricas [37] [38], interferométricas [39], así como también basadas en el uso de Redes de Período Largo en fibras ópticas [40].

También se registran publicaciones que describen el uso de OFS para la determinación de pH a través del estudio del campo evanescente inmerso en el material que rodea el sensor de fibra [41].

Teniendo en cuenta la gran variedad de sensores de fibra óptica existentes, en esta Tesis Doctoral se explora el empleo de Redes de Período Largo grabadas en fibra óptica (*Long Period Fiber Grating*, *LPG*) con el objetivo de cumplir con los objetivos investigativos propuestos.

2.6.4. Redes de período largo en fibras ópticas (LPG)

2.6.4.1. Generalidades

Para explicar el funcionamiento de una LPG es necesario rever conceptualmente la forma con la que la luz se propaga dentro de una fibra óptica. Desde el punto de vista físico una fibra óptica funciona como una guía de radiación lumínica (*optical waveguide*). Es decir, la fibra oficia de medio de propagación de tal radiación. Si bien existen diferentes enfoques para abordar el estudio de cómo se propaga la luz en una fibra óptica, en el marco del uso de dispositivos del tipo LPG, es conveniente el empleo de concepto de “modo de propagación”. Básicamente un modo es un camino que la luz puede adoptar para propagarse dentro de la fibra en el que su intensidad no se ve alterada durante el proceso de avance. Más específicamente, si la propagación de luz a lo largo de una fibra se ajusta a un modo de propagación específico, la distribución del campo óptico transversal al eje de la fibra no sufre cambio alguno en intensidad a lo largo del camino óptico. Una guía de onda como una fibra óptica se caracteriza por permitir la propagación y guiado de un número finito de modos. La obtención de las ecuaciones matemáticas que representan el campo óptico para cada modo permitido se realiza mediante la resolución de las ecuaciones de Maxwell. La cantidad de modos permitidos depende tanto de la relación de radios como del contraste de índices de refracción del núcleo y del revestimiento de la fibra. Mediante el control de estas características de la fibra durante la fabricación, puede lograrse la condición por la cual la fibra soporte solo un modo de propagación (de aquí el nombre de las llamadas fibras monomodo o *single mode fiber*, SMF).

Para el caso de una fibra del tipo SMF y dependiendo de la relación existente entre los índices de refracción del núcleo, del revestimiento y del medio que rodea a este último, los modos pueden clasificarse en:

- Modo del núcleo (o modo fundamental): este modo se propaga confinado dentro del núcleo de la fibra.
- Modos del revestimiento: estos modos se propagan confinados en la capa del revestimiento debido a múltiples reflexiones del haz de luz en la interfaz del núcleo/revestimiento y revestimiento/medio que lo rodea. Esto ocurre si el índice de refracción del medio que rodea al revestimiento es menor al índice de refracción del revestimiento.
- Modos radiados: parte de la energía del modo del núcleo que se transmite al revestimiento es luego transmitida al medio que rodea a éste último sin que exista reflexión en la interfaz revestimiento/medio. Esto ocurre si el índice de refracción del medio es idéntico al del revestimiento.
- Modos perdidos o fugados: la energía del haz es perdida debido a que el la guía de onda se muestra ineficiente para la propagación de luz mediante

su confinamiento. Se produce cuando el índice de refracción del medio que rodea al revestimiento es superior al de éste.

Por otro lado, el segundo concepto necesario para explicar el funcionamiento de una LPG está relacionado con el fenómeno de difracción. En términos generales, la difracción es un fenómeno de carácter ondulatorio en el que la dirección de propagación de una onda se ve alterada debido a la existencia de un obstáculo en su camino [42]. Esto se produce cuando las dimensiones geométricas del obstáculo son del orden de la longitud de onda que caracteriza a la onda (para el caso de una onda monocromática, si se trata de luz). En el campo de la óptica, una red de difracción es un sistema que actúa sobre el haz de luz que incide en él, cambiando la dirección de propagación del haz en un determinado ángulo que depende de la longitud de onda y de parámetros geométricos que definen la red. Mientras que una red de difracción clásica consiste en una superficie plana que presenta un arreglo de rendijas rectilíneas y paralelas separadas por espacios de igual ancho [43], una red de difracción en una fibra óptica se presenta como un conjunto de zonas distribuidas longitudinalmente en las que se modifica el valor del índice de refracción. Según la distancia que separa a tales zonas, las redes de difracción en fibras ópticas pueden clasificarse en redes de período corto (también llamadas redes de Bragg o FBGs) y LPGs. Cuando la distancia entre dos zonas de índice de refracción modificado consecutivas es mayor a $100\mu\text{m}$ se considera que la red es del tipo LPG.

Una LPG es una estructura óptica generada en un segmento longitudinal de una fibra (típicamente de unos pocos centímetros de longitud) que consiste en una modulación periódica del índice de refracción del núcleo (y a veces también, del revestimiento de la misma) [44]. Cuando el modo luminoso fundamental que se propaga por el núcleo de una fibra óptica se encuentra en su camino con una LPG, parte de su energía se transmite (acopla) al revestimiento produciendo modos de propagación en éste (modos del revestimiento) si se cumple la llamada “condición de ajuste de fase” dada por la ecuación (2.3).

$$\lambda_m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}) \Lambda \quad (2.3)$$

...en donde, λ_m es la longitud de onda de resonancia del m-ésimo modo de propagación del revestimiento, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ y $n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}$ son los índices de refracción efectivos del núcleo y del revestimiento respectivamente, y Λ es el período de la modulación del índice. Entiéndase por modulación periódica del índice de refracción a una variación repetitiva del valor del mismo cuando es evaluado a lo largo del eje longitudinal de la fibra. Cabe comentar que la ecuación (2.3) puede ser deducida a partir de la ecuación general de una red de difracción [45]. Otro comentario pertinente es que conceptualmente mientras que el índice de refracción de un medio es una propiedad física de éste y representa a la relación entre la velocidad de la luz en el vacío respecto a la del medio en cuestión, el índice de refracción efectivo del núcleo representa a la relación entre el índice del núcleo y el del revestimiento (así como el índice efectivo del revestimiento representa a la relación entre el índice del revestimiento y el del medio que rodea a la fibra). La diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento expresada en términos del índice efectivo del núcleo es un parámetro que indica la capacidad de la fibra para guiar luz manteniéndola confinada dentro de ella.

En una LPG la energía del modo fundamental es transferida a modos del revestimiento de tal forma que éstos poseen la misma dirección de propagación (modos co-propagantes). Los modos del revestimiento se atenúan rápidamente debido a pérdidas ocasionadas por no verificarse la condición de reflexión interna total, por absorción y *scattering* en la interfaz revestimiento/recubrimiento de la fibra. Esto genera en el espectro de transmisión de la LPG una serie de bandas de atenuación (también conocidas como “*dips*”, por la palabra en inglés que hace alusión a la depresión observada en la característica espectral) que están centradas en determinadas longitudes de onda.

Estas redes tienen períodos de cientos de micrones y longitudes que se encuentran típicamente entre 10 y 30mm. Cualquier modificación de las propiedades de guiado del núcleo y/o del revestimiento, modifica la respuesta espectral de la LPG, lo que la hace apta para aplicaciones de sensado. A diferencia de lo que ocurre con una FBG, la respuesta de una LPG es altamente dependiente del entorno o medio ambiente que la rodea, lo que permite su utilización para la determinación de presencia y/o concentración de una gran variedad de especies químicas en el entorno de la fibra óptica.

La Figura 2. 4 muestra esquemáticamente cómo sucede el acoplamiento de luz del núcleo al revestimiento de la fibra óptica en una LPG, indicándose la forma en que la energía de la radiación incidente en la red se distribuye no sólo en un modo que continua su camino propagándose por el núcleo, sino también en otros modos que lo hacen por el revestimiento de la fibra óptica. Las zonas verticales de diferente coloración que se observan en la Figura 2. 4 representan la variación periódica del índice de refracción efectivo (que en el caso de este esquema abarcan sólo al núcleo de la fibra aunque pueden extenderse a la zona del revestimiento dependiendo de la técnica de fabricación empleada para generar la LPG). En una LPG típica los cambios en el índice se encuentran equiespaciados (separados a una distancia Λ) a lo largo de una cierta longitud llamada longitud de la LPG o simplemente longitud de red (L). Estos cambios del valor del índice pueden ser inducidos mediante la implementación de diferentes técnicas. La zona de la fibra en la que existe un valor de índice diferente al valor original debido a la inducción mencionada, es llamada “*marca*” en el contexto de esta Tesis. Una secuencia de marcas regularmente distribuidas a lo largo de un tramo de fibra óptica implica la existencia de una modulación longitudinal del índice de refracción. En la Figura 2. 4, la existencia de la modulación del índice de refracción efectivo en el núcleo denota básicamente la existencia de la LPG, y las flechas inclinadas en su entorno indican la ocurrencia del fenómeno por el cual se transfiere energía de la radiación luminosa desde el núcleo de la fibra óptica hacia el revestimiento dando origen a los modos propagados por éste último.

Para el caso de LPGs generadas mediante el uso de la técnica de inducción por arco eléctrico, el efecto de modulación del índice de refracción se manifiesta tanto en el núcleo como en el revestimiento, por ende las secciones mostradas en la Figura 2. 4 que conforman la LPG abordan también la zona del revestimiento [46]. En esta técnica de generación de LPGs la modulación del índice se logra mediante un ahusamiento periódico de la fibra, que se extiende a lo largo de una determinada longitud. El segmento de fibra óptica que sufre el ahusamiento conforma una marca. Tal ahusamiento de fibra es conocido como μ -*taper* [47]. Así, un tren de ahusamientos

(marcas) distribuidas uniformemente en el sentido axial de la fibra da origen a la modulación de los índices de refracción tanto del núcleo como del revestimiento, necesaria para la conformación de una LPG.

La Figura 2. 4 muestra que la distribución radial de la energía del modo que se propaga por el núcleo (denotado como $LP_{0,1}$) se debilita luego de atravesar la LPG, debido a que parte de ella se invierte para la generación de los modos que se propagan por el revestimiento. Estos últimos son denotados en forma genérica como $LP_{0,m}$ estando el subíndice m asociado al orden del modo representado.

La Figura 2. 4 (lado derecho) muestra un espectro típico de la radiación luminosa a la salida de una LPG, cuando la misma se ilumina mediante una fuente de luz de banda ancha. En el espectro de transmisión pueden observarse las diferentes bandas de atenuación, denominándose en general λ_m la correspondiente al m-ésimo modo del revestimiento.

La profundidad del pico observado en la banda de atenuación puede ser asociada a una magnitud que puede calcularse mediante la ecuación (2.4). Ésta surge de analizar el modelo asociado al fenómeno de acoplamiento entre modos luminosos (es decir, la transferencia de energía óptica del modo que se propaga por el núcleo a los modos que se propagan por el revestimiento).

$$T_m = 1 - \sin^2(k_m L) \quad (2.4)$$

...donde T_m es la transmitividad de la LPG para el m-ésimo modo de propagación del revestimiento, k_m es el coeficiente de acoplamiento para dicho modo de propagación y L es la longitud total de la LPG. k_m considera el efecto neto del acoplamiento de luz desde el núcleo al revestimiento producido por todas las marcas grabadas en la fibra óptica a lo largo de la longitud L .

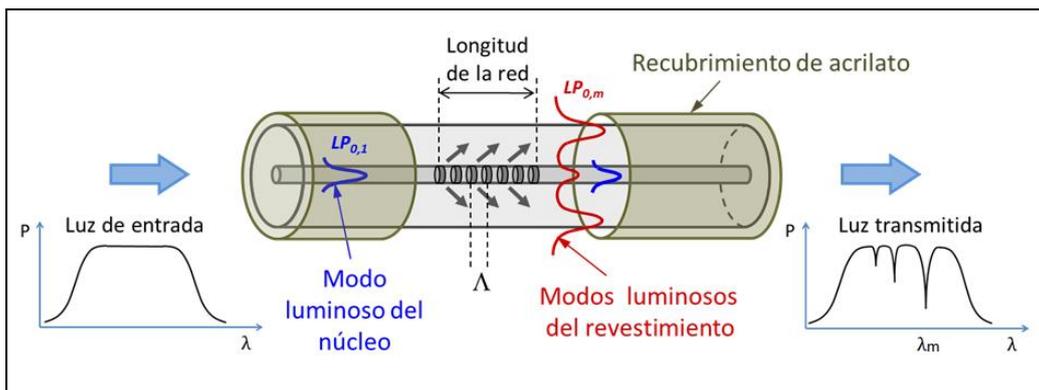


Figura 2. 4. Esquema de una LPG en fibra óptica. Acoplamiento de luz del núcleo al revestimiento de la fibra óptica al atravesar una LPG.

Como se mencionó, la longitud de onda λ_m es dependiente del contraste existente entre los índices de refracción efectivos del núcleo y del revestimiento de la fibra, siendo éste último dependiente del entorno que la rodea. Por ello, si el medio que rodea

la fibra cambia sus propiedades ópticas, también cambiarán los valores de las longitudes de onda correspondientes a los diferentes modos que se propagan por el revestimiento. Este principio físico es lo que fundamenta el empleo de una LPG como elemento sensible de un sistema de medición. Por ejemplo, el cambio de concentración de algún agente químico en el entorno que rodea la fibra propicia un corrimiento de λ_m conforme a lo establecido por la ecuación (2.3) debido a que tal cambio de concentración implica un cambio del índice de refracción efectivo del revestimiento. En actividades de medición vinculadas a los materiales cementíceos, esta clase de dispositivo óptico es muy atractivo al momento de explorar el ingreso de agentes agresivos en el seno del material. Un comportamiento semejante ocurre cuando cambian las condiciones térmicas en el entorno de la red, o si se aplica una tensión que provoque una deformación mecánica sobre ella.

La respuesta óptica de una LPG al paso de luz a su través puede medirse en el laboratorio mediante la implementación del arreglo experimental cuyo esquema es mostrado en la Figura 2. 5. En ésta se observa un elemento emisor de luz de banda ancha (SLD, *Superluminescent Diode*) que inyecta radiación lumínica al puerto de entrada de una fibra óptica que contiene una LPG. La luz transmitida es detectada por un instrumento conectado al puerto de salida y que permite determinar la composición espectral de la radiación lumínica recibida (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*), siendo esta distribución conocida como espectro de transmisión de la LPG.

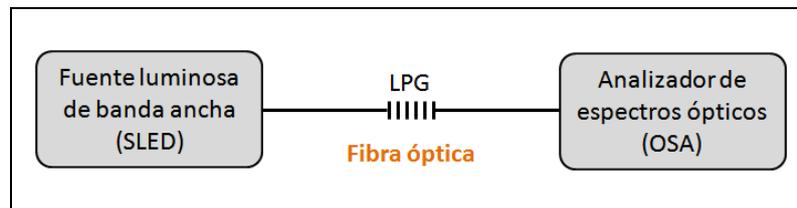


Figura 2. 5. Arreglo experimental para la determinación del espectro de transmisión de una LPG.

La Figura 2. 6 (a) muestra el espectro de la radiación luminosa incidente en la LPG, pudiéndose observar cómo se distribuye la energía de la luz emitida por la fuente para cada longitud de onda que la compone. En la Figura 2. 6 (b) se observa el espectro de la radiación emergente por el puerto de salida, apreciándose la existencia de una serie de picos de atenuación producidos por el acoplamiento de luz desde el núcleo hacia el revestimiento de la fibra óptica debido a la presencia de la LPG. A modo de ejemplo se destaca la posición del pico asociado al m -ésimo modo de propagación del revestimiento, centrado en la longitud de onda λ_m . El eje vertical de ambas gráficas representa la potencia óptica detectada por el OSA, mientras que el eje horizontal indica longitud de onda.

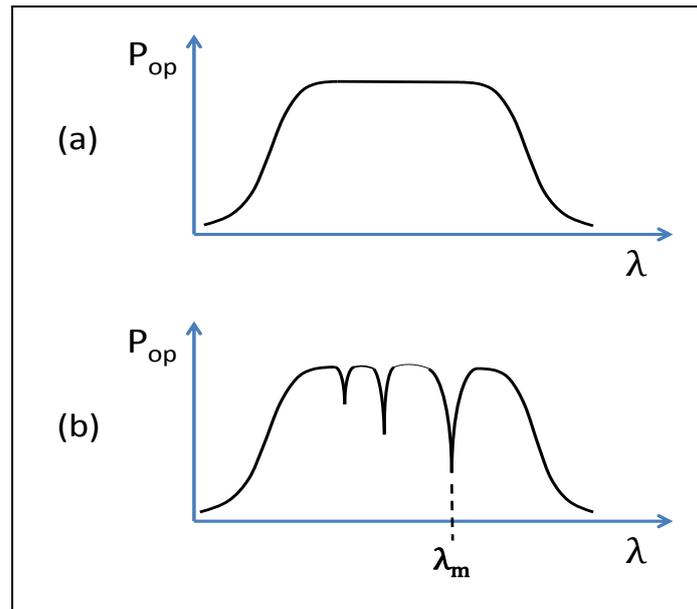


Figura 2. 6. Espectro de la radiación luminosa: (a) antes y (b) después de atravesar la LPG.

Una LPG puede ser descripta según:

- Características de su configuración física: que describen su aspecto físico a partir de la especificación de parámetros de índole geométricos.
- Características de su comportamiento óptico: que describen su respuesta óptica al paso de una dada radiación luminosa a su través.

Desde el punto de vista de su configuración física las características fundamentales son:

- Longitud de la red (L): es la distancia existente entre el punto medio de la primera marca y el punto medio de la última marca. Normalmente expresada en mm.
- Período de la red (Λ): es la distancia entre los puntos medios de dos marcas consecutivas. Normalmente expresado en μm .
- Longitud de la marca (ℓ): es la longitud del segmento de fibra óptica sobre la cual se extiende una marca. Normalmente expresado en μm .
- Número de marcas (N): es la cantidad total de marcas que conforman la LPG.

La Figura 2. 7 muestra un segmento de una LPG en la que los cambios de coloración modelan gráficamente la existencia de las marcas. Se aprecian 4 marcas y se indican los parámetros que describen geoméricamente la red.

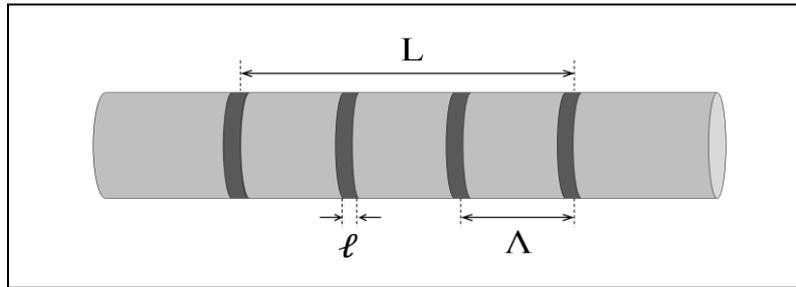


Figura 2. 7. Descripción geométrica de una LPG.

Desde el punto de vista de su comportamiento óptico las características fundamentales son:

- Ubicación espectral del *dip* de atenuación del m-ésimo modo (λ_m): es la longitud de onda central de la banda de atenuación asociada al modo m-ésimo que se propaga por el revestimiento. Normalmente es expresada en nm.
- Profundidad del *dip* de atenuación del m-ésimo modo (P_m): es la diferencia entre el nivel de máxima potencia óptica transmitida del espectro en toda la banda de emisión y el punto más profundo del *dip* de atenuación correspondiente al m-ésimo modo que se propaga por el revestimiento. Normalmente expresado en dB.
- Ancho de banda del *dip* de atenuación del m-ésimo modo (BW_{λ_m}): es la distancia en longitud de onda que existe entre dos puntos del *dip* de atenuación en los que la potencia óptica es la mitad del máximo valor, suponiendo que la forma de tal *dip* es gaussiana (FWHM, Full Width at Half Maximum). Normalmente expresado en nm.
- Transmitividad de la red en la longitud de onda del m-ésimo modo (T_m): se refiere a la fracción de la energía de la luz incidente a la red que se transmite a través de ella (en la longitud de onda del m-ésimo modo). Una alta transmitividad implica que la mayor parte de la energía de la luz incidente se transmite eficientemente lo que resulta en una menor energía acoplada al revestimiento. Una baja transmitividad implica que gran parte de la energía de la luz incidente a la LPG se acopla al revestimiento en detrimento de la energía de la luz que permanece confinada en el núcleo. Si bien es un parámetro adimensional cuyo dominio numérico se encuentra limitado al intervalo teórico $[0; 1]$, suele expresarse en %.
- Pérdidas de inserción (IL): también llamada atenuación, brinda información relativa a la potencia óptica perdida en determinada longitud de onda (convencionalmente es especificada @1550nm) debido a la inserción de un dispositivo en una guía de luz. Es normalmente expresada en % o en dB. En este caso la guía de luz es la fibra óptica y el dispositivo insertado es la LPG.

2.6.4.2. Determinación de las características de acoplamiento entre modos de propagación en una LPG

La ecuación general que describe el comportamiento de una red de difracción brinda información direccional relativa a la onda lumínica difractada, pero no especifica la longitud de onda en la cual una red de difracción en fibra óptica funciona más eficientemente cuando la energía del modo fundamental es transferida a modos del revestimiento. Es decir, no es capaz de predecir o ponderar el nivel de transferencia de energía entre los dos tipos de modos mencionados [45].

Para entender el funcionamiento físico de una LPG es necesario describir a través de algún modelo cómo es la interacción entre el modo del núcleo y los modos del revestimiento, o (dicho de otra manera) cómo es la transferencia de energía desde el modo que se propaga por el núcleo hacia los modos que se propagan por el revestimiento cuando es alcanzada la condición de ajuste de fase. En la terminología comúnmente empleada en tecnología de fibras ópticas, este fenómeno de transferencia es conocido como acoplamiento entre modos. La construcción del modelo que permite el análisis de este fenómeno responde a los postulados matemáticos establecidos en la llamada “Teoría de modos acoplados” (*Mode-Coupled Theory, MCT*) [46] [48].

En el marco de los lineamientos establecidos en MCT, la caracterización del acoplamiento se basa en la determinación de diferentes magnitudes para cada modo. Entre estas magnitudes pueden mencionarse [49]:

- Perfil de campo óptico: refiere a la distribución espacial de la intensidad de luz que se propaga a lo largo de la fibra óptica, es decir, describe cómo la intensidad de luz varía en una sección transversal en función de la posición longitudinal a lo largo de la fibra.
- Constante de propagación (β_m): parámetro que describe la velocidad y la fase de propagación del modo m-ésimo que se transmite por una fibra óptica. Normalmente se expresa en m^{-1} .
- Coeficiente de acoplamiento (k_m): parámetro que describe la eficiencia o fuerza de acoplamiento entre el modo de propagación fundamental y el m-ésimo modo de propagación del revestimiento a causa de su interacción, es decir a causa del intercambio de energía entre ellos. La constante de acoplamiento cuantifica la tasa de transferencia de energía entre los modos acoplados.

La estructura de fibra tenida en cuenta para la resolución del modelo consiste en la adición de una tercera capa al modelo de capas cilíndrico mostrado en la Figura 2. 2. Esta tercera capa describe el comportamiento óptico del medio externo que rodea al revestimiento de la fibra. Los tres medios que componen las tres capas de la estructura son considerados homogéneos desde el punto de vista óptico (es decir que el índice de refracción de cada capa es constante en todos sus puntos) con el fin de simplificar la complejidad del modelo y por ende, los cálculos. La Figura 2. 8 muestra un esquema en

el que se definen los radios de los cilindros concéntricos que conforman la estructura y los índices de refracción de cada capa.

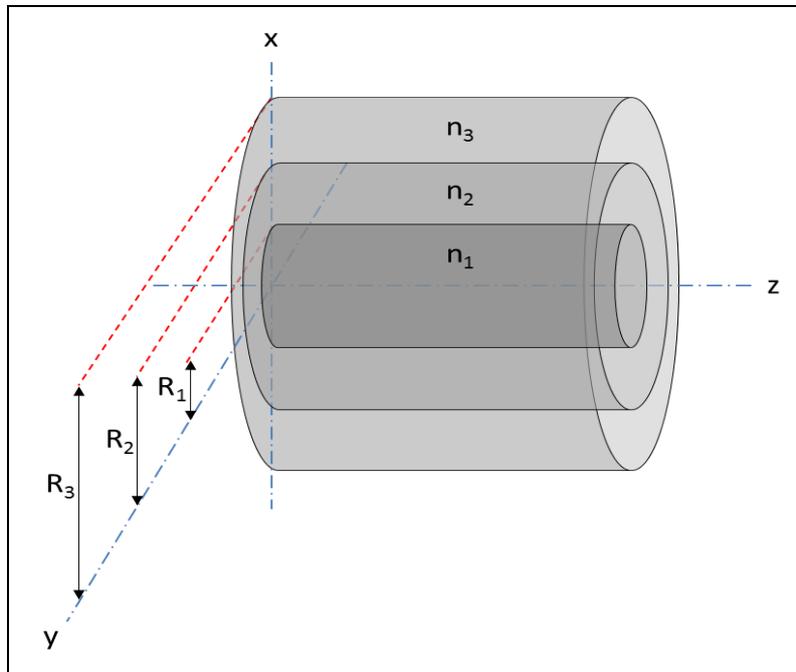


Figura 2. 8. Modelo de tres capas de un segmento rectilíneo de fibra óptica.

El perfil del índice de refracción en el sentido radial asumido en el modelo, es mostrado en la Figura 2. 9. En el eje vertical se representa el valor del índice de refracción mientras que en el eje horizontal se representa la distancia radial respecto del eje de la fibra (este último es llamado eje z en la Figura 2. 9). Se observa que si la fibra se encuentra en un entorno cuyo índice de refracción es n , este modelo geométrico asume que R_3 tiende a infinito y que n_3 es igual a n . Obsérvese también que la transición de la función $n(r)$ es abrupta en los puntos del eje r en los cuales se encuentran las interfaces que delimitan medios ópticos diferentes (por ejemplo, núcleo y revestimiento o revestimiento y medio exterior). A este tipo de evolución radial del índice de refracción se lo conoce como “*step-index profile*”.

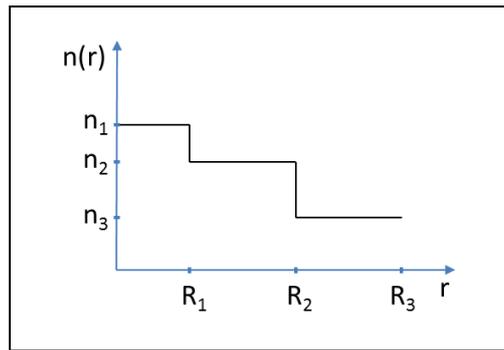


Figura 2. 9. Perfil radial del índice de refracción.

La aplicación del modelo de estructura de la fibra óptica mencionado y la aplicación de la teoría MCT, redundan en la determinación de las magnitudes que caracterizan el acoplamiento entre modos, los índices de refracción efectivos y finalmente el espectro de transmisión [50] [51]. Para mayor información y detalle de las diferentes propuestas metodológicas publicadas desde 1970 hasta la fecha para ejecutar la resolución matemática del modelo asociado a la teoría de modos acoplados, se sugiere la lectura de las referencias listadas al final del capítulo. En éstas se identifican dos desarrollos matemáticos fundamentales para la determinación del modelo teórico que describe el comportamiento espectral de una LPG. La diferencia entre ellos radica en el modelo geométrico adoptado para representar la estructura física de la fibra óptica, lo cual impacta en las formas matemáticas de las expresiones deducidas para los perfiles de campo modal y los coeficientes de acoplamiento (entre otras magnitudes de importancia). En uno de ellos se emplea una simplificación en la que se supone un modelo estructural de la fibra óptica basado en el uso de dos capas. De este modo no se considera la influencia del medio que rodea al revestimiento sobre el núcleo. El segundo enfoque tiene en cuenta la presencia del medio que rodea a la fibra lo cual trae aparejado una mejor descripción del comportamiento de los modos propagados en éste.

Otra diferencia notoria entre ambos enfoques es la forma con la que se calcula el índice efectivo del revestimiento para el m-ésimo modo de propagación. Por otro lado se verifica que ambos desarrollos implementan la llamada “*aproximación de guiado débil*” para el cálculo del índice efectivo del núcleo de la fibra asociado al modo que se propaga por el núcleo ($LP_{0,l}$). En tal aproximación se considera que la llamada “*diferencia de índices normalizada*” (Δ_m) es muy pequeña. Esto implica que el modelo asuma como verdadera la expresión (2.5).

$$\Delta = \frac{(n_{co} - n_{cl})}{n_{co}} < 1 \quad (2.5)$$

Esta suposición que es parte del tratamiento matemático empleado en ambos enfoques permite resolver con relativa simpleza las ecuaciones.

El tratamiento matemático implicado en la construcción del conjunto de expresiones que describen la física de propagación de los modos guiados tanto por el núcleo como por el revestimiento de la fibra para contextualizar el cómputo del

espectro de transmisión de una LPG, no será abordado en esta Tesis debido al camino establecido en el plan que brinda el marco metodológico adoptado. Nótese que en función de las fases experimentales definidas (y que luego serán descritas en este documento), no se ha previsto la realización de simulaciones computacionales asociadas a los fenómenos bajo estudio.

2.6.4.3. LPG empleadas como elementos sensores

La expresión (2.3) exhibe la dependencia de λ_m tanto con el período de la red como con la diferencia entre el índice de refracción efectivo del núcleo y del revestimiento. El período de la red puede ser modificado si la fibra en la cual está grabada la LPG es sometida a procesos físicos que la deformen sea contrayéndola o dilatándola en sentido longitudinal. Esto se produce si existe un esfuerzo aplicado de tracción o compresión o un cambio en la temperatura del entorno de la red (debido al coeficiente de expansión térmica del material que constituye la fibra óptica y a la variación del índice de refracción con la temperatura). Además, el índice de refracción efectivo del revestimiento es función del índice de refracción del medio que rodea a la fibra como fue mencionado previamente. Por lo dicho puede afirmarse que se induce un cambio en la posición de cualquier *dip* de atenuación del espectro de transmisión de una LPG, si cambia alguna de las siguientes magnitudes [52]:

- Índice de refracción del medio que rodea la fibra (n_{mrf}).
- Temperatura (T).
- Deformación longitudinal relativa (*strain*, ϵ).

Para analizar las dependencias de λ_m con las magnitudes n_{mrf} , T y ϵ se considera que el modelo bajo análisis supone que no existen gradientes térmicos en el segmento de fibra en el que se encuentra grabada la LPG. Lo mismo vale decir con respecto al índice de refracción del medio que rodea a la fibra, es decir se considera que éste es el mismo en todos los puntos que brindan interfaz a la LPG con el medio circundante.

Suponiendo que no existe correlación entre las tres magnitudes mencionadas (es decir suponiendo independientes a n_{mrf} , T y ϵ), la expresión (2.6) representa lo expresado previamente en términos matemáticos.

$$\Delta\lambda_m = f(\Delta n_{mrf}; \Delta T; \Delta\epsilon) \quad (2.6)$$

...donde $\Delta\lambda_m$ es el cambio inducido en la posición del *dip* de atenuación, Δn_{mrf} es la variación del índice de refracción del medio que rodea la fibra, ΔT es la variación de temperatura, $\Delta\epsilon$ es la variación de la deformación longitudinal por unidad de longitud (*strain*) y f es la función matemática que relaciona tales cambios.

Suponiendo que sólo una de las tres variables independientes de la expresión (2.6) cambia, manteniendo constantes a las restantes, pueden establecerse las expresiones (2.7), (2.8) y (2.9).

$$\Delta\lambda_m = f_{\Delta n}(\Delta n_{mrf}) \quad (2.7)$$

$$\Delta\lambda_m = f_{\Delta T}(\Delta T) \quad (2.8)$$

$$\Delta\lambda_m = f_{\Delta \epsilon}(\Delta \epsilon) \quad (2.9)$$

La función $f_{\Delta n}$ de la expresión (2.7) sugiere que un cambio detectado en λ_m permitiría inferir el cambio en n_{mrf} que lo indujo (si no existen variaciones térmicas ni de deformación). Lo mismo es válido para las funciones de las expresiones (2.8) y (2.9). Este hecho fundamenta el uso de LPGs como elemento de transducción para la detección de cambios de las magnitudes físicas temperatura, índice de refracción del medio que rodea a la fibra, y *strain*.

Si se considera una dada condición de funcionamiento que define un estado de la LPG (dado por n_{mrf} , T y ϵ), éste puede ser usado como punto de referencia para la determinación del corrimiento de λ_m al cambiar cualquiera de las tres magnitudes a las cuales la LPG es sensible.

La Figura 2. 10 esquematiza la influencia de la variación de cualquiera de las magnitudes n_{mrf} , T y ϵ sobre el valor de λ_m , mostrada como un corrimiento del *dip* de atenuación en el espectro de transmisión de una LPG típica.

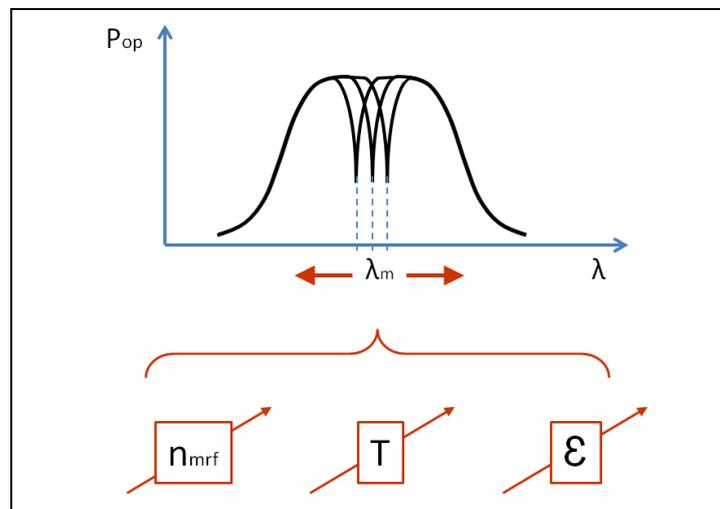


Figura 2. 10. Efecto de la variación de n_{mrf} , T y ϵ sobre la posición del *dip* de atenuación.

2.6.4.4. Análisis de sensibilidades

Pueden determinarse las sensibilidades de λ_m a las magnitudes mencionadas en la sección anterior a partir del desarrollo de las expresiones (2.10), (2.11) y (2.12) suponiendo que en cada una de ellas sólo varía una de las tres variables involucradas mientras que las otras dos se mantienen en un valor constante.

Capítulo 2. Marco conceptual.

$$S_{n_{\text{mrf}}} = \frac{d\lambda_m}{dn_{\text{mrf}}} \quad (2.10)$$

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{dT} \quad (2.11)$$

$$S_\varepsilon = \frac{d\lambda_m}{d\varepsilon} \quad (2.12)$$

...donde $S_{n_{\text{mrf}}}$, S_T y S_ε son las sensibilidades al cambio del índice de refracción del medio que rodea a la fibra, a la variación de temperatura y al cambio en el *strain* al que la fibra está sometida, respectivamente.

Si se define a Δn_m conforme a la expresión (2.13):

$$\Delta n_m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}) \quad (2.13)$$

... y aplicando la regla de la cadena para la derivación a la expresión (2.10), se obtiene:

$$S_{n_{\text{mrf}}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \frac{d\Delta n_m}{dn_{\text{mrf}}} + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{dn_{\text{mrf}}} \quad (2.14)$$

$$S_{n_{\text{mrf}}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dn_{\text{mrf}}} + \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{dn_{\text{mrf}}} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{dn_{\text{mrf}}} \quad (2.15)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dn_{\text{mrf}}} = 0 \quad (2.16)$$

... y que:

$$\frac{d\Lambda}{dn_{\text{mrf}}} = 0 \quad (2.17)$$

... finalmente se obtiene:

$$S_{n_{\text{mrf}}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{dn_{\text{mrf}}} \right] \quad (2.18)$$

Por otro lado, planteando un proceso de desarrollo matemático similar pero partiendo de la expresión (2.10), se obtiene:

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \frac{d\Delta n_m}{dT} + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (2.19)$$

Además, dado que:

$$\Lambda = \frac{L}{N} \quad (2.20)$$

... y aplicándolo en la expresión (2.19), se obtiene:

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{dT} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d(L/N)}{dT} \quad (2.21)$$

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{dT} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{1}{N} \frac{dL}{dT} \quad (2.22)$$

... luego, teniendo en cuenta que la expresión (2.20) puede reordenarse de la siguiente forma,

$$\frac{1}{N} = \frac{\Lambda}{L} \quad (2.23)$$

... se obtiene finalmente:

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{dT} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{\Lambda}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2.24)$$

Como última etapa de cálculo se vuelve a plantear el procedimiento propuesto para las expresiones (2.10) y (2.11) pero ahora aplicándolo a la expresión (2.12).

$$S_\varepsilon = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \frac{d\Delta n_m}{d\varepsilon} + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (2.25)$$

$$S_\varepsilon = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{d\varepsilon} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{d(L/N)}{d\varepsilon} \quad (2.26)$$

$$S_\varepsilon = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}{d\varepsilon} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{1}{N} \frac{dL}{d\varepsilon} \quad (2.27)$$

Por otro lado, teniendo en cuenta que:

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (2.28)$$

... y por ende:

$$dL = L d\mathcal{E} \quad (2.29)$$

... se obtiene que:

$$S_{\mathcal{E}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\mathcal{E}} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{d\mathcal{E}} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{1}{N} \frac{L d\mathcal{E}}{d\mathcal{E}} \quad (2.30)$$

... por lo que finalmente queda:

$$S_{\mathcal{E}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\mathcal{E}} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{d\mathcal{E}} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \Lambda \quad (2.31)$$

A modo de resumen se listan las expresiones obtenidas para las sensibilidades a continuación:

$$S_{n_{\text{mrf}}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{dn_{\text{mrf}}} \quad (2.32)$$

$$S_T = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{dT} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \frac{\Lambda}{L} \frac{dL}{dT} \quad (2.33)$$

$$S_{\mathcal{E}} = \frac{d\lambda_m}{d\Delta n_m} \left[\frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{d\mathcal{E}} - \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}}{d\mathcal{E}} \right] + \frac{d\lambda_m}{d\Lambda} \Lambda \quad (2.34)$$

La expresión (2.32) muestra la estructura funcional con la que el índice de refracción del medio que rodea a la fibra se relaciona con la posición del *dip* correspondiente al m -ésimo modo acoplado al revestimiento. La dependencia del cambio del índice efectivo del revestimiento ($n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}$) con el cambio en el índice del medio que rodea a la fibra (n_{mrf}) define la sensibilidad antedicha [46].

La expresión (2.33) muestra lo propio respecto de la temperatura. El término izquierdo de la suma expone la dependencia de la sensibilidad a los efectos termo-ópticos, en donde se manifiestan los cambios de índice de refracción efectivos (tanto $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ como $n_{\text{eff}}^{\text{cl,m}}$) ante cambios en la temperatura (T). El término derecho de la suma muestra la dependencia de la sensibilidad con la longitud de la red (L) por dilataciones o contracciones térmicas de la fibra óptica [46].

Finalmente, el primer término en el lado derecho de la ecuación (2.34) muestra la contribución a la sensibilidad de los efectos elasto-ópticos inducidos por el esfuerzo axial que conduce a una deformación longitudinal. Cabe aclarar que los efectos elasto-ópticos refieren a la dependencia del valor del índice de refracción de un medio a las deformaciones que éste sufre. El segundo término del lado derecho exhibe el aporte a la sensibilidad del cambio en el período de la red debido a la deformación producida por el esfuerzo axial. Esta deformación puede responder a una contracción o a una elongación dependiendo de si el esfuerzo mecánico es de compresión o de tracción [46].

2.6.4.5. Ventajas de los sensores basados en el uso de LPGs

Las principales bondades de las LPGs frente a otras tecnologías de sensado incluyen tópicos como [45]:

- Sensibilidad al índice de refracción del medio que rodea a la fibra: a diferencia de otros OFS, la respuesta de las LPGs presenta una marcada dependencia con el índice mencionado lo cual les confiere propiedades específicamente atractivas para ser empleadas en mediciones relacionadas con procesos químicos.
- Potencialidad de los OFS del tipo “all-fiber”: en este tipo de estructuras el sensor se encuentra en la fibra óptica, no necesitando otro elemento adicional para su interacción con el medio. El elemento de sensado es la fibra óptica misma en la región en la que se encuentra modificada para dar existencia a la LPG, de modo que la interfaz con el medio del cual proviene la perturbación asociada al mensurando es la fibra propiamente dicha.
- Flexibilidad para implementar sistemas semi-distribuidos de monitoreo: el hecho de que la ubicación espectral de los *dips* de atenuación sea controlable en tiempo de fabricación (como luego de detallará en el Capítulo 3 de esta Tesis) facilita el diseño de sistemas multisensores implementados en única fibra óptica. Este tipo de estructuras ópticas permite que varios sensores sean fabricados en la misma fibra de forma que los *dips* característicos de cada sensor estén posicionados espectralmente en regiones diferentes. Lo anterior permite, a través de un proceso de interrogación multiplexado, que el relevo de la evolución de cada *dip* informe el estado de una magnitud medida por cada sensor.
- Bajas pérdidas de inserción (IL): comparándolo con otros dispositivos de fibra óptica un sensor del tipo LPG grabado en una fibra implica una disminución de potencia óptica relativamente baja. Esto permite diseñar líneas de interrogación (múltiples LPG en una única fibra óptica) con un gran número de sensores sin que esto deteriore la información transmitida por la luz hasta la etapa de detección.
- Flexibilidad para ser generadas conforme a las características espectrales requeridas: la posición del *dip* de atenuación es fuertemente dependiente de las características geométricas de la LPG, las cuales pueden ser fácilmente controladas durante el proceso de fabricación. La posibilidad de controlar la ubicación del *dip* de atenuación de una LPG a ser usada como sensor, permite que tal LPG sea adecuada a la fuente que será empleada en tiempo de servicio (fabricación ad-hoc del sensor).
- Potencial bajo costo (según el mecanismo de fabricación empleado): como se mencionó previamente en este capítulo existen diferentes técnicas de fabricación de LPGs. En algunas de ellas se verifica que tanto las

facilidades de laboratorio como el instrumental necesario, no requieren una excesiva inversión económica para lograr un set-up de fabricación pertinente. Esto puede verse como una gran fortaleza de este tipo de sensores debido al impacto que lo anterior implica sobre el costo asociado a un dado proceso de fabricación en sí mismo.

2.7. Estado del arte del empleo de LPGs en materiales cementíceos

Las características mencionadas conforman un conjunto de aspectos que muestran grandes atractivos desde el punto de vista técnico al momento de comparar este tipo de tecnología con otras. Pero, si bien los sensores basados en el empleo de LPGs en fibra óptica son hoy en día una opción que poco a poco está ganando espacio en el campo de los sensores conforme a estudios científicos que respaldan y fundamentan su uso en el ámbito ingenieril, el empleo de éstos aún no ha sido explotado en forma comercial. En contraposición, existen tanto empresas privadas como instituciones científicas de EEUU, Europa y Asia que ofrecen servicios de diseño, instalación y mantenimiento de sistemas de monitoreo de *strain* y temperatura mediante técnicas ópticas, pero los sensores implementados están basados en FBGs y no en LPGs.

Las tendencias en las investigaciones científicas y desarrollos tecnológicos asociados, muestran que OFS del tipo LPG son potenciales competidores de las tecnologías convencionales en lo que a medición de n_{mrf} , T y ϵ respecta [52], habiendo esto sido abordado por estudios realizados a lo largo de los últimos 30 años. Además, cabe mencionar que gran parte de estos estudios verifican aplicaciones en el campo de la Ingeniería Civil.

El hecho de que la respuesta óptica de las LPGs esté condicionada por la composición íntima del medio que rodea a la fibra (a diferencia de las FBGs), sugiere que son potencialmente usables para la determinación de la presencia o concentración de agentes químicos, lo cual fue experimentalmente evaluado durante los años 90 y primer década del 2000 [53]. Esto último coloca a los sensores ópticos basados en el uso de LPGs en una posición especialmente atractiva en relación a las mediciones relevantes en el campo de la durabilidad de los materiales de uso civil.

La tendencia investigativa relevada en reportes científicos publicados en los últimos 10 años muestra que el interés técnico se está consolidando en un gran eje temático de aplicación relativo a la durabilidad, el cual está fundamentalmente orientado a la determinación del grado de corrosión de las barras de refuerzo del hormigón armado.

Si bien se han encontrado antecedentes del uso de LPGs para la determinación de humedad relativa (HR), no se han registrado publicaciones que reporten los resultados de la determinación del nivel de humedad interna de probetas de mezclas cementíceas (en laboratorio) o estructuras de igual conformación (en campo). Además no se han verificado experiencias documentadas en lo que respecta a la implementación de LPGs para el monitoreo del perfil de HR en función de la profundidad respecto de la superficie del material de recubrimiento. En lo que a durabilidad respecta, el hecho de

conocer el nivel de HR interno de una estructura es especialmente relevante debido a que el agua es un elemento protagonista en varios mecanismos de transporte de diferentes agentes químicos de carácter deletéreos para el hormigón (esto último será abordado con mayor detalle en el Capítulo 4 de esta Tesis).

Por otro lado, se han encontrado antecedentes relativos al empleo de LPGs (a nivel de laboratorio, no de campo) para la detección de la presencia y/o medición de la concentración de iones cloruro en solución acuosa con miras a ser empleadas a futuro en sensores embebibles en hormigón [54] [55]. Dichos estudios no han confluído al día de la fecha en reportes que publiquen los resultados de ensayos concluyentes dentro de probetas.

Por otro lado, si bien se han encontrado antecedentes publicados del uso de OFS para la determinación de pH en probetas de hormigón, las técnicas ópticas implementadas emplean principios físicos de funcionamiento que están basados en efectos espectroscópicos [56] o en el análisis del campo evanescente en fibras ópticas sin recubrimiento polimérico (fibras en las que se extrajo el recubrimiento basado en PMMA) [57].

Se identificaron dos espacios de vacancia durante el rastillaje bibliográfico, en lo que respecta a la aplicación de LPGs para la determinación de magnitudes de interés en el área de la durabilidad del hormigón, teniendo en cuenta la potencial capacidad que presentan las LPGs para medir el índice de refracción del medio que rodea a la fibra. No se han encontrado antecedentes que reporten el empleo de LPGs para la determinación de:

- Concentración de iones sulfatos.
- Nivel de pH en hormigón.

Más allá de que no sea la orientación que se le adjudicó a este trabajo de Tesis Doctoral, lo último mencionado habilita la posibilidad de avanzar en el abordaje del uso de LPGs en estas líneas investigativas con el objetivo de generar conocimientos científicos al respecto que brinden soporte suficiente para la construcción formal de sensores con este tipo de tecnología óptica.

2.8. Referencias

[1] *Introducción a la durabilidad y patologías de las estructuras de hormigón armado*. Traversa, Luis P and Villagrán Zaccardi, Yury Andrés. 2010. IX Jornada “Técnicas de restauración y conservación del patrimonio”.

[2] Perepérez Ventura, B, Barberá Ortega, E and Andrade Perdrix, C. *La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón*. s.l. : Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2013. pp. 17-24.

[3] Comité ACI 201. *Guía para la durabilidad del hormigón - ACI 201.2R*. s.l. : American Concrete Institute, 2001.

- [4] Kumar Mehta, P and Monteiro, Paulo. *Concrete - Microstructure, Properties, and Materials*. s.l. : McGraw-Hill Companies, Inc., 2006.
- [5] *Biodeterioro en estructuras de hormigón en ambientes urbanos, rurales y marinos de la Prov. de Buenos Aires*. Priano, C, et al., et al. 2008. III Congreso Internacional y XVII Reunión Técnica de la AATH. pp. 241-248.
- [6] Suarez Muñoz, Alejandro. Influencia de la concentración de cloruros combinados en el inicio de la corrosión en hormigón armado expuesto completamente a agua del mar. *Trabajo de fin de grado*. Cartagena, España : s.n., septiembre 20, 2018.
- [7] *Reducing the environmental impact of concrete*. Kumar. 2001, Concrete International, pp. 61-66.
- [8] *Greening of the concrete industry for sustainable development*. Kumar, Metha. 2002, Concrete International, pp. 23-28.
- [9] Bjegović, Dubravka, et al., et al. Test methods for concrete durability indicators. 2016, pp. 48-99.
- [10] Villagrán Zaccardi, Yury Andrés. Estimaciones del ingreso de cloruro en hormigón y de la despasivación localizada de armaduras. *Tesis doctoral*. La Plata, Buenos Aires, Argentina : Universidad Nacional de La Plata, 2012.
- [11] Cortés Cortés, Manuel and Iglesias León, Miriam. *Generalidades sobre metodología de la investigación*. Campeche, México : Universidad Autónoma del Carmen, 2004.
- [12] Bungey, John, Millard, Stephen and Grantham, Michael. *Testing of concrete structures*. s.l. : Taylor & Francis Group, 2006.
- [13] *Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo*. Ebensperger, Luis and Torrent, Roberto. 3, Santiago de Chile : s.n., 2010, Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 25, pp. 371-382.
- [14] Galán García, Isabel. Carbonatación del hormigón: combinación del CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. Madrd, España : Universidad Complutense de Madrid, 2011.
- [15] Fraden, Jacob. *Handbook of modern sensors*. New York : Springer, 2010.
- [16] Spillman, William and Udd, Eric. *Fiber optic sensors*. s.l. : SPIE, 2014.
- [17] Yin, Shizhuo, Ruffin, Paul and Yu, Francis. *Fiber optic sensors*. s.l. : CRC Press, 2008.
- [18] Agrawal, Govind. *Lightwave technology*. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. , 2004.
- [19] *Optical Fiber Sensor Technologies*. Culshaw, Brian. 1, January 2004, Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, pp. 39-50.

- [20] *Fiber optic sensors and their applications*. Fidanboyu, K and Efendioglu, H. S. Karabuk : s.n., 2009. 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09).
- [21] Lecler, Sylvain and Meyrueis, Patrick. [book auth.] Moh Yasin. *Fiber Optic Sensors*. s.l. : InTech, 2012, pp. 53-76.
- [22] *Fiber optic sensors in concrete structures: a review*. Merzbache, C. i., Kersey, A. D. and Friebele, E. J. 1996, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 5, pp. 196-208.
- [23] *Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials*. Ramakrishnan, Manjusha, et al., et al. 99, Basel : MDPI, January 10, 2016, *Sensors*, Vol. 16.
- [24] *Review: optical fiber sensors for civil engineering applications*. Leung, Christopher, et al., et al. November 10, 2013, *Materials and Structures*, Vol. 48, pp. 871-906.
- [25] *Fiber optic sensors in structural health monitoring*. López-Higuera, José Miguel, Quintela Incera, Antonio and Cobo, Adolfo. 4, February 15, 2011, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, pp. 587-608.
- [26] *Monitoring of strain induced by heat of hydration , cyclic and dynamic loads in concrete structures using fiber-optics sensors*. Yehia, Sherif, et al., et al. February 28, 2014, *Measurement*, pp. 33-46.
- [27] *Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring*. Torres, Benjamin, et al., et al. November 30, 2010, *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 539-548.
- [28] *Fibre Bragg gratings in structural health monitoring - Present status and applications*. Majumder, Mousumi, et al., et al. April 22, 2008, *Sensors and Actuators A*, Vol. 147, pp. 150-164.
- [29] *Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors*. Leng, J. S., et al., et al. January 30, 2006, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 15, pp. 302-308.
- [30] *Concrete beam crack detection using tapered polymer optical fiber sensors*. Luo, Dong, et al., et al. 2016, *Measurement*, Vol. 88, pp. 96-103.
- [31] *Diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas: aplicación al estudio de materiales y estructuras*. Mesa Yandi, Angélica M. 2018. La Plata, Buenos Aires, Argentina : Facultad de Ingeniería - UNLP.
- [32] *Characterization of dimensional changes of cement pastes and mortars in fresh state applying an interferometric technique*. Mesa Yandy, Angélica, et al. 2015, *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 4, Issue 10.,
- [33] *Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings*. Slowik, Volker, Schlattner, Evelyn and Klink, Thomas. 2004, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 473-479.

- [34] *Dimensional stability of materials based on Portland cement at the early stages.* Mesa Yandy, Angélica, et al. 2014.
- [35] *Monitoring of corrosion in structural reinforcing bars: performance comparison using in situ fiber-optic and electric wire strain gauge systems.* Grattan, Simon, et al., et al. 11, November 2009, IEEE Sensors Journal, Vol. 9, pp. 1494-1502.
- [36] *Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors.* Fuhr, Peter and Huston, Dryver. July 25, 1997, Smart Mater. Struct., Vol. 7, pp. 217–228.
- [37] *A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures.* Leung, Christopher, Wan, Kai Tai and Chen, Liquan. s.l. : MDPI, March 20, 2008, Sensors, Vol. 8, pp. 1960-1976.
- [38] *Optical fiber corrosion sensor based on laser light reflection.* Wang, Y. and Huang, H. s.l. : IOP Publishing, June 28, 2011, Smart Mater. Struct., Vol. 20.
- [39] *Research on corrosion detection for steel reinforced concrete structures using the fiber optical white light interferometer sensing technique.* Zhao, Xuefeng, et al., et al. s.l. : IOP Publishing, April 30, 2013, Smart Mater. Struct., Vol. 22.
- [40] *Long period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles for corrosion monitoring.* Huang, Ying, et al., et al. s.l. : IOP Publishing, June 6, 2013, Smart Mater. Struct., Vol. 22.
- [41] *Fiber Optic Evanescent field Sensors for pH Monitoring in Civil Infrastructure.* Ghandehari,, Masoud and Vimer, Cristian. 2002. Proceedings of SPIE. pp. 196-205.
- [42] Tipler, Paul A. *Física.* s.l. : Reverté S. A., 1994. Vol. 1.
- [43] Spillman, William and Udd, Eric. *Field Guide to Fiber Optic Sensors.* [ed.] Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2014. Vol. FG34.
- [44] Martinez-Rios, Alejandro, et al., et al. Long Period Fiber Gratings. *Fiber Optic Sensors.* 2012.
- [45] *Fiber grating spectra.* Erdogan, Turan. 8, August 1997, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, pp. 1277-1294.
- [46] Mendes do Rego, Gaspar. *Arc-Induced Long-Period Fibre Gratings. Fabrication and Their Applications in Optical Communications and Sensing.* 2006.
- [47] *Microfiber Optical Sensors: A Review.* Lou, Jingyi, Wang, Yipei and Tong, Limin. 2014, Sensors.
- [48] *Application of the complex coupled-mode theory to optical fiber grating structures.* Song, Ning, Mu, Jianwei and Huang, Wei-Ping. 5, March 2010, Journal Of Lightwave Technology, Vol. 28, pp. 761-767.

- [49] *Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters*. Erdogan, Turan. 8, August 1997, Journal of Optical Society of America, Vol. 14, pp. 1760-1773.
- [50] *Coupled-mode theory for guided-wave optics*. Yariv, Amnon. 9, September 1973, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vols. QE-9, pp. 919-933.
- [51] *Calculation of the transmission spectrum of long-period fiber grating based on the mode field analysis method*. Zhang, Wei. s.l. : Atlantis Press, 2015. International Symposium on Computers & Informatics (ISCI 2015). pp. 272-279.
- [52] *Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application*. James, Stephen W. and Tatam, Ralph P. 5, 2003, Measurement Science and Technology, Vol. 14, pp. R49 - R61.
- [53] *Optical fiber sensors based on polymeric sensitive coatings*. Rivero, Pedro J., Goicoechea, Javier and Arregui, Francisco J. . [ed.] MDPI. 280, March 7, 2018, Polymers, Vol. 10.
- [54] *Measurement of chloride-ion concentration with long-period grating technology*. Tang, Jaw-Luen and Wang, Jian-Neng. s.l. : IOP Publishing, 2007, Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. 665–672.
- [55] *Measurement of chloride ion using a long-period fiber-grating-based microfluidic chip system*. Wang, Jian-Neng, et al., et al. 2012, Advanced Materials Research, Vols. 378-379, pp. 795-798.
- [56] *Fiber optic chemical sensor systems for monitoring pH changes in concrete*. Basheer, Muhammed, et al., et al. 2004. Proceedings of SPIE.
- [57] *Fiber Optic Evanescent field sensors for pH monitoring in civil infrastructure*. Ghandehari, Masoud and Vimer, Cristian S. 2002. Proceedings of SPIE. Vol. 4704.

3. Fase experimental I. Generación de LPGs

3.1. Comentarios previos

Desde el año 2000 aproximadamente se ha verificado a nivel mundial un gradual aumento del interés técnico y científico en redes de difracción contenidas en fibras ópticas tales como las ya mencionadas FBGs y LPGs. Las dos vertientes técnicas que movilizaron tal interés fueron las asociadas al campo de las comunicaciones ópticas y al campo del sensado de magnitudes físicas y químicas. En lo que respecta al empleo de LPGs en técnicas de sensado óptico se observó un crecimiento extraordinario en el número de aplicaciones en los últimos 15 años [1]. Cada año se registran nuevos emprendimientos científicos que demuestran la factibilidad técnica de aplicar LPGs en sistemas de sensado de diferentes magnitudes de interés en algún área de la Ingeniería. Por este motivo el hecho de dominar una técnica de generación de LPGs presenta un elevado valor estratégico desde el punto de vista de su proyección a futuro, considerando que tanto el interés como la demanda sobre las mismas crecen año a año, en concordancia con su trascendencia de uso como elemento central en sistemas de medición.

Al momento de la redacción de este manuscrito el valor de mercado de una LPG comercial (valor FOB) fue de U\$D 60 aproximadamente [2], lo que hace dificultosa su adquisición si se requiere el empleo de este tipo de tecnología de sensado a media y gran escala en emprendimientos ejecutados en el marco de proyectos científicos/tecnológicos en los que se requiera disponer de un gran número de estos dispositivos en las etapas de pruebas de laboratorio o ensayos de factibilidad.

Por otro lado, el plan experimental asociado a esta Tesis exigió la realización de numerosas experiencias de laboratorio que implicaron el uso de una gran cantidad de LPGs que, una vez utilizadas no pudieron volver a emplearse debido a la naturaleza misma de la mayoría de los ensayos planificados. A causa del alto costo de cada unidad se tornó indispensable alcanzar en las primeras etapas del plan experimental, un grado avanzado de dominio y madurez de alguna técnica que permita la fabricación local de LPGs. A su vez, resultaba relevante la posibilidad de generar estos dispositivos con características espectrales específicas dependientes de los requerimientos particulares de la aplicación a desarrollar. Finalmente, un requerimiento ineludible fue que la técnica sea compatible con las facilidades disponibles en las instalaciones del Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOp.

El hecho de alcanzar la meta asociada a la fabricación local de LPGs no sólo propició el auto-suministro de unidades para cumplir con los objetivos experimentales y la cobertura de la demanda interna del CIOp, sino que redundó en la posibilidad de abastecer la potencial necesidad del resto de la comunidad científica que requiera este tipo de dispositivos para el sensado o monitoreo de alguna magnitud factible de ser medida mediante su uso.

Cabe mencionar que el hecho de alcanzar esta meta también allanó el camino orientado a lograr un alto grado de comprensión de los procesos involucrados en la fabricación, como así sus condicionantes y efectos de las variables de diseño sobre las características del producido final.

En este capítulo se describe la técnica de generación de LPGs implementada para la concreción de las metas establecidas en el Plan de Tesis. Tal técnica fue adaptada a la instrumentación disponible en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOP, y perfeccionada luego de un cuidadoso proceso que implicó la realización de una gran cantidad de pruebas. La técnica implementada para la generación local de LPGs es conocida como *inducción por arco eléctrico*.

A continuación se describen brevemente las diferentes técnicas normalmente usadas para la generación de LPGs, dentro de las cuales se encuentra la previamente mencionada.

3.1.1. Técnicas de fabricación de LPGs

Se han reportado varias formas de generar LPGs [1] [3] [4]. En todas ellas, se induce un cambio del valor del índice de refracción de la fibra en una serie de segmentos cortos equidistanciados entre sí. De tal modo se genera una modulación del valor del índice de refracción a lo largo del eje longitudinal de la fibra que puede ser persistente en el tiempo o no, luego de que cese la acción del agente que induce tal modulación. Las causas por las que se producen dichos cambios debido a la acción del agente inductor son aún un motivo de investigación en diversas partes del mundo [4]. A este respecto, las referencias científicas relevadas sugieren que las causas del cambio de índice pueden estar vinculadas a:

- Cambios en la estructura del vidrio: debido fundamentalmente a fenómenos de densificación o cambios en la temperatura de transición vítrea del material que ocurren a causa de altas velocidades de enfriado. La temperatura de transición vítrea (también llamada temperatura ficticia) es la temperatura en la cual el material amorfo (o vítreo por naturaleza) se vuelve rígido (o frágil). Por debajo de ésta el vidrio se comporta como un sólido rígido, mientras que por encima de ella se vuelve más viscoso y muestra propiedades más cercanas a las de un líquido superenfriado.
- Relajación del estrés elástico: manifestando cambios en la capacidad del material para deformarse de manera reversible cuando es sometido a una fuerza o carga mecánica externa.
- Relajación del estrés viscoelástico: manifestando cambios en la capacidad del material para exhibir un comportamiento tanto elástico como viscoso en su respuesta mecánica.
- Deformación física: implica la alteración de la geometría de la fibra óptica, lo cual incluye tanto micro-doblecés como micro-ahusamientos.
- Difusión térmica de dopantes del núcleo de la fibra.

A continuación se describen conceptualmente las principales técnicas usadas para la generación de LPGs en fibra óptica.

3.1.1.1. Inducción mecánica

Consiste en la aplicación de una fuerza discretamente distribuida sobre una serie de puntos equidistantes a lo largo de un segmento de la fibra óptica [5]. La Figura 3. 1 muestra un esquema en el que se observa una serie de elementos de contacto que se encuentran apoyados sobre la superficie superior de la fibra óptica. Éstos son solidarios a una plataforma sobre la cual se aplica una fuerza que genera una acción de compresión sobre la fibra. La distancia entre los puntos de aplicación de la fuerza desarrollada sobre cada punto de contacto, determina el período de red Λ . Esta es una técnica muy flexible que normalmente es usada para la determinación de la existencia de cargas mecánicas que generen esfuerzos en cualquier dirección no alineada con el eje de la fibra óptica. Puede implementarse para la medición de la presión que dichas cargas generan sobre una dada superficie sobre la cual se encuentra emplazada la fibra. Este método conlleva a la generación de LPGs que no perduran una vez que desaparece la excitación mecánica que las genera (estas redes son conocidas como “redes reversibles”) si la acción mecánica no supera el límite de rotura de la estructura interna de la fibra óptica.

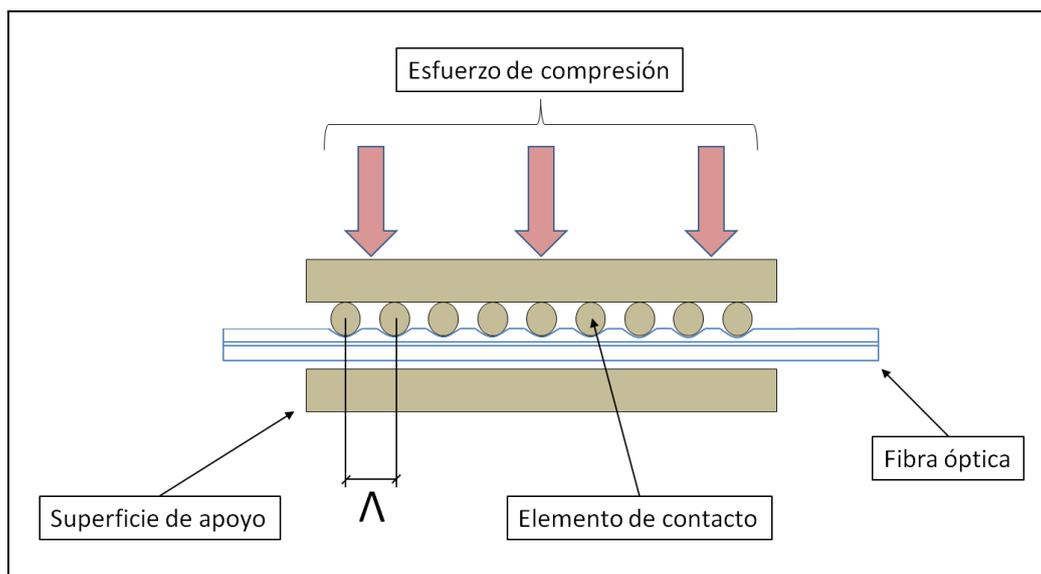


Figura 3. 1. Formación de una LPG inducida mecánicamente.

3.1.1.2. Inducción por exposición UV

La Figura 3. 2 muestra esquemáticamente cómo es el sistema de grabado de una LPG mediante la técnica llamada “inducción por exposición UV”. Ésta consiste en exponer un segmento de la fibra óptica a una fuente de radiación ultravioleta (UV). Mediante el empleo de una pantalla opaca que contiene un patrón de rendijas de geometría apropiada (máscara de amplitud) se obtiene un patrón de luz y sombra que se proyecta axialmente sobre la fibra. Aquellas zonas de la fibra alcanzadas por la

radiación UV varían el valor del índice de refracción debido a una propiedad óptica, inherente al material que la conforma, llamada fotosensibilidad. De esta manera se logra grabar o generar una modulación longitudinal del índice de refracción a través de la exposición antedicha. Cabe aclarar que el uso de la máscara de amplitud no produce un efecto de difracción de la radiación UV dado que el valor de la longitud de onda de cualquier emisor en esta banda del espectro electromagnético es tres órdenes de magnitud más pequeña que las dimensiones de las rendijas.

Para amplificar el efecto de la respuesta a la exposición se utilizan fibras de composición especial (fibras altamente fotosensibles y fibras hidrogenadas) lo cual permite mejorar la eficiencia temporal y energética del proceso de grabado. Dependiendo del nivel de fotosensibilidad de la fibra expuesta a la radiación el proceso puede durar desde minutos a horas para alcanzar la inscripción de una red que responda ópticamente a requerimientos de desempeño normales.

Una de las principales características de esta técnica de grabado es que las marcas que conforman la red son inscriptas en simultáneo.

Para la ejecución de este proceso se requiere el uso de láseres que emitan en la banda del UV y de un sistema mecánico de posicionamiento que estabilice el movimiento del montaje con el fin de minimizar el efecto negativo de las vibraciones. La meta a alcanzar en lo que respecta al montaje mecánico es evitar que las vibraciones generen un movimiento relativo entre emisor, la máscara y la fibra. De esta manera se obtienen modulaciones del índice de refracción con transiciones abruptas (lo cual implica marcas bien definidas) entre sus niveles debido a que existe un contraste estable entre la zona iluminada y la zona ensombrecida de la fibra óptica.

Por otro lado, los elementos ópticos necesarios para acondicionar el haz de grabado (óptica de colimación y enfoque) deben ser compatibles con la banda UV (comprendida entre 100nm y 400nm aproximadamente), por lo que en general son elementos de cuarzo (transparentes a este tipo de radiación). En las referencias bibliográficas se ha reportado el uso de diferentes tipos de emisores láser en el rango del UV, con buenos resultados para alcanzar el efecto de grabado necesario, como por ejemplo: exímero de KrF, ión Ar, exímero ArF, Nd:YAG, Nd:vidrio, $Ti^{3+}:Al_2O_3$, F_2 , en modalidad pulsada o en régimen de emisión continua (CW).

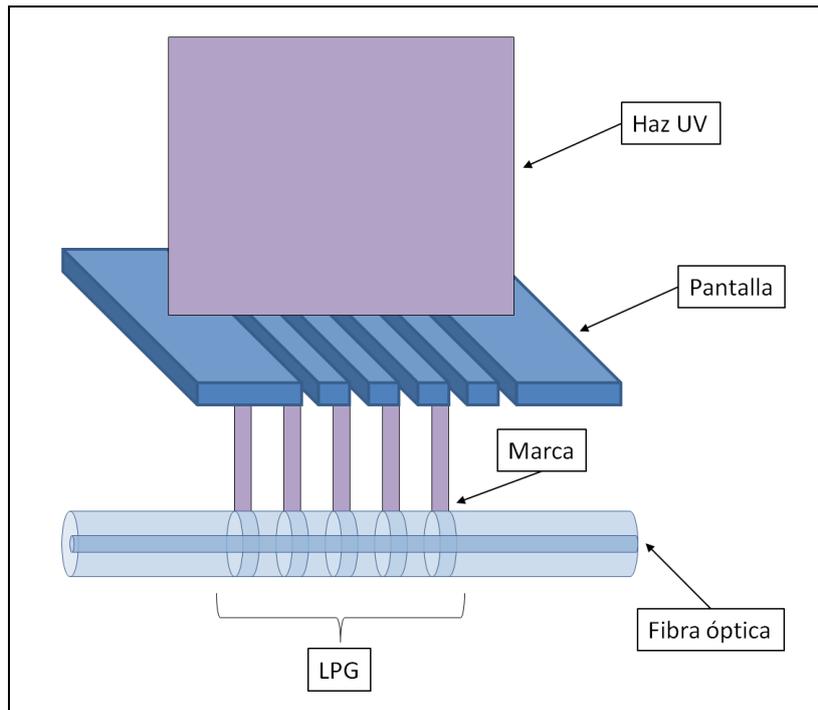


Figura 3. 2. Formación de una LPG inducida por exposición UV.

3.1.1.3. Inducción por ablación láser

Esta técnica es ilustrada en la Figura 3. 3. La misma demanda el uso de un láser de CO₂ cuyo haz produce la elevación de la temperatura de la fibra óptica en el punto en el que se encuentra enfocado. Este hecho produce el cambio del índice de refracción en la zona sobrecalentada [6]. A diferencia de la técnica previamente mencionada, las marcas que conforman la LPG son grabadas en forma secuencial, es decir, de a una marca a la vez (técnica punto a punto) [7]. En la figura, la flecha verde indica la dirección de incidencia del haz sobre la fibra.

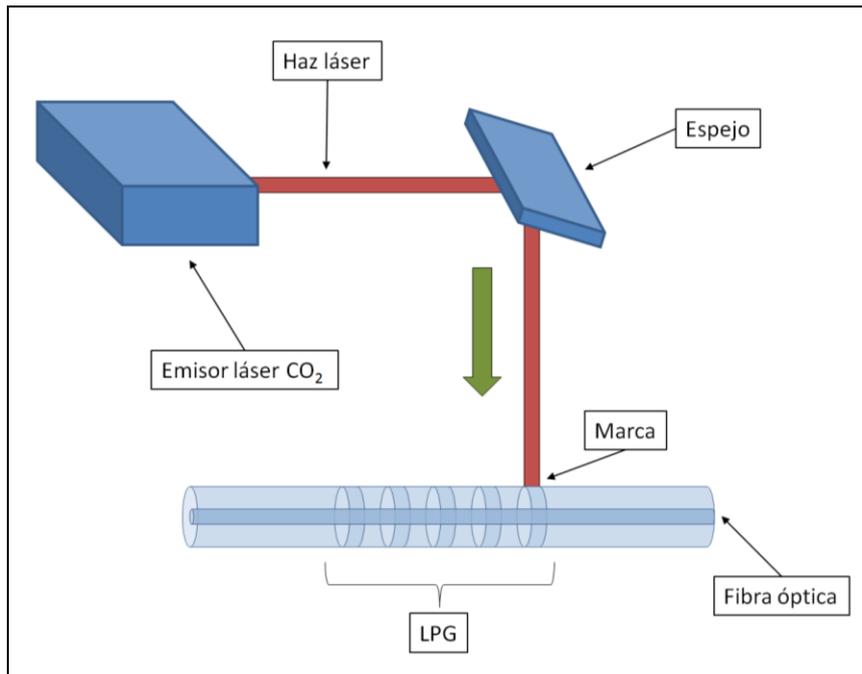


Figura 3. 3. Formación de una LPG inducida por ablación láser.

3.1.1.4. Inducción por arco eléctrico

Consiste en someter un segmento de la fibra óptica a la acción de un arco eléctrico generado por un par de electrodos. La consecuencia de la interacción del arco eléctrico con el material de la fibra óptica es la elevación de su temperatura en la región que se encuentra inmersa en la zona de influencia del arco. Este efecto es utilizado para generar ahusamientos, curvaturas, o para inducir cambios en la estructura del vidrio con el objeto de generar una modificación puntual del perfil axial del índice de refracción de la fibra. Al igual que la técnica previamente mencionada, se trata de un procedimiento punto a punto.

La Figura 3. 4 muestra un esquema del arreglo experimental asociado a esta técnica. Puede observarse que esta forma de generación de LPG es la que menos logística de laboratorio requiere comparada con otras, motivo por el cual es menos demandante desde el punto de vista económico. Esta técnica produce marcas permanentes (que perduran en el tiempo).

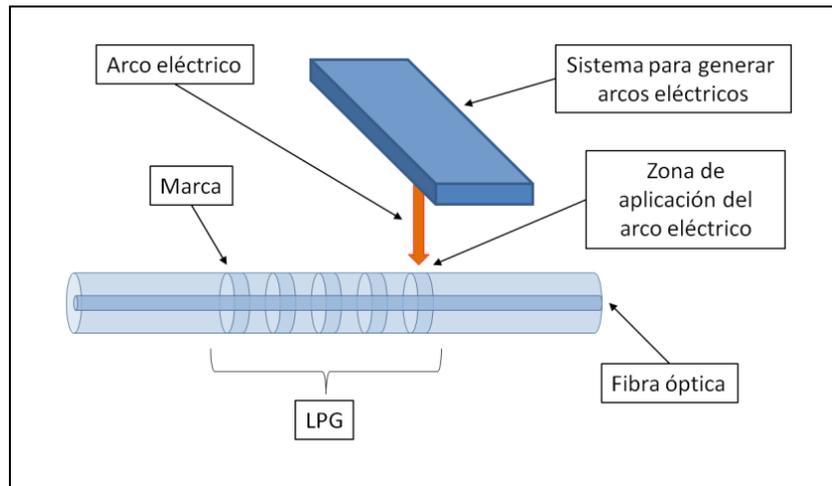


Figura 3. 4. Formación de una LPG inducida por arco eléctrico.

3.1.2. Antecedentes locales

En el CIOp se ha desarrollado interés en la generación propia de LPGs desde la aparición de los primeros antecedentes científicos que exhibieron sus cualidades para ser usadas como elementos sensores. Esto condujo al personal del Grupo de Fibras a realizar pruebas de fabricación de LPGs que permitieron la adquisición de una experiencia inicial en el tema, la cual constituyó el punto de partida para alcanzar los avances posteriores logrados a partir del año 2018 a raíz de las actividades relacionadas con la ejecución de este trabajo de Tesis.

Durante el año 2017 se ejecutaron ensayos exitosos de generación de LPGs inducidas mecánicamente en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOp, trabajo que fue divulgado en la edición 2017 de la Reunión de la Asociación de Física Argentina [8]. Durante el mismo año, se iniciaron pruebas primarias que demostraron la factibilidad de generar un tren de micro ahusamientos en fibras ópticas mediante el ataque a la fibra a través de un arco eléctrico, utilizando las facilidades disponibles en el laboratorio. Esto último sentó las bases en el CIOp para la adaptación y depuración de la técnica de inducción por arco, hecho que formó parte del plan de tareas asociadas al presente trabajo de Tesis Doctoral.

Conforme al rastillaje realizado durante la fase de revisión bibliográfica, se observó que no existen evidencias publicadas al momento de redacción de este manuscrito que demuestren que otros grupos de investigación hayan realizado experiencias de generación de LPGs en el ámbito nacional.

3.2. Técnica implementada para la generación de LPGs

En la técnica “*inducción por arco eléctrico*” la conformación de una LPG ocurre si existe una sucesión regular de marcas como se indicó en el Cap. 2. Una forma de obtener una marca inscripta en un pequeño segmento de la fibra, es mediante la formación de una estructura en la fibra óptica conocida como *microtaper* (de ahora en

más, μ -taper) [3]. Luego, una LPG se obtiene mediante la generación de un determinado número de μ -tapers equidistantes, en donde la distancia entre ellos define al período de la red (Λ).

Un μ -taper consiste en una disminución del diámetro de la fibra (ahusamiento) que se extiende a lo largo de un segmento de una longitud dada, normalmente unas cuantas decenas de micrómetros (por ejemplo $100\mu\text{m}$). La técnica empleada para generar μ -tapers consistió en la fusión mediante el empleo de un arco eléctrico y estiramiento controlado de la fibra óptica (generación de LPG mediante la técnica de inducción por arco). La Figura 3. 5 muestra esquemáticamente una sección longitudinal de una fibra óptica que presenta un μ -taper. La reducción del diámetro afecta tanto al núcleo como al revestimiento de la fibra óptica. Un μ -taper puede describirse geoméricamente a través de dos parámetros que son mencionados a continuación [9]:

- Longitud de la zona de transición (l_w): es la longitud del segmento del μ -taper que une a la zona no ahusada (de diámetro igual al original de la fibra) con la zona ahusada (de diámetro reducido). La zona de transición puede ser modelada para su análisis a través de distintas funciones, a saber: perfil parabólico, exponencial, sinusoidal y polinómico, entre otros [10].
- Longitud de cintura (Z_0): es la longitud del segmento del μ -taper en el que el diámetro de la fibra óptica se encuentra reducido respecto del diámetro original.

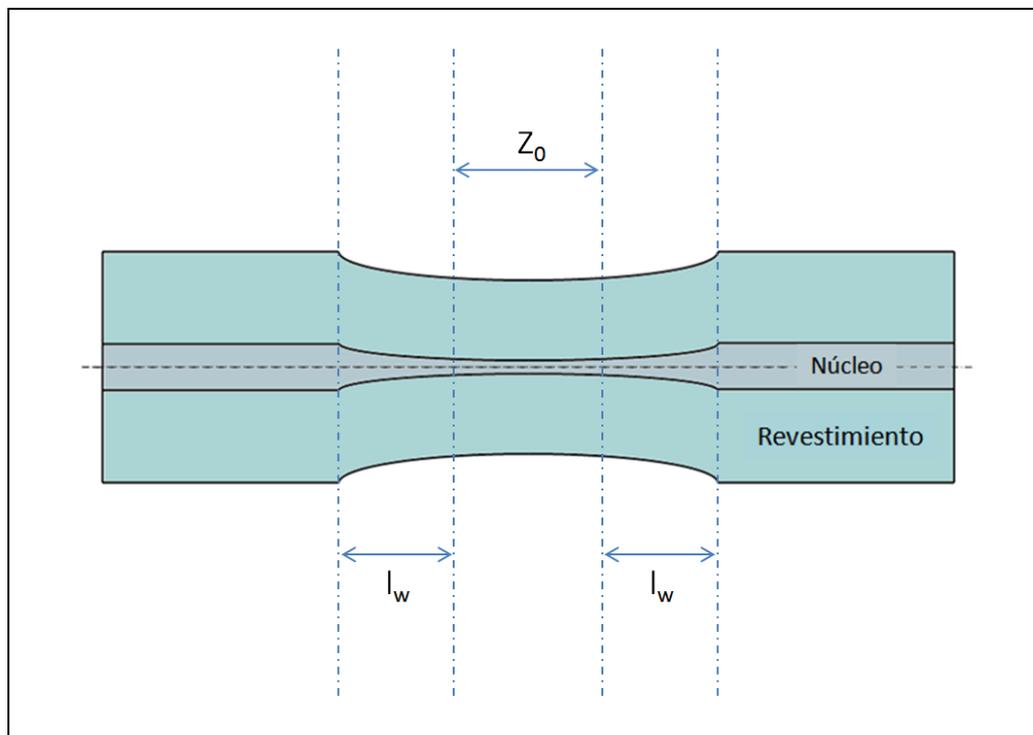


Figura 3. 5. Perfil axial de un segmento de una fibra óptica que posee un μ -taper en la zona central.

Para la implementación de la técnica “*inducción por arco eléctrico*”, la generación de cada μ -*taper* fue realizada mediante el empleo de una máquina empalmadora de fibra óptica que funciona empleando el proceso de fusión. Este tipo de empalmadoras emplean un arco eléctrico para efectivizar una unión (empalme) de alta calidad entre dos extremos de fibras ópticas. La flexibilidad que brinda el modelo de la máquina disponible en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOp, permitió el desarrollo de un proceso de generación de μ -*tapers* que combinó la acción térmica debido a la aplicación de un arco eléctrico de características controladas, con la acción mecánica producida por una tracción axial de intensidad y duración adecuada. El objetivo de esto fue obtener un perfil longitudinal del diámetro de la fibra que muestre un angostamiento en la zona en la que el arco eléctrico actuó, para dar lugar a la formación de un μ -*taper*. La estrategia usada consistió en la aplicación de un esfuerzo de tracción aplicado sobre la fibra óptica en simultáneo con el ataque del arco eléctrico. Esto condujo a la búsqueda de la combinación adecuada entre el valor de la tensión aplicada a la fibra y la intensidad/ duración del arco eléctrico. La Figura 3. 6 muestra un esquema en el que se compara el perfil axial de la fibra antes (a) y durante el proceso de aplicación del arco eléctrico (b).

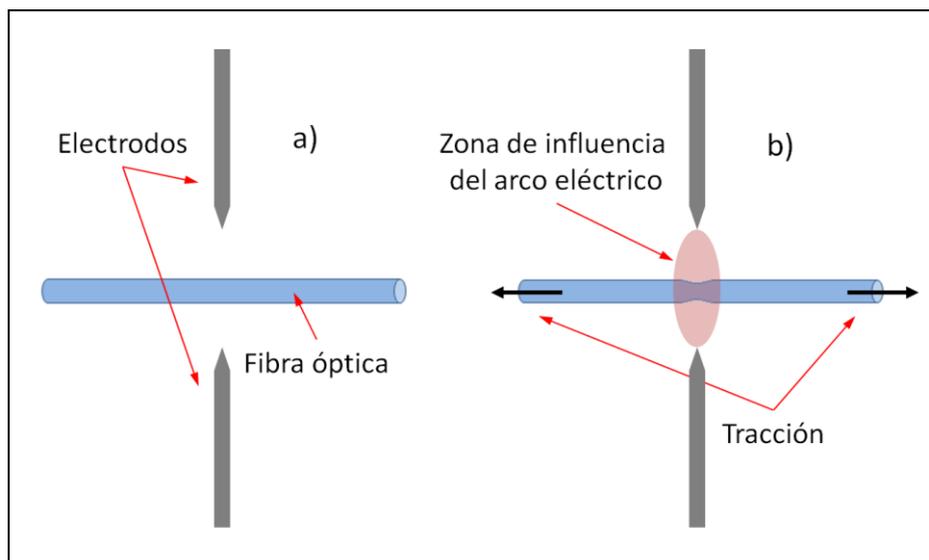


Figura 3. 6. Perfil de la fibra óptica antes y durante la aplicación de un arco eléctrico para la formación del μ -*taper*.

Durante el tiempo en el que se aplica el arco eléctrico y en la zona de influencia del mismo, la fibra óptica sufre una elevación de temperatura que supera el punto de fusión del material que la constituye. Como consecuencia de la aplicación de la tensión axial (tracción) en simultáneo con la aplicación del arco eléctrico, la fibra experimenta un estiramiento que resulta en el ahusamiento de su perfil longitudinal. Una vez que cesa la excitación eléctrica, la temperatura de la fibra tiende a la del ambiente en busca

del equilibrio térmico. Cuando esta condición se alcanza la fibra óptica conserva la deformación generada, observándose la reducción esperada de su diámetro.

La tracción necesaria en la fibra durante la aplicación del arco eléctrico debe ser tal que genere un incremento de longitud que se condiga con la disminución deseada del diámetro. La Figura 3. 7 muestra las dimensiones de un fragmento de fibra óptica antes y después de ser aplicado el arco eléctrico. Se observa el cambio de diámetro que afecta a un cilindro que conserva su volumen antes y después del proceso, en donde los valores expuestos son cercanos a los verificados en la práctica.

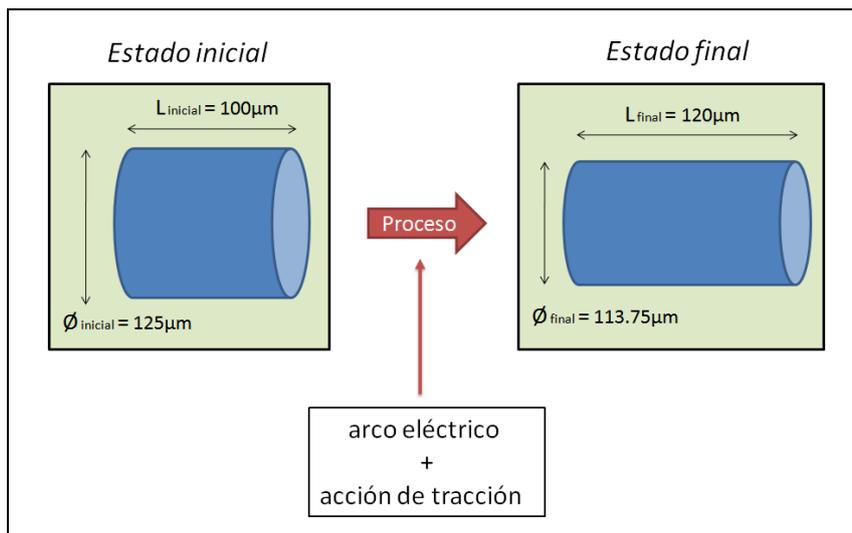


Figura 3. 7. Modelo geométrico para el cálculo del estiramiento conforme a la reducción del diámetro.

El uso del modelo geométrico mostrado permite determinar el estiramiento necesario para obtener la reducción porcentual del diámetro que logre el comportamiento óptico deseado en el dispositivo fabricado. Conforme a las observaciones realizadas durante las pruebas de laboratorio, la reducción debe estar comprendida entre un 6% y un 9% respecto del diámetro original para que el μ -taper se comporte según lo esperado en lo que respecta a la transmisión de la luz. Con dicha reducción, el número necesario de marcas para obtener una LPG de desempeño óptico aceptable (profundidad del pico de atenuación) oscila entre 25 y 60 según los registros tomados durante las pruebas de laboratorio. La cantidad mencionada de marcas produce una profundidad del pico de atenuación que oscila entre 15dB y 25dB.

Las longitudes axiales de los μ -tapers obtenidos de esta forma oscilaron entre $100\mu\text{m}$ y $120\mu\text{m}$ aproximadamente, dependiendo de las condiciones ambientales presentes durante el proceso de generación (temperatura y humedad relativa del laboratorio).

Cabe aclarar que estos resultados fueron obtenidos utilizando el mismo tipo de fibra óptica (especificada en la Sección 3.2.1 de este capítulo) en cada prueba ejecutada.

La Figura 3. 8 muestra el aspecto de un μ -taper logrado en el laboratorio. La imagen mostrada en el visor fotografiado de la figura fue obtenida mediante el uso de una de las cámaras internas de la máquina empalmadora de fibra. La excursión longitudinal de la imagen es de $250\mu\text{m}$. La fotografía de la Figura 3. 8 es mostrada a efectos ilustrativos (es decir, no constituye una referencia gráfica debido a la distorsión que imponen los efectos de paralaje propios del sistema fotográfico de captura).

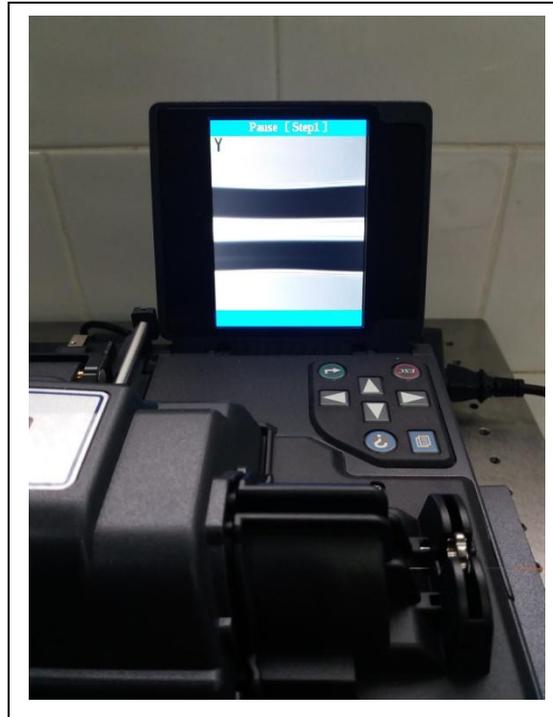


Figura 3. 8. μ -taper logrado en el laboratorio.

3.2.1. Arreglo experimental

El hecho de que esta técnica implique la generación de una marca a la vez demanda básicamente la atención de dos cuestiones relativas al manejo de la fibra:

- La alineación (posición relativa) de la fibra respecto de los electrodos de la máquina empalmadora: debe ser mantenida de marca en marca a efectos de garantizar que el arco eléctrico afecte a la fibra de manera similar en la realización de cada marca.
- El movimiento de la fibra en la dirección de su eje: el sistema de sujeción de la fibra debe permitir tal movimiento debido a que éste es necesario para cambiar la posición axial de la fibra respecto de la zona de influencia del arco eléctrico. Esto implica la necesidad de desplazar a la fibra en dirección longitudinal.

En ambos casos la estabilidad mecánica requerida en las estructuras de montaje, es muy alta. En el arreglo experimental montado, el primer aspecto de los dos

mencionados fue cumplido debido a que la máquina empalmadora en sí misma garantiza que la fibra se encuentre en la posición apropiada respecto de los electrodos durante el proceso de aplicación del arco eléctrico. La sistematicidad del posicionamiento de marca en marca es determinada por la precisión mecánica de los sistemas propios de la máquina. En este modelo de máquina empalmadora en específico, la fibra es sostenida mediante dos puntos de apoyo sobre sendos asientos que son solidarios a actuadores micrométricos de posición. A su vez la máquina dispone de dos brazos que actúan a modo de martillo que son responsables de sujetar a la fibra sobre los dos asientos. Luego la motorización de los asientos permite que pueda ser variada la posición relativa entre ellos por un programa de control que se ejecuta durante la aplicación del arco eléctrico.

La posición adoptada por la fibra es representada en la Figura 3. 9 a) a través de una vista transversal a la dirección del eje de la misma. Esta disposición asegura que el arco eléctrico interactúe con la fibra óptica de una manera uniforme (desde el punto de vista estadístico) en toda su sección recta, elevando la temperatura de igual manera en todos los puntos que la componen. En la Figura 3. 9 b) se observa que la fibra atraviesa al volumen asociado a la zona de influencia del arco por uno de los ejes directrices si dicha zona es modelada geoméricamente mediante un elipsoide.

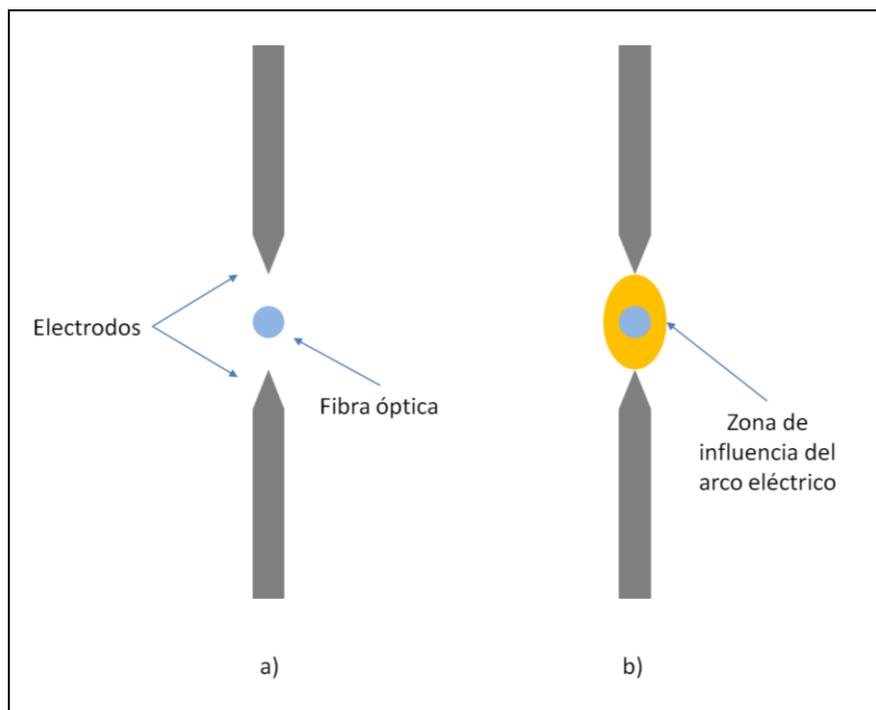


Figura 3. 9. a) Vista transversal de la disposición de la fibra entre los electrodos de la empalmadora; b) zona de influencia del arco eléctrico.

Respecto al segundo ítem de estabilidad mencionado, la Figura 3. 10 muestra un esquema del arreglo experimental montado para lograr el desplazamiento axial requerido. La conservación de la regularidad de la distancia entre marcas es una condición necesaria para lograr LPGs que se comporten aceptablemente desde el punto

de vista óptico. Esto demanda que el mecanismo de movimiento axial cumpla con un mínimo de calidad que garantice incertezas mecánicas acotadas. Se observa que la fibra óptica fue dispuesta horizontalmente de modo tal que un extremo de la misma (el izquierdo) se lo vinculó a una masa (M) y el otro extremo (el derecho) a un trasladador micrométrico de posición (T) de comando manual. Éste permitió mover la fibra óptica en Λ unidades de longitud hacia la derecha luego de la generación de cada marca. Para un operario con capacidad visual normal el trasladador T (de la firma Mitutoyo) posee un error de apreciación de $\pm 1\mu\text{m}$ teniendo en cuenta que el operador puede resolver visualmente hasta una décima de división de la escala. Debido a que el período de red Λ elegido fue de $550\mu\text{m}$ (como consecuencia de criterios que serán explicados más adelante), y siendo este valor mucho mayor que el error de apreciación, la dispersión en el valor de la distancia entre marcas durante el proceso de generación de una LPG fue considerada despreciable.

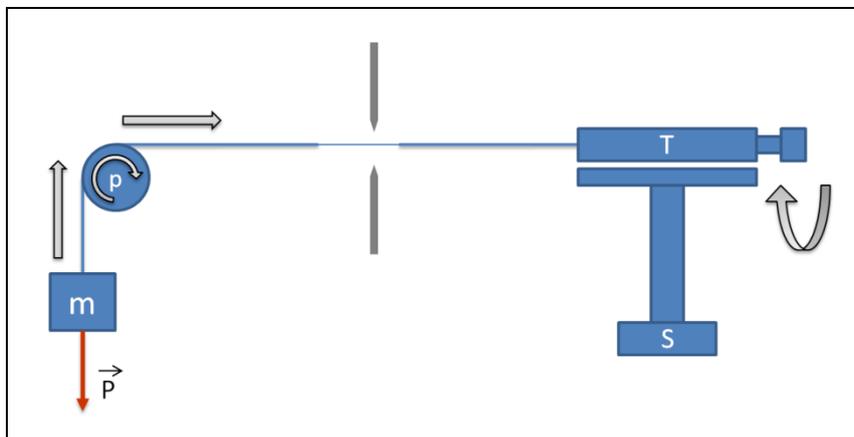


Figura 3. 10. Esquema del montaje utilizado.

La uniformidad en las características dimensionales de los μ -tapers se logró manteniendo inalterados los parámetros “potencia de arco”, “tiempo de ataque” y “acción de tracción” en cada μ -taper de la red, así como un adecuado sincronismo entre estas acciones. La forma en la que se garantizó la igualdad en la intensidad de la acción de tracción de una marca a otra, fue mediante la inclusión de la masa (M) que generó la misma tensión en cada realización de cada marca.

Luego, la polea (p) brindó libertad de movimiento para el accionar del trasladador con el objetivo de reposicionar la fibra después de generar cada μ -taper. Las flechas grises en la Figura 3. 10 denotan la dirección del movimiento de la fibra y del control de posición del trasladador. Por último el sistema fue alineado mediante el uso de un pedestal (S) de altura variable, de forma tal que la fibra óptica mantenga una horizontalidad que garantice que el movimiento de la misma no haga que la zona de influencia del arco eléctrico genere un ataque asimétrico a la fibra debido a que podrían provocarse micro-dobles que distorsionen la uniformidad geométrica de marca en marca.

La Figura 3. 11 muestra la implementación física del arreglo esquematizado en la Figura 3. 10. El elemento central es la empalmadora de fibra óptica (E) (marca Fujikura modelo FSM-100PM) que cuenta con los electrodos para generar el arco eléctrico. Todo el montaje fue realizado sobre una plataforma (MO) de alta estabilidad mecánica (mesa óptica de la firma Newport).

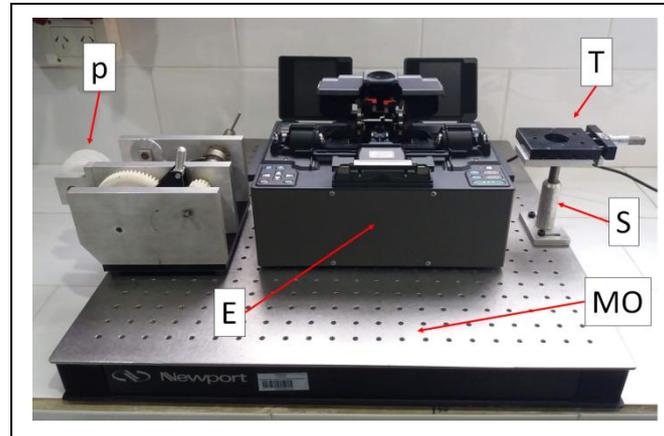


Figura 3. 11. Arreglo experimental para la generación de LPGs.

La máquina fue diseñada para unir dos extremos de fibra y no para generar marcas en los términos planteados. Por ello, cada paso del proceso de generación de LPGs descrito en este trabajo fue pensado para compatibilizar la función original de la máquina con el rol necesario que debió cumplir en el proceso de grabado de LPGs.

Con el objetivo de evaluar el desempeño óptico de la LPG a medida que se añadían marcas a la red, el arreglo experimental se completó con el uso de un instrumental (OSA) que permitió la visualización del espectro de transmisión de la LPG. De este modo se monitoreó permanentemente la evolución de la forma del espectro de transmisión de marca en marca grabada. El esquema de la Figura 3. 12 muestra el arreglo completo implementado para el grabado de LPGs. La observación permanente del espectro de transmisión permitió determinar la finalización del proceso de grabado de cada LPG una vez alcanzado el cumplimiento de determinadas características (por ejemplo, profundidad del pico de atenuación).

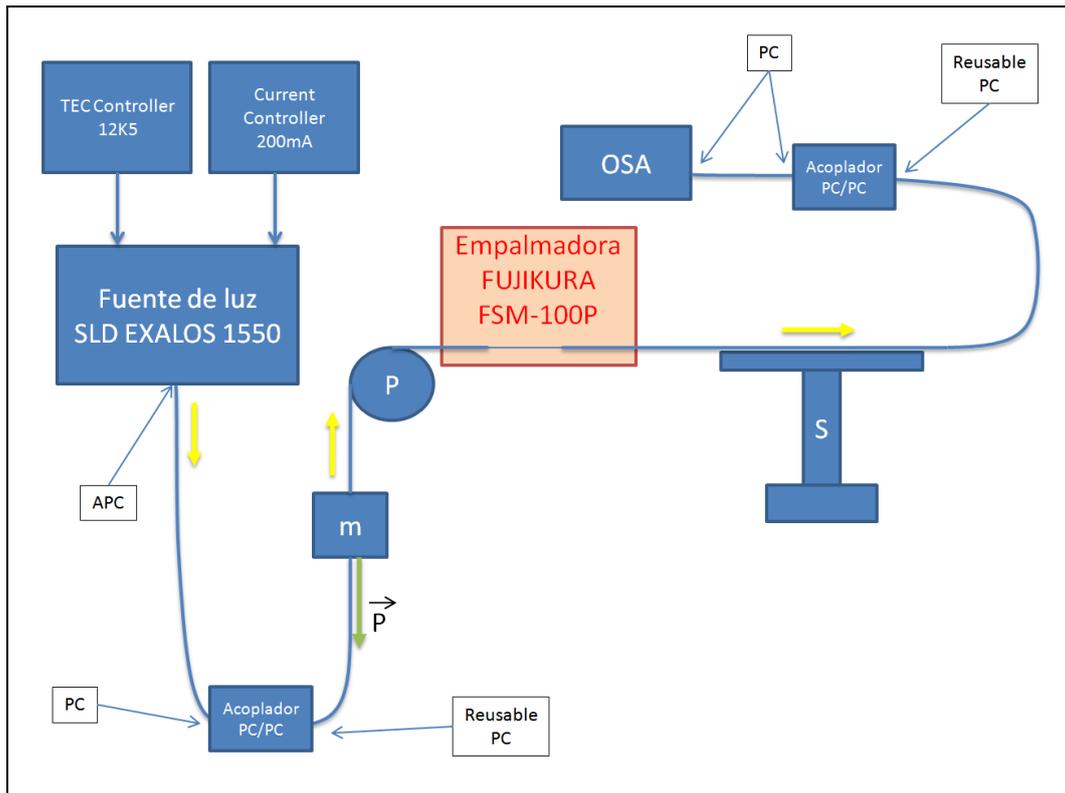


Figura 3. 12. Arreglo experimental completo (con monitoreo de evolución del espectro de transmisión) para la generación de LPGs.

Las flechas amarillas representan el sentido de circulación de la luz. El trazo azul continuo representa a la fibra óptica. El bloque “Fuente de luz SLD EXALOS 1550” simboliza la existencia física de un dispositivo emisor de luz que es asistido por el accionar de dos bloques controladores (Current Controller 20mA y TEC Controller 12K5) cuya finalidad es estabilizar respectivamente el valor tanto de la corriente eléctrica de alimentación como de la temperatura del emisor con el objetivo de que la característica espectral de la luz inyectada al circuito óptico se mantenga estable en el tiempo. Los bloques “PC”, “APC” y “Reusable PC” representan conectores y mecanismos de conexión de fibra óptica que sostienen la continuidad del circuito óptico ante el paso de la luz inyectada.

La fuente de luz usada fue del tipo SLD (Superluminescent Light Emitting Diode, también llamado SLED) de la firma Exalos (EXS210066-01), con emisión en la región espectral comprendida entre 1450nm y 1650nm aproximadamente. Dicho emisor fue elegido con el objeto de disponer de un ancho de banda amplio para la iluminación, tal que permita detectar completamente al menos uno de los picos de atenuación del espectro de transmisión de las LPG fabricadas, así como su corrimiento producido por efecto de la variación de las magnitudes a las que es sensible. La estabilidad térmica del emisor de luz fue lograda mediante el uso de un enfriador termoelectrónico (TEC) situado dentro del encapsulado del SLD.

Se utilizó un analizador de espectros ópticos (OSA) modelo AQ6370B de la firma Yokogawa con el objeto de monitorear y registrar la evolución del espectro de la señal luminosa presente en el puerto de salida de la LPG.

En la Figura 3. 13 se observa la imagen obtenida mediante un video microscopio de una fibra óptica vista en forma longitudinal que contiene una LPG generada con la técnica descrita. Se observan zonas de diferente luminosidad correspondientes a los diferentes μ -tapers que conforman la red.

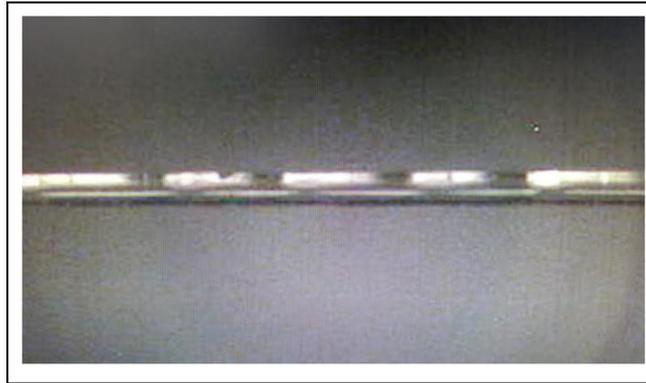


Figura 3. 13. Fotografía de una fibra óptica con una LPG grabada localmente.

La fibra óptica elegida para la realización de este trabajo fue del tipo estándar aplicable a comunicaciones ópticas. A continuación se presentan sus especificaciones:

- Tipo: SM128 (las características de transmisión son acordes con la especificación ITU-T G.657.A1, de la firma Furukawa)
- Atenuación máxima (@ 1550nm): < 0,20 dB/km
- Longitud de onda de corte: <1260 nm
- MFD (@ 1550nm): (10,5 ± 0,8) μ m
- Diámetro de revestimiento: (125 ± 1) μ m
- Concentricidad núcleo/revestimiento: < 0,5 μ m
- Revestimiento no-circularidad: < 1%
- Diámetro del recubrimiento: (245 ± 5) μ m
- Concentricidad revestimiento/recubrimiento: < 12 μ m
- Rango térmico: de -60 °C a +85 °C
- Resistencia a la tracción: 100 kpsi (7030,7 kgf/cm² aprox.)

3.2.2. Proceso aplicado para la formación de un μ -taper

La formación de un μ -taper fue alcanzada mediante la implementación de un proceso que implicó la ejecución de dos sub-procesos fundamentales a saber, la fusión y el estiramiento de la fibra.

- Sub-proceso de fusión: provocado por la elevación de temperatura de la fibra óptica que es consecuencia de la interacción del arco eléctrico con el material constitutivo de la fibra.
- Sub-proceso de estiramiento: provocado por acción de tracción longitudinal realizada sobre la fibra óptica durante el ataque del arco eléctrico.

La empalmadora de fibra permite la ejecución de programas de empalme personalizados. Es decir, presenta la posibilidad de editar los parámetros de los algoritmos de empalme precargados así como también, el armado de programas con rutinas ajustadas a las necesidades del usuario. La ejecución de los dos sub-procesos mencionados se realizó mediante un programa específicamente creado para tal fin explotando la mencionada capacidad de la máquina. Éste comanda tanto a los dos motores asociados al control de la posición axial de la fibra durante un tiempo determinado, como la aplicación en el momento apropiado de un arco eléctrico de potencia y duración específicas. El esfuerzo invertido en la determinación de los parámetros de configuración de este programa personalizado fue centrado en el ajuste fino de la relación temporal entre las acciones de los motores y el arco eléctrico. La acción de tracción ejercida por los motores es provocada por el movimiento de separación de dos estructuras de sujeción de la fibra en la máquina empalmadora.

La secuencia de eventos que se suceden es tal que al inicio del algoritmo, la fibra se encuentra libre en sentido axial y tensionada por medio de la masa m . Esta tensión fue llamada *tensión de referencia* para su identificación. Luego se mueve la fibra axialmente empleando el trasladador T con el objetivo de posicionarla de forma tal que los electrodos queden direccionados al sitio en la que se desea efectuar la marca. Una vez logrado el posicionamiento axial apropiado, se cierran dos mordazas que sujetan y apoyan correctamente a la fibra sobre dos asientos solidarios a sendas bandejas cuya movilidad es gobernada por los motores de la empalmadora. Luego de este evento, la tensión de la fibra queda determinada por el accionamiento de los motores, aumentándola o disminuyéndola respecto de la tensión de referencia dependiendo de si los motores hacen que las mordazas se acerquen o se alejen entre sí. Para generar un ahusamiento en la fibra es necesario que las mordazas se alejen una de la otra. Durante el desplazamiento que implica la separación de las mordazas, se dispara el arco eléctrico relajando el estrés axial del segmento de fibra debido a la fusión del material. Dado que el movimiento de separación continúa, el diámetro de la fibra disminuye en el segmento inmerso en la zona de influencia del arco. Una vez terminados los tiempos de acción tanto de los motores como del arco eléctrico, las mordazas son abiertas liberando a la fibra de la sujeción de éstos pero restituyendo la tensión de referencia debido a la acción de la masa m .

3.3. Respuesta espectral típica de una LPG generada localmente

La adaptación y depuración de la técnica usada para la generación LPGs resultó en la obtención de dispositivos sensores cuyo comportamiento espectral fue el esperado conforme a las consideraciones teóricas. La Figura 3. 14 muestra una captura de pantalla del OSA en la que se observa la respuesta en transmisión de una de las LPGs generadas a partir del empleo del arreglo experimental de la Figura 2. 5. Dentro de la banda de emisión ($\approx 1450 - 1650\text{nm}$) de la fuente luminosa empleada (EXS210066-01) es posible observar un único pico de atenuación (centrado en 1587nm) lo que indica que cierta cantidad de energía del modo fundamental del núcleo fue acoplada al revestimiento generando un modo de propagación (*cladding propagation mode*) en esta región espectral. La LPG cuyo espectro es mostrado en particular fue construida con un período de red (Λ) de $580\mu\text{m}$.

En todos los casos se observó que las redes generadas presentan una extensión longitudinal no mayor a 4cm , en lo que a su descripción geométrica se refiere. En ninguna de las pruebas realizadas fueron necesitadas más de 70 marcas para lograr una buena característica de transmisión óptica.

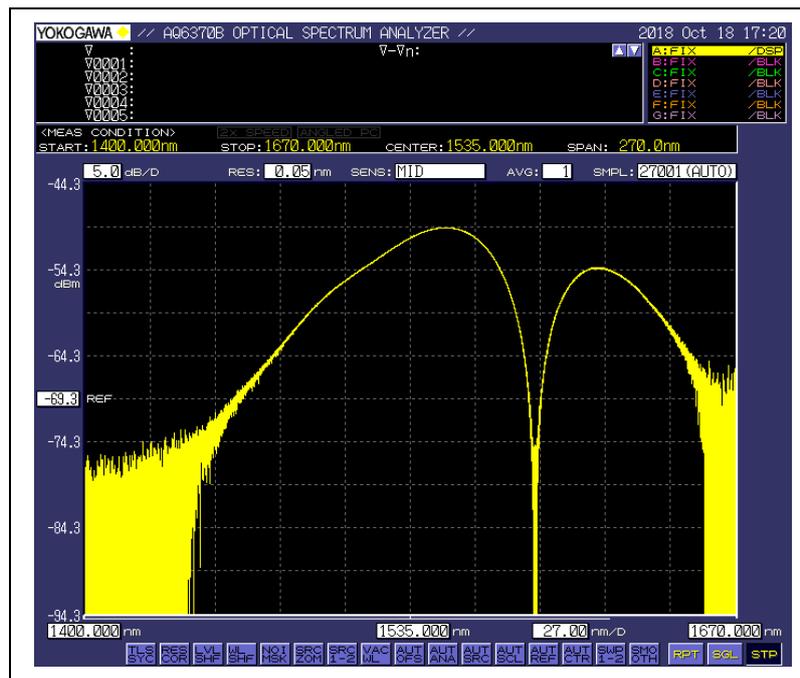


Figura 3. 14. Captura de pantalla del OSA

Como se mostrará posteriormente en este capítulo (ver Sección 3.6), se logró predecir la posición del pico de atenuación más profundo (en el caso de lograr acoplamiento con diferentes modos del *cladding*) en el rango de 1490nm a 1620nm , seleccionando adecuadamente el valor del período de red Λ (entre $500\mu\text{m}$ y $600\mu\text{m}$ aprox.). La profundidad típica de los picos atenuación fue superior a 20dB mientras que su ancho espectral se mantuvo en el rango de 25nm a 30nm (FWHM).

La Figura 3. 15 muestra un gráfico en el que se observa en trazo rojo la característica espectral de la fuente de luz utilizada. Para registrar el espectro se conectó la fuente al instrumento (OSA) en forma directa. La figura también muestra en trazo azul el espectro registrado por el instrumento habiendo sido insertada una fibra óptica con una LPG grabada, entre la fuente y el instrumento.

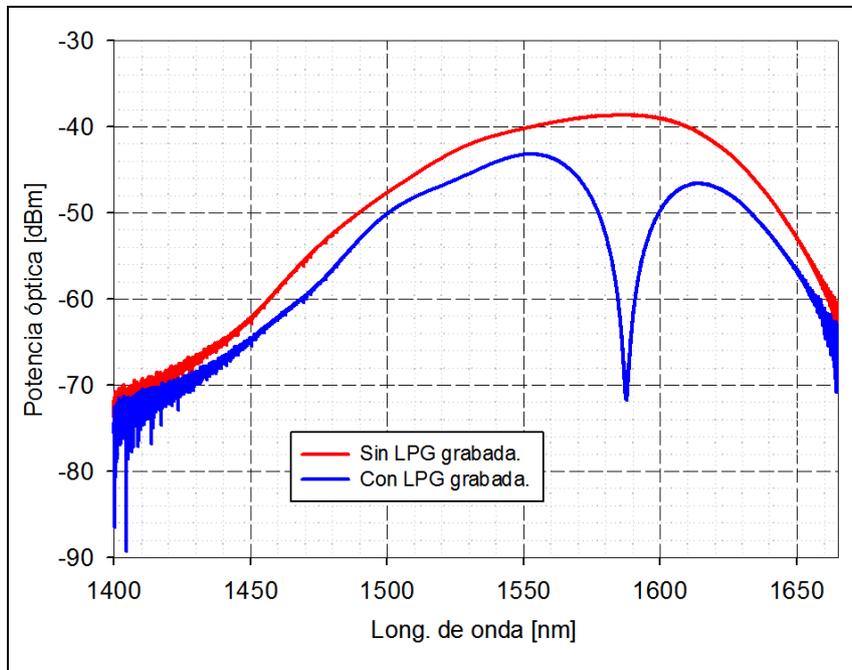


Figura 3. 15. Respuesta a la transmisión de una fibra con y sin LPG grabada.

3.4. Ciclo de crecimiento del pico de atenuación durante la generación de la LPG

La característica de transmisión de una LPG puede ser medida empleando el arreglo experimental mostrado en la Figura 2. 5 (Cap. 2) a medida que se lleva a cabo el proceso de inscripción de la misma sobre la fibra. En la Figura 3. 16 se observa la evolución de la profundidad (ciclo de crecimiento) de un pico de atenuación de una LPG de fabricación local, debido al incremento de la cantidad de marcas que la conforman. Se observa que la eficiencia de acoplamiento modal se incrementa rápidamente al aumentar el número marcas. En el gráfico se muestran distintos trazos correspondientes a la transmisión de una misma LPG de 520 μ m de período para diferente cantidad de marcas realizadas. La longitud de onda correspondiente a la posición espectral del pico de atenuación para la LPG es de 1567,57nm con una atenuación del orden de 30dB luego de efectuar 19 marcas.

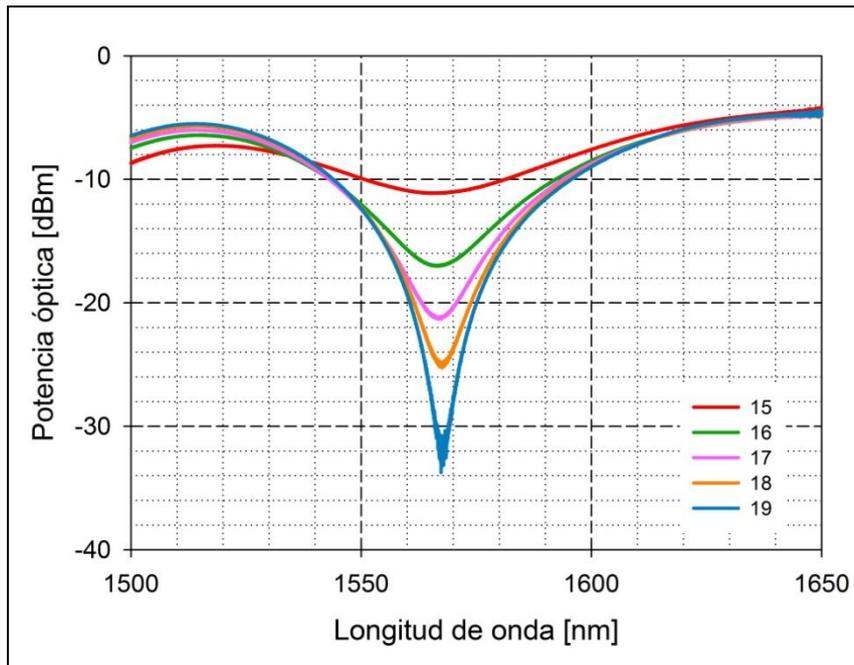


Figura 3. 16. Ciclo de crecimiento del pico de atenuación durante la fabricación de una LPG.

En el cuadrante inferior derecho de la zona gráfica de la figura se muestra la asignación de colores de los trazos asociados a los espectros obtenidos al incrementar la cantidad de marcas (por ejemplo, el trazo rojo es el correspondiente al espectro de la LPG cuando estaba formada por 15 marcas).

3.5. Sintonización de la ubicación del pico de atenuación en función del período de la red

La expresión (2.3) (Cap. 2) muestra la dependencia existente entre la posición espectral del pico de atenuación y el período de red de una LPG conforme a lo establecido por el modelo teórico. Durante la Fase 1 experimental del Plan de Tesis (generación de LPGs) se realizaron ensayos que comprobaron esta dependencia. La Figura 3. 17 muestra una familia de curvas en donde cada una de ellas corresponde a la característica de transmisión asociada a una LPG de un período de red específico. Es decir, el parámetro de la familia de curvas es el período de red.

En la figura se observa cómo cambia la posición espectral del pico de atenuación asociado al modo más prominente acoplado al revestimiento de la fibra, al variar el período de red Λ de una serie de LPGs generadas localmente. En el cuadrante inferior izquierdo del área gráfica de la figura se listan los distintos períodos de cada LPG ensayada, asociando un color diferente a cada trazo con fines de identificación.

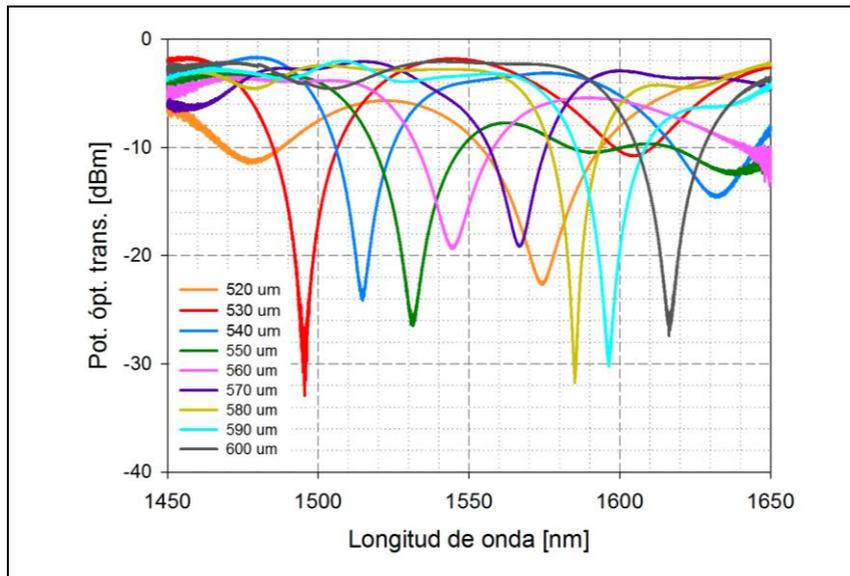


Figura 3. 17. Características de transmisión de un conjunto de LPGs de diferente período de la red.

El control y dominio de la posición espectral del *dip* de atenuación brindó la posibilidad de generar LPGs con *dips* ubicados en la zona central de la banda de emisión del SLD empleado en el arreglo experimental. Esto fue determinante para minimizar el impacto en la detección de luz debido a la degradación de la relación señal a ruido que se verifica en las zonas laterales de la banda de emisión (cuanto menos intensidad de luz hay en una dada banda, más cercana es la potencia lumínica a detectar respecto de la potencia de ruido).

3.6. Modelo de predicción de la posición del pico de atenuación

Las distintas pruebas realizadas arrojaron datos experimentales que permitieron generar un modelo de predicción de la posición del pico de atenuación (λ) en función del período de red (Λ). La Figura 3. 18 muestra la dependencia mencionada. Se observa una aparente dependencia lineal entre el período de la red y la posición del *dip*. En la misma figura se grafica la recta de ajuste mostrada en trazo continuo.

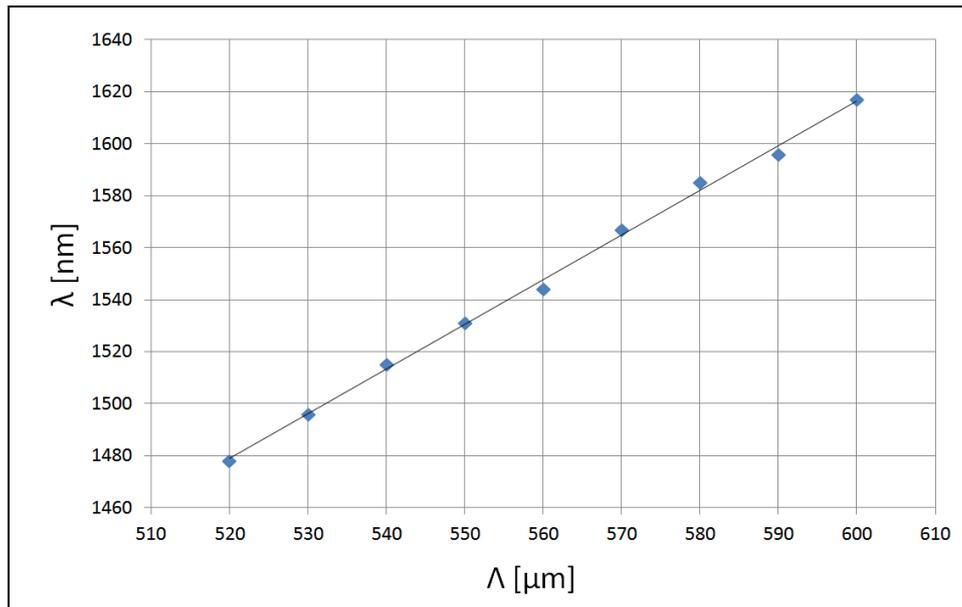


Figura 3. 18. Posición del pico de atenuación (λ) vs. período de red (Λ).

El modelo de predicción surge de la ecuación de la recta de ajuste indicada en la expresión (3.1):

$$\lambda[\Lambda] = 1,72 \frac{\text{nm}}{\mu\text{m}} \Lambda + 584,47\text{nm} \quad (3.1)$$

... con λ medida en nm. Este modelo aplica si y solo si son cumplidas las mismas condiciones experimentales durante el proceso de grabado en cada una de las LPGs, y son las que determinan los valores de los coeficientes numéricos de la expresión anterior. Dichas condiciones son:

- Seteos de generación de las marcas: intervalo de tiempo de la acción del arco eléctrico, intervalo de tiempo de la acción de los motores, momento de inicio y finalización de acción del arco eléctrico, intensidad de arco eléctrico, velocidad con la que se separan las mordazas durante el proceso de generación de la marca.
- Carga ambiental del laboratorio: temperatura y humedad relativa.
- Tensión de referencia: masa asociada al arreglo que define el montaje mecánico y la sujeción de la fibra.
- Tipo de fibra óptica empleada.

3.7. Variabilidad del proceso de fabricación

Luego del período de tiempo dispuesto para estudiar el fenómeno de grabado de cada marca y formación de una LPG en su totalidad mediante la implementación de la técnica de inducción por arco eléctrico, fue analizada la estabilidad del proceso de

fabricación obtenido. Para ello se generaron dos grupos de LPGs, cuyos miembros fueron fabricados en una secuencia continua de realizaciones. A cada conjunto se lo denominó Lote 1 y Lote 2. La diferencia entre lotes radicó en la potencia del arco eléctrico que fue configurada en el programa personalizado que ejecutó la máquina empalmadora para la generación de cada marca de las redes. La **Tabla 3. 1** brinda las características de ambos lotes y la **Tabla 3. 2** exhibe detalles fundamentales de cada LPG que forma parte del conjunto.

Tabla 3. 1. Características generales de los lotes.

Cantidad de LPG en lote 1:	5
Cantidad de LPG en lote 2:	10
Período de red Λ [μm]:	550
Procedimiento:	Diego V01 (Octubre 2018)
Long. de fibra usada [m]:	1,5 (para cada LPG)
PRG usado:	LPG MARCA (PRG 45, almacenado en memoria interna de la empalmadora)

Tabla 3. 2. Resumen de características básicas del conjunto de LPGs producidas.

LPG	Lote	Posición del <i>dip</i> λ [nm] $\Delta\lambda=\pm 0,5\text{nm}$	Cantidad de marcas	Longitud de la red [mm] $\Delta L=\pm 0,05\text{mm}$	Carga ambiental durante la generación		Potencia del arco
					T_{ambiente} [°C] $\Delta T=\pm 0,5\text{C}$	HR_{ambiente} [%] $\Delta HR=\pm 2\%$	
58	1	1574,3	67	36,85	22,2	67	STD-180bits
59	1	1576,2	59	32,45	21,1	67	STD-180bits
60	1	1579,6	67	36,85	22,3	65	STD-180bits
61	1	1584,1	65	35,75	21,5	65	STD-180bits
62	1	1584,2	66	36,3	22,1	68	STD-180bits
63	2	1571,5	40	22	22,0	67	STD-160bits
64	2	1572,3	34	18,7	22,2	63	STD-160bits
65	2	1571,6	33	18,15	21,8	65	STD-160bits
66	2	1573,2	28	15,4	21,7	75	STD-160bits
67	2	1574,4	24	13,2	21,8	71	STD-160bits
68	2	1562,1	30	16,5	24,0	68	STD-160bits
69	2	1562,4	27	14,85	21,3	66	STD-160bits
70	2	1569,1	30	16,5	20,9	66	STD-160bits
71	2	1559,8	28	15,4	21,0	69	STD-160bits
72	2	1567,6	28	15,4	21,8	68	STD-160bits

Durante la ejecución de las distintas realizaciones de cada lote se registraron las magnitudes de carga ambiental del laboratorio con el objetivo de establecer el rango de temperatura y HR que condicionaron el contexto del estudio estadístico.

Las posiciones espectrales de los picos de atenuación medidos fueron determinados estando las LPG sometidas a igual tensión de tracción. Tanto la temperatura como la humedad relativa ambiente no fueron magnitudes controladas (si monitoreadas, tal como la acusa la Tabla 3. 2).

Los descriptores estadísticos básicos hallados para cada lote son los mostrados en la Tabla 3. 3.

Puede observarse que la variación de la posición del pico de atenuación del modo acoplado al revestimiento bajo seguimiento se encuentra acotada a un rango espectral que, teniendo en cuenta las restricciones de las facilidades disponibles, es aceptable desde el punto de vista estadístico. Es decir, el proceso de fabricación fue considerado altamente estable en función de las dispersiones mostradas en la Tabla 3. 3.

Tabla 3. 3. Descriptores estadísticos.

Lote 1	$\lambda_{\text{medio}} = 1579,4\text{nm}$
	$\sigma_{\lambda} = 4,6\text{nm}$
Lote 2	$\lambda_{\text{medio}} = 1568,0\text{nm}$
	$\sigma_{\lambda} = 5,3\text{nm}$

3.8. Características típicas de las LPGs generadas localmente

Cada LPG generada fue caracterizada espectralmente utilizando el mismo arreglo experimental. La Tabla 3. 4 muestra las características generales de un espécimen típico, y la Tabla 3. 5 resume las condiciones de carga ambiental imperantes durante el proceso de medición que permitió la caracterización óptica de cada espécimen.

Tabla 3. 4. Características básicas de una LPG generada localmente (espécimen típico).

Longitud de red media	$(17,050 \pm 0,001) \text{ mm}$
Período de red medio	$(550 \pm 1) \mu\text{m}$
Posición espectral media del <i>dip</i> más profundo	1571 nm
Atenuación (en la position del <i>dip</i>)	> 20 dB
Ancho de banda	entre 20 nm y 30 nm
Pérdidas de inserción	< 3,4 dB @ 1550 nm

Tabla 3. 5. Condiciones ambientales.

Temperatura	[21,0 ± 0,1] °C
Masa de tracción (tensión de referencia)	[14,31 ± 0,01] g
Medio que rodea la LPG	aire
Humedad relativa	[67 ± 3]%

3.9. Determinación de sensibilidades

En esta sección se describen los procedimientos experimentales efectuados para determinar las sensibilidades de las LPG generadas localmente a las magnitudes a las cuales éstas son susceptibles (Sección 2.6.4.3) conforme al modelo teórico. Las determinaciones numéricas asociadas a los valores de sensibilidad fueron obtenidas de ensayos realizados sobre tres especímenes diferentes (un espécimen para cada ensayo realizado). Se las ha considerado sensibilidades típicas debido a que se determinó en la sección previa que el proceso de generación de LPGs presentó dispersiones bajas en lo que respecta al desempeño óptico de los elementos fabricados.

Para evaluar y juzgar la bondad de los ajustes realizados sobre los puntos experimentales obtenidos, se utilizó el cálculo del parámetro R.

3.9.1. Sensibilidad a cambios del índice de refracción del medio circundante (n_{mrf})

3.9.1.1. Arreglo experimental implementado

El arreglo experimental diseñado para la medición de la sensibilidad al cambio del índice de refracción del medio que rodea a la fibra n_{mrf} se esquematiza en la Figura 3. 19 (arriba). Las flechas amarillas indican la dirección en la que se propaga la luz en el circuito óptico. Tanto la fuente como el instrumento de medición fueron los mismos que los empleados para la conformación del arreglo experimental destinado a la generación de LPGs. Se muestra en la Figura 3. 19 (abajo) el arreglo físico real que dio soporte al experimento.

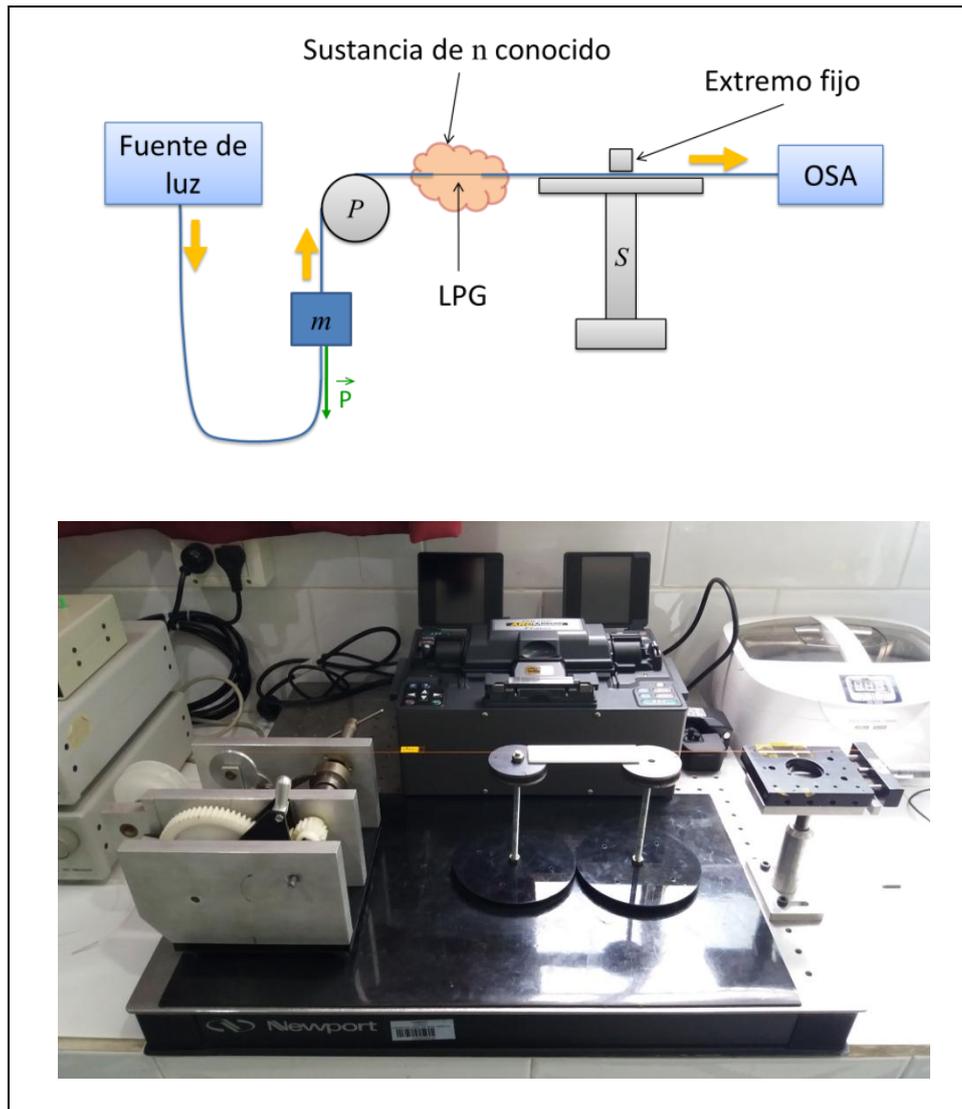


Figura 3. 19. Esquema del arreglo experimental implementado para el ensayo de sensibilidad al cambio de n_{mrf} (arriba); arreglo físico (abajo).

El ensayo consistió en registrar los cambios en el espectro de transmisión de una LPG al cambiar el material que constituye el medio que rodea a la fibra óptica. El efecto buscado fue el de generar cambios en el índice de refracción del entorno de la zona sensible de la LPG. Las mediciones fueron realizadas mediante el empleo de un OSA

Para ello, se embebió la zona sensible con una serie de sustancias líquidas de índices de refracción conocidos listados a continuación.

- Acetonitrilo (ACN o C_2H_3N): $n = 1,3460$
- Alcohol isopropílico (IPA o C_3H_8O): $n = 1,3776$
- Alcohol etílico (EtOH o C_2H_5OH): $n = 1,3610$
- Heptano (C_7H_{16}): $n = 1,3855$

- Tetrahidrofurano (THF o C_4H_8O): $n = 1,4070$
- Alcohol metílico (MeOH o CH_3OH): $n = 1,3292$
- Agua (H_2O): $n = 1,3330$
- Dietilamina ($C_4H_{11}N$): $n = 1,3864$

Dichos valores fueron relevados de tablas evaluadas en la línea D del sodio (@ 589,3nm). El proceso de cambio del índice del medio que rodeó a la fibra fue simplemente basado en embeber al fragmento de fibra en la que se encontró grabada la LPG en el líquido de n conocido tal como muestra la Figura 3. 20. Cabe recordar que la región de fibra óptica en la que se encuentra inscripta la LPG, está desprovista del recubrimiento de acrilato o polímero protector de la fibra, por lo cual las sustancias utilizadas quedaron en contacto directo con el revestimiento (o *cladding*) de la misma.

En el ensayo realizado las cintas de sujeción (color ámbar en la figura) fueron removidas manteniendo el soporte de acrílico blanco a 1 mm aproximadamente de la fibra óptica. Esto fue realizado así para que la placa de acrílico oficie de superficie de apoyo a la gota de líquido en la que la LPG fue embebida sin tocar físicamente a la fibra óptica.



Figura 3. 20. LPG embebida en un líquido de índice de refracción conocido.

La fibra óptica fue suspendida horizontalmente sujeta en dos puntos. Con el objeto de mantener la tensión de la fibra óptica invariante entre las mediciones realizadas, se implementó un mecanismo de polea/masa (denotadas como m y P en la Figura 3. 19). La masa utilizada fue de 14,31g valor determinado mediante el uso de una balanza de laboratorio de la firma Sartorius. El otro extremo de la red se fijó a un soporte tipo pedestal (denotado como S) solidario a una mesa óptica de alta estabilidad mecánica. Mediante este artilugio se garantizó que el pico de atenuación del espectro de transmisión no sufra cambios en su posición debido a variaciones del strain mecánico sobre la red.

Las observaciones espectrales registradas sobre la transmisión de la LPG fueron realizadas monitoreando permanentemente posibles cambios de temperatura que

pudiesen alterar la respuesta de la misma, y eventualmente desafectar el corrimiento del *dip* de atenuación debido a este efecto. No fueron registrados cambios relevantes (mayores a 0,1°C) de temperatura que ocasionasen una influencia en la respuesta de la LPG comparable a la generada por el cambio de índice de refracción del medio circundante a la fibra.

3.9.1.2. Resultados

Las experiencias realizadas brindaron datos experimentales que permitieron generar un modelo de predicción de la posición del pico de atenuación en función del índice de refracción del medio que rodea a la fibra óptica. La Figura 3. 21 muestra la dependencia mencionada. En trazo continuo negro se muestra la función de ajuste que permitió generar el modelo de predicción.

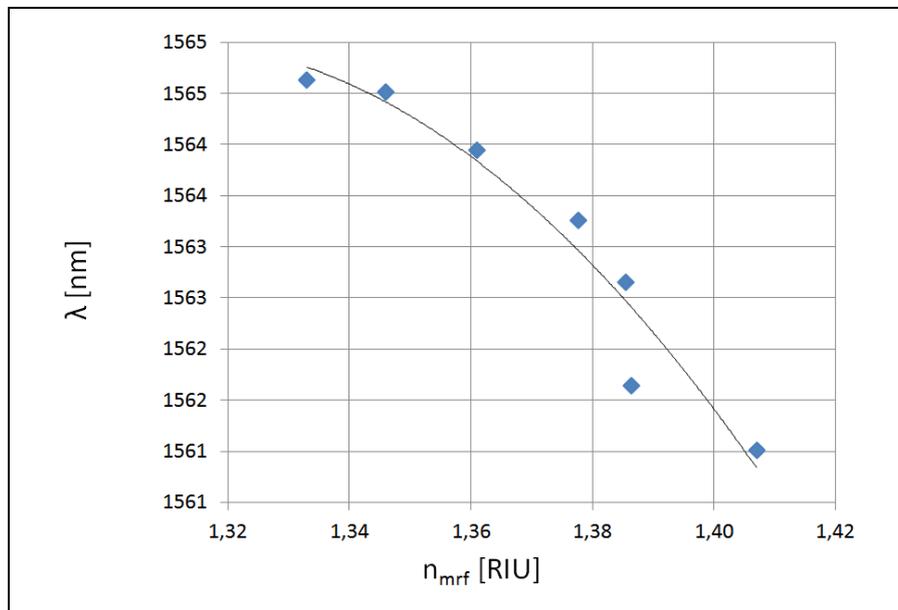


Figura 3. 21. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. índice de refracción del medio que rodea a la fibra (n_{mrf}).

La expresión (3.2) representa la función de ajuste utilizada, siendo el coeficiente de ajuste R^2 igual a 0,9342.

$$\lambda[n_{mrf}] = -436,41 \frac{nm}{RIU^2} n_{mrf}^2 + 1142,9 \frac{nm}{RIU} n_{mrf} + 816,78nm \quad (3.2)$$

3.9.2. Sensibilidad a cambios de la temperatura (T)

3.9.2.1. Arreglo experimental implementado

El arreglo experimental para la medición de la sensibilidad a la temperatura se esquematiza en la Figura 3. 22 (arriba). Se observan dos puntos de sujeción fijos entre los cuales fue posicionada la LPG. El montaje fue colocado dentro de una cámara de vidrio con el objetivo de aislarlo de posibles perturbaciones debidas a la existencia de corrientes de aire dado que éstas pueden influir térmicamente sobre la LPG.

La forma de generar el barrido térmico fue mediante el uso de una fuente lumínica de radiación infrarroja (IR) situada fuera de la cámara de aislamiento y a una determinada distancia respecto de ella. Variando tal distancia y el ángulo de incidencia de las emisiones IR provenientes de la fuente respecto del plano de la pared de la cámara, se lograron distintos puntos de estabilización térmica de la LPG situada dentro de la misma. Para cada punto de estabilización térmica se registraron la respuesta espectral de la LPG para su posterior análisis y la correspondiente temperatura.

Las flechas amarillas indican la dirección de propagación de la luz inyectada al circuito óptico por el bloque llamado “fuente de luz”. Ésta última y el instrumento de medición espectral fueron los mismos empleados en el arreglo de generación de LPGs.

La Figura 3. 22 (abajo) muestra parte del arreglo experimental real emplazado en el laboratorio en concordancia con el diagrama esquematizado.

La medición de la temperatura de la LPG fue implementada mediante el uso de un conjunto termopar tipo K y multímetro modelo Meterman 23XT de la firma Wavetek, lo que permitió medir temperaturas con una incerteza menor a $2,042^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = \pm [1\% \text{ de la } T_{\text{medida}} + 2^{\circ}\text{C}]$) conforme a lo declarado en las especificaciones publicadas por el fabricante del instrumento. Debido a que se ubicó el termopar en una región muy próxima a la LPG, se consideró que la temperatura medida por el instrumento se mantuvo similar a la del medio ambiente que la rodea. Entre las mediciones realizadas se esperó lo suficiente para que el sistema estabilizara en el tiempo. En estas condiciones se consideró que el ambiente y la LPG se encontraban en equilibrio térmico.

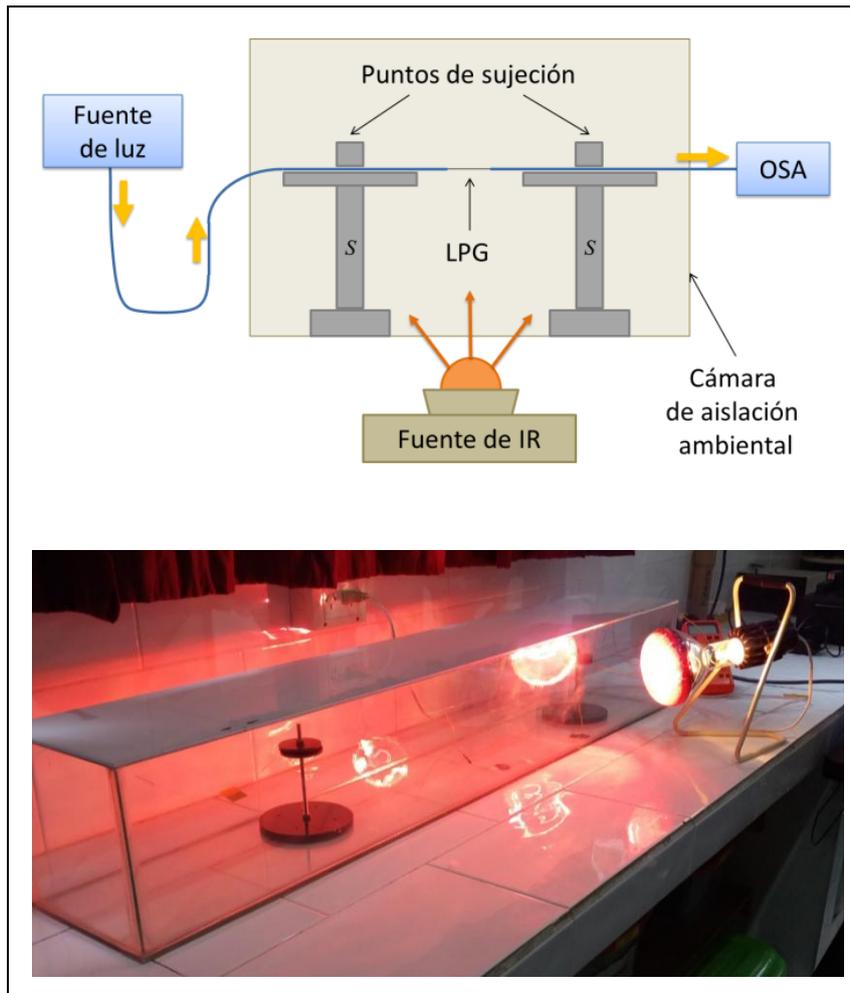


Figura 3. 22. Esquema del arreglo experimental montado para el ensayo de sensibilidad al cambio de T (arriba); cámara de aislamiento con la fuente de radiación IR (abajo).

3.9.2.2. Resultados

La Figura 3. 23 muestra un gráfico con la familia de curvas cuyo parámetro es la temperatura. Cada curva es la transmisión óptica de la LPG bajo ensayo para una temperatura específica. En el lado derecho del área gráfica de la figura se muestra la asignación de colores de las curvas para cada temperatura. Se aprecia cómo es el desplazamiento del pico de atenuación ante la variación de la temperatura del medio en el que se encontró inmersa la fibra óptica. En esta gráfica se presenta la información experimental en una ventana espectral reducida con el objetivo de apreciar el corrimiento del pico.

La medición de cada espectro de la figura fue realizada luego de esperar el tiempo suficiente para garantizar el equilibrio térmico entre la LPG y el medio circundante.

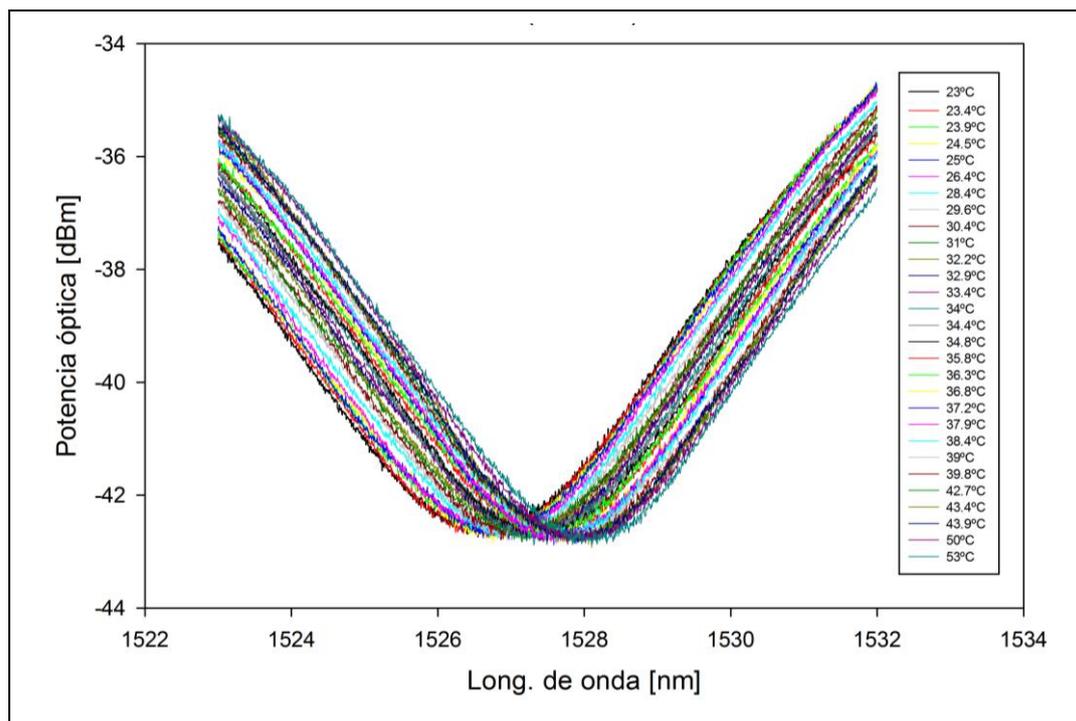


Figura 3. 23. Variación de la posición espectral del pico de atenuación debido a la variación de la temperatura.

Los datos experimentales relevados permitieron generar un modelo de predicción de la posición del pico de atenuación en función de la temperatura del entorno cercano a la zona de la fibra en la que se grabó la LPG. La Figura 3. 24 muestra la dependencia mencionada. En trazo continuo negro se muestra una función de ajuste del modelo de predicción.

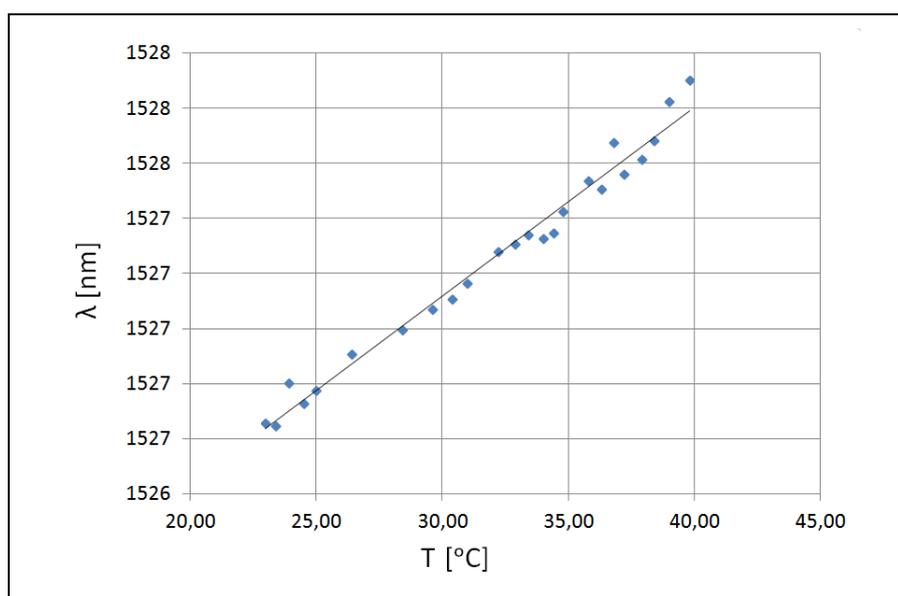


Figura 3. 24. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. temperatura (T).

La expresión (3.3) representa la función de ajuste utilizada, siendo el coeficiente R^2 igual a 0,9809.

$$\lambda[T] = 0,0687 \frac{nm}{^\circ C} T + 1525,1nm \quad (3.3)$$

3.9.3. Sensibilidad a cambios de *strain* (ϵ)

3.9.3.1. Arreglo experimental implementado

La Figura 3. 25 (arriba) esquematiza el arreglo experimental utilizado para la medición de la sensibilidad al *strain*. En la figura se observa a la LPG montada entre dos puntos de sujeción, uno de los cuales es fijo (el izquierdo) mientras que el otro es móvil (el derecho). La movilidad de éste fue lograda mediante el uso de un trasladador lineal micrométrico (denotado como T), cuya resolución fue de $1\mu m$. Nuevamente mediante flechas amarillas se indica la dirección de propagación de la luz inyectada al circuito óptico por el bloque “Fuente de luz”. Tanto el pedestal S del extremo fijo como el del extremo móvil fueron solidarizados a una mesa óptica (de la firma NewPort) de alta estabilidad mecánica. La Figura 3. 25 (abajo) muestra como luce el arreglo experimental real.

El esfuerzo longitudinal fue generado mediante el estiramiento de la fibra que contiene la LPG grabada, para lo cual se realizó una tracción axial desplazando el punto de sujeción solidario al trasladador lineal.

Inicialmente los puntos de sujeción fueron situados a una distancia conocida y establecida como “longitud de referencia” de $(227,8 \pm 0,1)$ mm. Luego de determinada esta distancia se procedió a la ejecución de la secuencia de desplazamientos.

Cada incremento de longitud inducido por el movimiento del punto de sujeción móvil fue de $10\mu m$. Luego, el *strain* longitudinal fue calculado mediante el uso de la expresión (3.4).

$$\epsilon = \frac{(x-x_{ref})}{x_{ref}} \quad (3.4)$$

...donde ϵ es el *strain*, x_{ref} es la distancia entre puntos de sujeción estando la fibra axialmente relajada (es decir, en el estado en el que se la consideró “no tensionada” o en reposo), y x es el valor corriente o actual de la distancia entre tales puntos de sujeción luego de ser aplicado un esfuerzo axial (de tracción en este caso). La expresión (3.4) es basada en la aplicación de un modelo en el que se consideras que el esfuerzo

mecánico (producido por el estiramiento) es uniforme en todos puntos de la fibra comprendidos entre los dos puntos de sujeción.

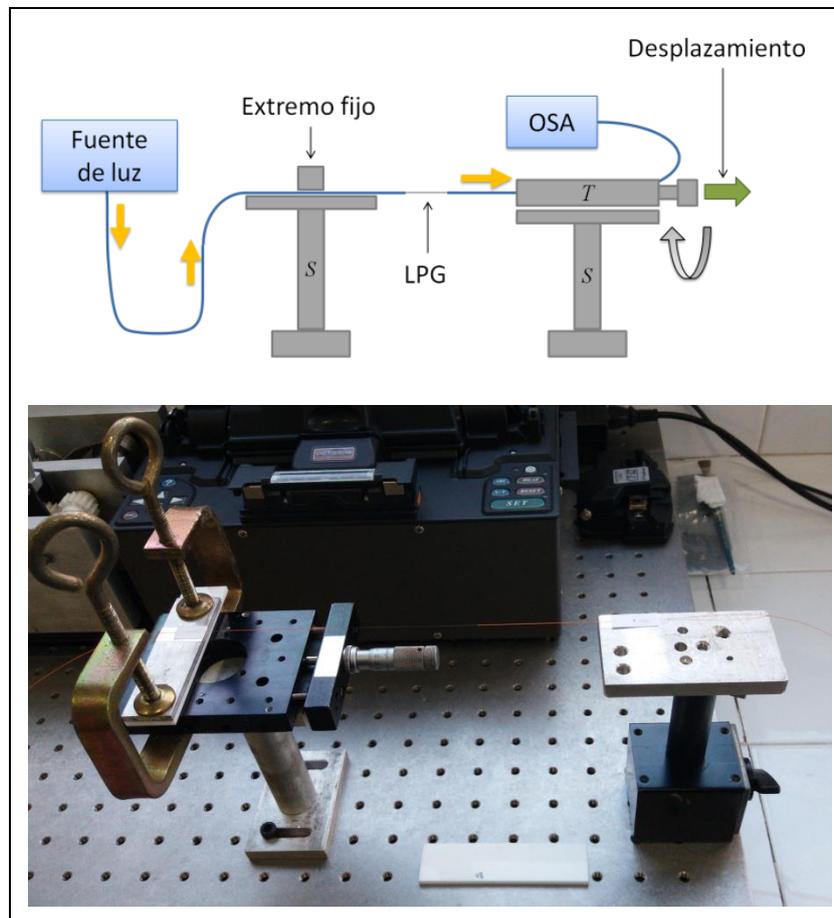


Figura 3. 25. Esquema del arreglo experimental montado para el ensayo de la sensibilidad al cambio de ϵ (arriba); montaje físico (abajo).

La fibra con la LPG empleada en este ensayo fue sometida a un *strain* máximo de aproximadamente $1100\mu\epsilon$ con el objeto de no generar daños o deformaciones permanentes en la misma. El *strain* máximo típico para fibras ópticas del tipo SM como la usada en este trabajo experimental suele estar en el rango del 1 al 2%. Lo cual implica que la fibra puede estirarse hasta un 1% o 2% de su longitud original antes de alcanzar su límite de deformación plástica (lo cual representa un *strain* comprendido aproximadamente entre $10000\mu\epsilon$ y $20000\mu\epsilon$).

3.9.3.2. Resultados

Las experiencias realizadas arrojaron datos experimentales que permitieron generar un modelo de predicción de la posición del pico de atenuación en función del *strain* impuesto a la fibra óptica durante el ensayo. La Figura 3. 26 muestra la

dependencia mencionada. En trazo continuo negro se muestra una función de ajuste que permite generar un modelo de predicción.

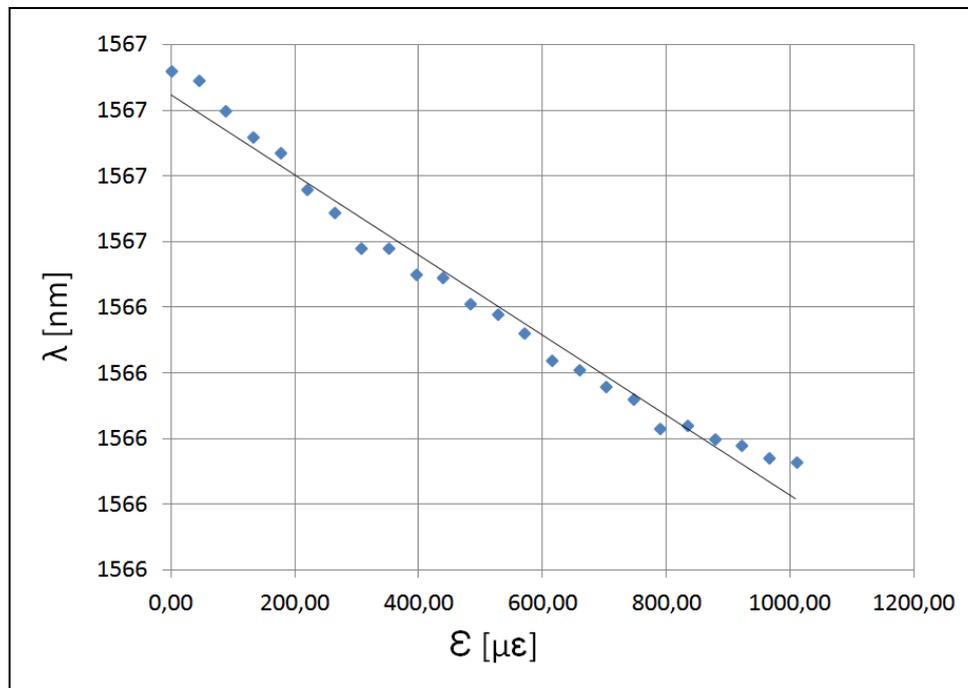


Figura 3. 26. Posición espectral del pico de atenuación (λ) vs. *strain* (ϵ).

La expresión (3.5) representa la función de ajuste hallada, siendo el coeficiente R^2 igual a 0,9787.

$$\lambda[\epsilon] = -0,0012 \frac{nm}{\mu\epsilon} \epsilon + 1567,1nm \quad (3.5)$$

3.10. Referencias

[1] *Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application*. James, Stephen W. and Tatam, Ralph P. 5, 2003, Measurement Science and Technology, Vol. 14, pp. R49 - R61.

[2] http://www.o-eland.com/FBG%20Inventory/LongPeriodGrating_summer_sale.php

[3] *Long Period Fiber Gratings Incribed by Periodically Tapering a Fiber*. Guolu Yin at al. 7, 2014, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS , Vol. 26.

[4] Mendes do Rego, Gaspar. *Arc-Induced Long-Period Fibre Gratings. Fabrication and Their Applications in Optical Communications and Sensing*. 2006.

[5] *Mechanically-Induced Long-Period Fiber Gratings Using Laminated Plates*. Ismael Torres-Gómez, Daniel E. Ceballos-Herrera, Karla M. Sala-Alcantara, *Sensors* 2020, 20, 2582; doi:10.3390/s20092582.

[6] *Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser*. Wang, Y. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(8), 081101. doi:10.1063/1.3493111.

[7] *Step-changed period chirped long-period fiber gratings fabricated by CO₂ laser*. Ming Y. et al. 2008, *Optics Communication*, Vol. 281, issue 10, pp. 2784-2788.

[8] *Desarrollo de redes de período largo en fibras ópticas por métodos mecánicos*. D. Aredes, A. M. Mesa Yandy, N. Russo y R. Duchowicz. 102a Reunión de la Asociación de Física Argentina, 26-29 de septiembre de 2017, La Plata, Buenos Aires, Argentina.

[9] *The Shape of Fiber Tapers*. Timothy A. Birks and Youwei W. Li, 1992, *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, Vol. 10. No. 4.

[10] *Biconical fused taper a universal fibre devices technology*. Jedrzejewski K., 2000, *Opto-Electronics Review*, Vol. 8, No. 2, pp. 153-159.

4. Fase experimental II. Implementación de LPGs para el sensado óptico de humedad

4.1. Introducción

Este capítulo presenta la evaluación general del diseño preliminar de un sensor experimental de HR basado en el uso de una LPG grabada en fibra óptica para ser potencialmente aplicado en mediciones del nivel de humedad interna de estructuras de hormigón. A través de la discusión de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales realizados se demuestra la factibilidad y el concepto de implementación de este tipo de dispositivos de fibra óptica en el marco de la aplicación mencionada.

4.1.1. Motivaciones tecnológicas

La medición del nivel de humedad en el interior de una estructura de hormigón es un tema de gran interés en el ámbito de la Ingeniería Civil. Tanto en el estado fresco del hormigón como en el estado endurecido, el conocimiento de la cantidad de agua brinda información importante al ingeniero.

A modo de ejemplo, durante el curado del hormigón existe una relación entre el fenómeno de contracción por secado y el decrecimiento del nivel de humedad interno de la estructura que éste conforma. Tal decrecimiento puede darse debido a la propia hidratación del cemento o por simple evaporación. La aparición de fisuras inducidas por la contracción puede controlarse mediante la asistencia de un monitoreo del nivel de humedad [1].

Por otro lado, en estado endurecido una estructura de hormigón durante su ciclo de vida interactúa de diferentes maneras con el entorno que la rodea. Además de las interacciones para las que se la diseñó (normalmente de índole mecánica), existen otras interacciones que pueden generar cambios en su desempeño funcional, de seguridad o estético. Como se mencionó previamente, algunos agentes ambientales se consideran nocivos para el hormigón porque pueden provocar daños a la salud de la estructura. La presencia de agua dentro del material sea en fase líquida o gaseosa, desempeña un papel preponderante en los fenómenos tanto de transporte de dichos agentes, como de degradación del hormigón. Si un líquido se encuentra en contacto con la superficie de una estructura en estado endurecido y no saturado, las diferencias de niveles de humedad entre la zona seca (interior) y la mojada (exterior), puede causar el desarrollo de tensiones capilares que provoquen el desplazamiento de líquido hacia el interior de la masa del hormigón por absorción capilar. Debido a que durante la evolución de este proceso pueden arrastrarse agentes químicos de carácter deletéreo, existe un marcado interés sobre este tópico en el campo de la durabilidad en estructuras sometidas a ciclos de mojado y secado [2]. Por ello, el conocimiento del nivel de humedad interna en ubicaciones estratégicas de una estructura es un elemento de juicio de gran importancia para los ingenieros civiles al momento de tomar decisiones relacionadas con el mantenimiento de las mismas. El monitoreo del nivel de humedad interna brinda información que facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, pudiéndose así evitar altos niveles de inversión económica en intervenciones de ingeniería orientadas a reparaciones y/o puesta en valor.

La superficie de una estructura interacciona con el aire humedecido de su entorno. Éste último se difunde dentro de la matriz del hormigón debido a un gradiente de concentración de moléculas de agua contenidas en el aire del ambiente que rodea la estructura y el interior mismo del material. La morfología de los poros y la calidad de los canales que inherentemente existen en el hormigón pueden facilitar la entrada de aire humedecido. La Figura 4. 1 representa esquemáticamente esta situación. Así, contar con sensores capaces de ser embebidos en la estructura de hormigón para monitorear la humedad relativa interna (HR) representa un recurso tecnológico de gran valor y su definición formal puede hallarse en variadas referencias bibliográficas [1] [3].

Más allá de lo antedicho en lo referido a la diversidad de métodos para la determinación del contenido de agua dentro de la estructura de hormigón, no existen a la fecha de redacción de este manuscrito normas aplicables al empleo de técnicas ópticas que implementen OFS en específico.

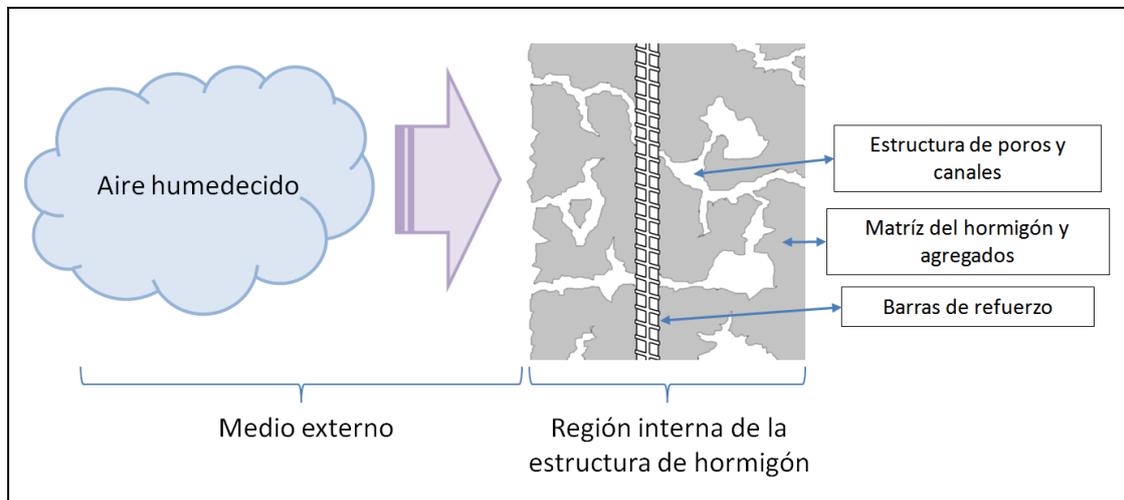


Figura 4. 1. La existencia de capilares y poros en el seno del hormigón propician el ingreso de aire humedecido.

4.1.2. Definiciones fundamentales relativas a HR

El concepto asociado al nivel de humedad de un determinado volumen de aire bajo estudio, se encuentra relacionado con la cantidad de agua contenida en éste. La humedad es una propiedad que describe la cantidad de agua en fase gaseosa presente en la mezcla de los gases que componen el aire de un volumen. El término vapor se usa en psicrometría para referir al agua en estado gaseoso en condiciones muy cercanas a las de saturación. La psicrometría es la rama de la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire humedecido y del efecto de éste sobre los materiales y el confort humano.

El nivel de humedad de un determinado volumen puede expresarse mediante el uso de diferentes magnitudes y parámetros. Algunas reflejan el nivel de humedad en forma absoluta, mientras que otras son dependientes de la temperatura o la presión. Normalmente es la aplicación en sí misma la que condiciona cuál magnitud es más apropiada para expresar el nivel de humedad.

El agua en estado gaseoso contenida en un volumen dentro del cual convive con otros gases, ejerce una presión que contribuye a la presión del conjunto sobre la superficie interior del recipiente que los contiene. Esta presión parcial es llamada “presión de vapor” y es independiente de la presión de los otros gases.

Se conoce como presión de saturación (P_s) a la presión parcial de vapor asociada a la máxima cantidad de vapor que el aire puede incorporar a una dada temperatura. Ver expresión (4.1).

$$P_s = 6,11 \text{ mb} \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \text{ }^\circ\text{C}}{237,3 \text{ }^\circ\text{C} + T_h}\right)} \quad (4.1)$$

... en donde T_h es la temperatura de termómetro húmedo.

La presión real (P_r) es la presión ejercida sobre una dada superficie por las moléculas de agua en fase gaseosa. Es independiente de la existencia de otros gases. Ver expresión (4.2).

$$P_r = P_s - \vartheta \cdot (T_s - T_h) \quad (4.2)$$

... tal que T_s es la temperatura de termómetro seco y ϑ es el coeficiente psicrométrico (0,57 mb/°C).

Finalmente la humedad relativa (HR) es el cociente entre P_r y P_s evaluadas a la temperatura de termómetro seco como se expresa en la expresión (4.3).

$$HR = \frac{P_r}{P_s} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Conceptualmente la HR es una magnitud que expresa la cantidad porcentual de humedad en una muestra determinada de aire con respecto a la cantidad de humedad que el aire tendría si estuviese totalmente saturado y en iguales condiciones de temperatura que la muestra.

Por último, el punto de rocío (T_{pr}) se define como la temperatura debajo de la cual el vapor de agua en el aire comienza a condensarse (HR igual a 100%).

4.1.3. Implementación de una LPG como sensor de humedad

Existen dos principios físicos que potencialmente pueden ser usados para la utilización de una LPG como sensor de HR. Como previamente fue mencionado, las posiciones espectrales de los picos de atenuación asociados a la característica de transmisión dependen del índice de refracción del medio que rodea a la fibra, de la temperatura, y de la deformación axial de la fibra óptica en la que está inscrita la LPG.

Tanto la primera como la tercera de estas dependencias son explotables desde el punto de vista tecnológico con el objetivo de implementar un sensor de HR.

La dependencia vinculada al índice de refracción del medio que rodea a la fibra permite la potencial implementación de un efecto de sensado por el cual la variación del contenido de moléculas de agua del entorno (y por consiguiente, la variación del índice de refracción del mismo) induciría un corrimiento de la ubicación espectral del pico de atenuación de la LPG.

El concepto de este efecto es esquematizado en la Figura 4. 2. Cabe aclarar que la tendencia del corrimiento mostrada en la figura en donde $\lambda'_m < \lambda''_m < \lambda'''_m$, es presentada sólo a efectos de ejemplificar el efecto involucrado, pudiendo no necesariamente brindarse como tal (es decir, la tendencia del corrimiento puede darse en sentido contrario en un caso práctico real de tal modo que $\lambda'_m > \lambda''_m > \lambda'''_m$).

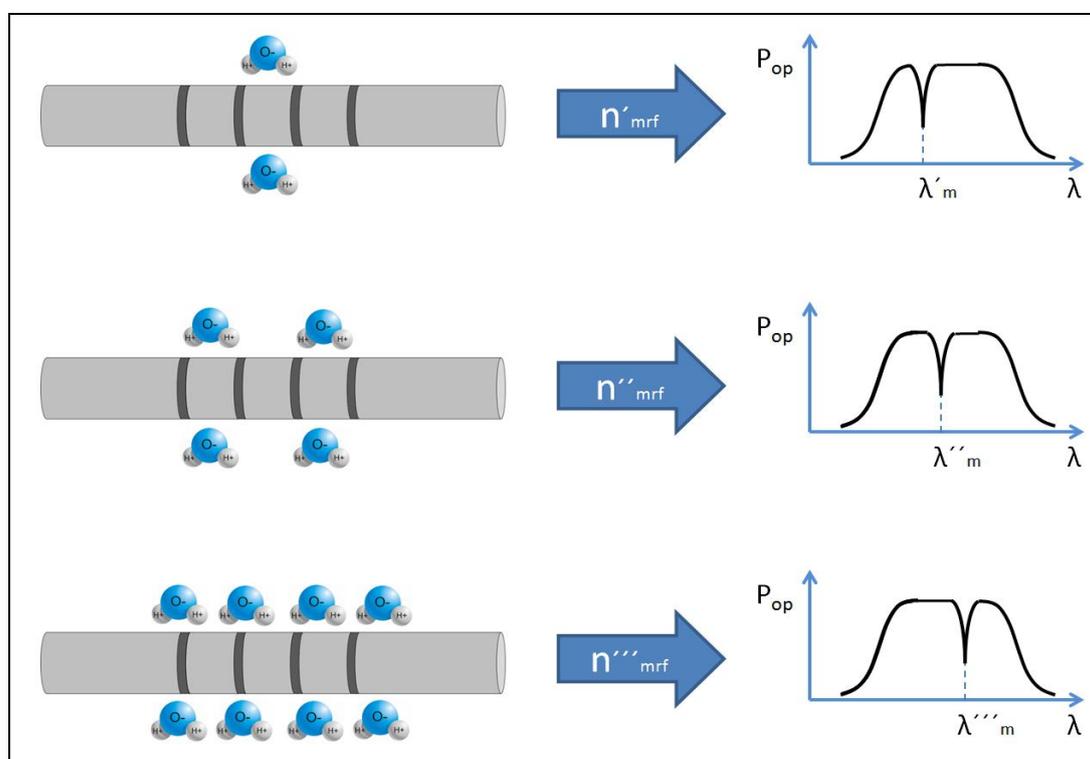


Figura 4. 2. Efecto del cambio del contenido de agua en el medio que rodea la fibra sobre la posición espectral del pico de atenuación presente en la característica de transmisión de una LPG.

Por otro lado, la dependencia de la posición espectral del pico de atenuación con la deformación axial de la fibra óptica en la zona en la que la LPG esté inscrita también habilita un camino de explotación tecnológica para la implementación de un sensor de HR. Por ejemplo, el uso de un elemento que (adherido a la fibra) experimente un aumento de su volumen ante la absorción de agua, induciría un esfuerzo de corte sobre la superficie de la fibra que se traduciría en una acción de tracción longitudinal (o sea una deformación axial).

Finalmente, en lo que a implementación física de un sensor de HR se refiere, existe un tercer camino que consiste en el empleo de la combinación de ambos efectos en virtud de lograr un potenciamiento de la sensibilidad de la LPG como sensor ante variaciones del nivel de humedad en su entorno. Para ello, los aportes al corrimiento espectral del pico de atenuación debido a ambos efectos deben ser de modo tal que colaboren en su tendencia ante variaciones monótonas de la HR [4] [5] [6], es decir que ambos aportes induzcan corrimientos en igual sentido.

4.2. Mejora de la sensibilidad a cambios de la HR

Si bien el corrimiento del pico de atenuación de la característica de transmisión de toda LPG es dependiente del índice de refracción del medio que rodea a la fibra óptica en la cual está inscrita, en los estudios experimentales realizados se comprobó que la respuesta óptica ante cambios de HR en el ambiente gaseoso circundante no fue suficientemente intensa como para ser adecuadamente detectada con el instrumental disponible.

En pruebas realizadas, se verificó experimentalmente que el corrimiento del pico de atenuación fue imperceptible por el instrumento de medición utilizado a causa de sus incertezas, cuando se sometió a una LPG típica a un barrido en HR en el intervalo de 40% a 80% aproximadamente (estando la LPG estabilizada en tensión y temperatura). Es decir, que el cambio en la posición espectral de la longitud de onda del pico fue inferior al límite de detección que consta en las especificaciones del mejor de los instrumentos disponibles en el Laboratorio de Fibras Ópticas del CIOP (interrogador óptico MicronOptics SM125) en lo que a precisión se refiere.

Estas observaciones son válidas para el único *dip* (del espécimen bajo ensayo) cuya evolución fue monitoreada en las condiciones de ensayo mencionadas. Debido a que otros picos de atenuación asociados a otros modos de propagación por el revestimiento no fueron visualizados dentro de la banda de emisión espectral de la fuente de iluminación utilizada, este estudio no garantiza que la respuesta a la variación de HR de otros *dips* del mismo espécimen ensayado sea la misma que la verificada para el *dip* monitoreado. Claramente y a causa de la restricción que el emisor usado impone en lo que a banda de observación se refiere, no fue posible monitorear el comportamiento de alguno de los otros *dips* mencionados. Sin embargo, cabe resaltar que el *dip* analizado fue aquel cuyas características espectrales resultaron las más apropiadas dentro de la banda de iluminación usada. Además, si bien esta observación fue hecha sobre una LPG en particular, es válida para cualquier otro espécimen del lote del cual se extrajo debido a que se verificó que el comportamiento óptico de cada una de las LPGs fabricadas fue similar desde el punto de vista estadístico, como se mencionó en el Cap. 3 de esta Tesis Doctoral.

La baja sensibilidad observada de la respuesta espectral de la LPG ante la variación del nivel de HR condiciona en forma directa la factibilidad del uso de este tipo de dispositivo óptico como elemento sensor para la medición de HR.

Ante la situación detectada se determinó realizar modificaciones sobre la LPG bajo estudio que modifiquen su respuesta espectral ante variaciones del nivel de

humedad en el medio en el que está inmersa con el objetivo de potenciar la sensibilidad.

Se propuso la implementación de un elemento que funcione a modo de intermediario entre la LPG y al ambiente humedecido. Éste elemento debió verificar la característica de ser altamente sensible a la presencia de moléculas de agua en el aire circundante. Para la implementación del mismo se analizó la posibilidad de emplear un material que reaccione químicamente con el agua o que simplemente presente un fuerte comportamiento hidrofílico. Una capa conformada por un material que posea una gran afinidad a absorber agua propiciaría la retención de moléculas de agua en un entorno cercano a la LPG (siempre que tal capa se encuentre depositada sobre la zona de la fibra óptica en la que la LPG se encuentre inscrita). Tal acumulación de moléculas de agua podría potencialmente generar dos efectos:

- Un cambio en el índice de refracción del material de dicho elemento intermediario y, por ende, del medio inmediato que rodea a la LPG.
- Un cambio dimensional del elemento intermediario adherido a la superficie de la fibra (por hinchamiento a causa de la absorción de humedad en la masa del material de la capa, o por contracción debido al proceso contrario).

La intensidad de estos dos efectos depende del material usado para implementar el elemento intermediario, llamado en adelante “*coating* de HR”.

Para la conformación del *coating* de HR, existieron diversas posibilidades en lo que a materiales a ser usados se refiere como por ejemplo hidrogeles, poliacrilatos, celulosas, arcillas modificadas, y fibras naturales/sintéticas. Además de estos grupos, también se hubiesen podido emplear combinaciones de varios de ellos para desarrollar materiales absorbentes de agua que sean más eficientes.

La elección del material usado para la conformación del *coating* de HR, condicionó la capacidad y la velocidad de absorción, así como la estabilidad dimensional, entre otros factores debido a que estas propiedades son dependientes del material en sí mismo.

Una opción que se presentó altamente atractiva fue el uso de polímeros debido a las facilidades que algunos de ellos presentan para su adquisición y manejo.

El fenómeno de absorción de agua en un polímero puede explicarse principalmente a través de dos principios físico/químicos: la difusión y la interacción polímero-agua.

- La difusión es el proceso mediante el cual las moléculas de agua se movilizan desde una región de mayor concentración hacia una de menor concentración a través de la matriz del polímero. Esto ocurre debido a la tendencia natural de las moléculas a moverse y a distribuirse uniformemente. Algunos polímeros que son altamente porosos proporcionan una gran cantidad de potenciales caminos para que las moléculas de agua se difundan en su interior.

- La interacción polímero-agua se debe a las fuerzas intermoleculares como los enlaces de hidrógeno y las fuerzas de dispersión. Los polímeros pueden tener grupos funcionales polares, como hidroxilos o carboxilos, que pueden formar enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua.

Además, las fuerzas de dispersión entre las moléculas de agua y las del polímero también desempeñan un rol importante en la absorción de agua.

La capacidad de absorción de agua de un polímero depende de varios factores, como por ejemplo la naturaleza química propia del polímero, su estructura interna, y la temperatura. Algunos polímeros son inherentemente hidrofílicos, aunque existen aquellos que exhiben un comportamiento hidrofóbico.

4.2.1. Criterio de selección del material para la conformación del *coating* de HR

El criterio de selección del material usado para la conformación del *coating* de HR tuvo en cuenta los siguientes tópicos:

- Que cambie fuertemente sus dimensiones al absorber agua del ambiente que lo rodea: este tópico está fundamentado en la explotación de la dependencia de la posición espectral del pico de atenuación con la tensión mecánica axial a la que está sometida la fibra óptica que contiene a la LPG. El desafío tecnológico consiste en solidarizar a la superficie de la fibra un *coating* de HR conformado por un material que aumente su volumen ante la absorción de moléculas de agua (en fase gaseosa) presentes en el medio que lo rodea. La idea es que esto provoque que la superficie de la fibra sea sometida a una acción de corte que se traduzca en un esfuerzo de tracción, lo cual en consecuencia genera la deformación de la fibra y por ende el corrimiento del pico de atenuación. Para que esto sea factible desde el punto de vista tecnológico el hinchado debido a absorción de agua no debe generar fuerzas de corte que superen las fuerzas de adhesión del material absorbente a la superficie de la fibra óptica. Si fuese ese el caso, el *coating* de HR se desprendería de la superficie de la fibra.
- Que cambie fuertemente su índice de refracción al absorber agua del ambiente que lo rodea: este tópico está fundamentado en la explotación de la dependencia de la posición del pico de atenuación con el valor del índice de refracción del medio que rodea a la fibra óptica. Para un buen aprovechamiento de este efecto, el material empleado para la formación del *coating* de HR debe exhibir una dependencia notable de su índice de refracción con la humedad absorbida. Si bien no se ha encontrado información publicada (al menos hasta mediados del año 2022) de la existencia de un material cuyo comportamiento óptico sea fuertemente sensible a la absorción de agua, algunos materiales presentan cierta sensibilidad al agua y pueden experimentar cambios menores en su índice

de refracción ante la presencia de humedad. Algunos polímeros hifrofilicos pueden absorber pequeñas cantidades de agua y en consecuencia sus índices de refracción pueden verse alterados. Ejemplos de polímeros que verifiquen este comportamiento son poli(N-isopropilacrilamida) (PNIPAN), poliacrilamida (PAN), polietilenglicol (PEG) y alcohol polivinílico (PVA).

- Que sea fácilmente obtenible en el mercado local.
- Que sea de bajo costo.

Desde el punto de vista tecnológico y considerando las facilidades disponibles, no fue posible determinar o discriminar a través de un ensayo o procedimiento experimental cuál de los mecanismos (cambio de la tensión axial o cambio del índice de refracción) dominó el efecto de corrimiento del pico de atenuación al momento de experimentar diferentes materiales (como es detallado en la siguiente sección).

4.2.2. Generación del *coating* de HR

En base a la verificación de los criterios de selección del material del *coating* de HR, se propuso la evaluación experimental de los siguientes materiales hidrofílicos: dióxido de titanio (TiO₂), poliuretano (PU) y alcohol polivinílico (PVA).

Se exploraron cuatro posibilidades para la generación del *coating* de HR empleando los materiales mencionados, a saber:

- PU
- PU mezclado con gránulos de TiO₂
- PVA
- PVA mezclado con gránulos de TiO₂

4.2.2.1. Uso de PU

El PU es un polímero que se forma mediante la reacción de un isocianato con un poliol. Si se lo compara con otros polímeros, el PU presenta un nivel de hidrofilia considerado medio/bajo. Este material muestra una acentuada estabilidad dimensional frente a la absorción de agua comparada con otros polímeros, es decir que tiende a mantener tanto su forma como sus dimensiones originales previas a ser expuesto a ambientes húmedos.

4.2.2.2. Uso de PU+TiO₂

El TiO₂ (también conocido como titania) se encuentra de forma natural en tres fases cristalinas, a saber: la brookita, la anatasa y el rutilo. Este compuesto en dispersión luce de color blanco mate lo cual hace que sea utilizado como pigmento en un amplio espectro de pinturas. La característica de mayor interés en el contexto de este trabajo es que presenta un comportamiento hidrofílico muy fuerte. Para la generación del *coating* de HR se empleó una muestra de TiO₂ en fase anatasa presentada en forma de polvo con partículas de 3nm a 15nm de diámetro medio. La existencia del PU colaboró a mantener sostenidos y sujetos a los gránulos de TiO₂ sobre la superficie de la fibra óptica en la zona sobre la cual se inscribió la LPG, actuando como red de soporte para propiciar la fijación mecánica de los mismos.

4.2.2.3. Uso de PVA

El PVA presenta un excelente comportamiento para conformar películas o capas. Es un polímero sintetizado a partir de monómeros de vinilo y tiene una estructura química hidrofílica, lo cual implica que presenta una afinidad natural por el agua. Además, se hincha marcadamente al absorber agua. Por estos motivos se consideró su uso en este trabajo. Se contó con un producto comercial del que no se obtuvieron datos técnicos que especifiquen las características ni propiedades físicas.

4.2.2.4. Uso de PVA+TiO₂

La estrategia de usar una mezcla de ambos agentes consistió en combinar las propiedades de absorción de agua que los caracteriza.

4.2.2.5. Método de deposición del *coating* sobre la fibra óptica

Con el objetivo de mejorar la sensibilidad de sensores basados en el empleo de LPGs, algunos autores han realizado diferentes modificaciones de la superficie de la fibra óptica en la zona en la que aquella se encuentra inscrita. Existe evidencia científica en la que se implementaron capas nanoestructuradas de algún material mediante el uso de técnicas como el proceso ESA (*Electrostatic Self-Assembly*) [7]. Para realizar la deposición de la capa sensibilizadora, otros grupos de investigación han usado preparaciones del tipo sol-gel seguida de proceso de recubrimiento por inmersión (“*dip coating process*”) [8]. También se han hallado publicaciones en las que se describen implementaciones basadas en otros métodos de generación de capas de materiales que son más complejas en lo que a logística e infraestructura se refiere. A modo de ejemplo de esto último puede mencionarse el caso de la deposición de capas metálicas usando la técnica de “*sputtering*”, LbL (*Layer-by-Layer*) de nano-ensambles, AD (*Anodical Deposition*) y también SP (*Spin Coating*) [9] [10] [11].

Debido a que todas estas técnicas demandan tanto infraestructura como instrumental de difícil acceso, se implementó una técnica de deposición elemental basada en el concepto del “*dip coating process*”. A modo de ejemplo se cita el caso del proceso usado para la deposición de una capa de PU con gránulos de TiO_2 . Para ello se generó una dispersión de partículas de TiO_2 en una solución de PU y acetona [12].

El proceso de deposición respondió al siguiente procedimiento básico:

- Paso 1: “Inmersión” (30 minutos). La LPG fue introducida en un baño líquido hecho de PU ($[2,013 \pm 0,001]\text{g}$) y TiO_2 ($[0,075 \pm 0,001]\text{g}$) disueltos en acetona ($[20 \pm 0,001]\text{g}$). Para medir las masas, se empleó una balanza electrónica de precisión (de la firma Sartorius).
- Paso 2: “Secado” (60 minutos). El solvente fue evaporado a temperatura ambiente.
- Paso 3: “Curado” (60 minutos). La LPG fue sometida a un proceso de calentamiento a 200°C usando un sistema especialmente adaptado para tal fin.

Respecto al último paso del procedimiento delineado, la fibra óptica del tipo empleado en este trabajo puede soportar temperaturas muy altas antes de que el sobrecalentamiento comprometa su estructura interna. Aunque este tipo de fibra posee un recubrimiento de protección que está basado en el uso de un tipo de polímero termoplástico llamado polimetilmetacrilato (PMMA) cuyo punto de fusión es aproximadamente 160°C , la zona de “curado” se limita al segmento de fibra en la que ésta fue liberada de tal recubrimiento en una etapa previa con el objetivo de acondicionarla para el grabado de la LPG.

La Figura 4. 3 muestra parte del sistema construido para realizar el tercer paso del procedimiento. Éste consistió en la implementación de un disco de aluminio $12,5\text{cm}$ de diámetro y $1,75\text{cm}$ de alto. Sobre la superficie superior se realizaron tres ranuras paralelas de aproximadamente unos $1,5\text{mm}$ de ancho y 2mm de profundidad. La función de la ranuras fue alojar tres fibras ópticas con sendas LPGs inscriptas y con la capa sensibilizadora ya seca luego de la inmersión (pasos 1 y 2 del procedimiento de deposición). Además se construyó una tapa de igual diámetro que el elemento anterior. La tapa fue de acero inoxidable de $3,5\text{mm}$ de espesor y se sujetó al disco de aluminio mediante 4 barras roscadas con tuercas del tipo mariposa. La masa del disco de aluminio sirvió de elemento difusor de calor homogenizando la temperatura en toda la extensión longitudinal del segmento de fibra bajo tratamiento. Debido a la masa del disco y al comportamiento térmico del material que lo compone, el sistema poseyó una gran inercia térmica que suavizó los cambios bruscos de temperatura durante el proceso de curado debido a perturbaciones del medio (por ejemplo, corrientes no controladas de aire). Mediante un elemento calentador que actuó en forma directa sobre la base del disco de aluminio, se elevó en forma controlada la temperatura del paquete metálico entero para ejecutar el último paso del procedimiento.



Figura 4. 3. Sistema empleado para realizar el tercer paso del procedimiento de deposición de la capa sensibilizadora sobre la LPG.

Para controlar la temperatura del sistema se utilizó un controlador de la firma West (modelo West2050). El sensado de temperatura se realizó mediante una termocupla inserta en la superficie lateral del disco de aluminio como muestra la Figura 4. 4. El actuador térmico fue realizado mediante un anafe eléctrico cuya alimentación de 220VAC fue intervenida a través del empleo de un *relay* cuyo comando fue asociado al controlador de temperatura. El controlador fue configurado estableciendo los valores de una serie de parámetros que programan un control del tipo PID, conforme a las indicaciones del fabricante del equipo.

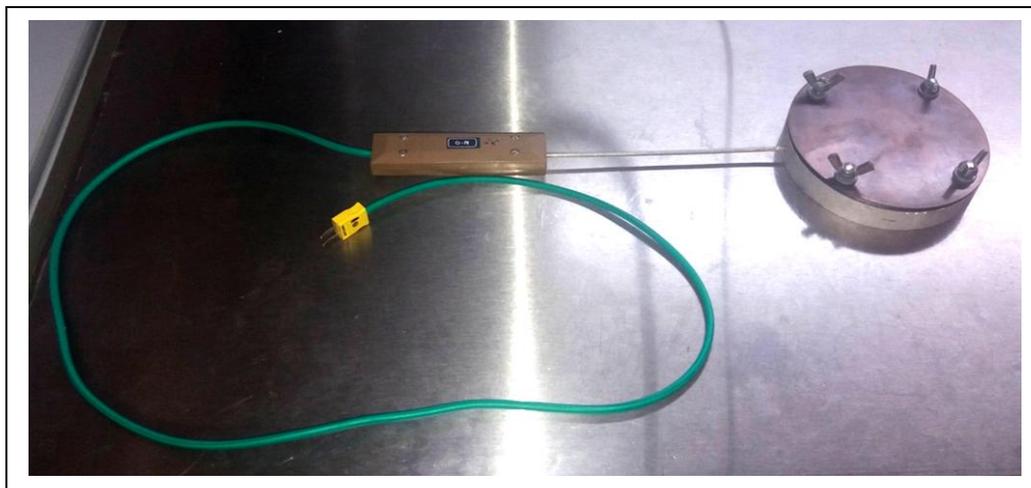


Figura 4. 4. Termocupla inserta en el disco de aluminio.

4.2.3. Arreglo experimental utilizado para la determinación de la sensibilidad a cambios de la HR

La ejecución de la Fase experimental 2 implicó la realización de numerosos ensayos en los que se midieron características del espectro de transmisión de las LPGs. Durante este proceso se observaron discrepancias entre repeticiones del mismo ensayo. Es decir, se registraron algunas diferencias en los espectros de transmisión de la misma LPG en una secuencia de ensayos realizados bajo similares condiciones de laboratorio (temperatura, tensión mecánica de la fibra y HR del ambiente). A este respecto se observó que las diferentes formas con las que la fibra óptica fue geoméricamente dispuesta en el arreglo experimental de ensayo en ensayo, influyeron en la respuesta espectral de la transmisión medida en cada uno de ellos.

Este comportamiento es atribuible a los cambios de birrefringencia de los puntos del material sobre los que la luz realiza su carrera (fibra óptica) desde que ingresa al circuito óptico inyectada por el emisor hasta que es detectada por el instrumento empleado [13]. La birrefringencia de la fibra puede sufrir cambios a causa de variaciones en la carga ambiental (tanto en aspectos mecánicos como en aspectos térmicos) del medio en el que ésta se encuentre emplazada. Es decir, si la fibra es sometida a solicitudes mecánicas que cambian de realización en realización del mismo experimento, es esperable que se verifiquen cambios en el espectro de transmisión medido [14] [15]. Un efecto similar es observado ante cambios en la temperatura del ambiente en el que la fibra se encuentre, dado que el comportamiento birrefringente de un medio de transmisión de luz es dependiente de la ella.

Estos efectos mencionados se manifestaron debido a que la radiación lumínica inyectada en el circuito óptico presentó un grado de polarización no nulo. La emisión típica de una fuente de luz del tipo SLD (como la empleada en el arreglo experimental implementado) verifica esta característica.

En la práctica cualquier cambio en la disposición de la fibra óptica que implique modificaciones en los radios de curvatura y/o en el estado de torsión, representa una situación que potencialmente induce cambios de las propiedades birrefringentes del material que compone a la fibra (debido a que se generan cambios en la distribución de tensiones mecánicas distribuidas a lo largo del camino óptico). Este efecto no causaría inconvenientes si la fuente de luz empleada estuviese despolarizada, pero no es el caso de una fuente de luz del tipo SLD.

Como respuesta ante esta situación, se determinó disminuir significativamente la longitud del tramo de fibra sometida a posibles cambios de posición de ensayo en ensayo (es decir, la zona del arreglo que sufre manipulación entre pruebas) con el objetivo de minimizar los efectos de los potenciales cambios en la birrefringencia de la fibra.

Debido a que la influencia de los cambios de birrefringencia sobre la señal de luz a lo largo del camino óptico es acumulable, cuanto más corto es el tramo de fibra óptica sometido a cambios de posición de ensayo en ensayo, menor es la probabilidad de que el estado de polarización de la luz inyectada al circuito cambie en su recorrido. Esta fue

la situación suscitada en los experimentos realizados que hasta este punto. Pero dadas las características del ensayo a realizar en esta etapa del trabajo de Tesis, ya no fue posible evitar o desprestigiar la influencia de los cambios de birrefringencia en la respuesta espectral bajo estudio.

Con el objeto de materializar una acción que responda a lo anterior se procedió a la implementación de un arreglo en el que básicamente los dos tramos de fibra óptica asociados a los puertos de entrada y salida de la LPG fueron fijados en posiciones estancas para que no exista manipulación de los mismos de prueba en prueba y así lograr un mayor grado de repetibilidad experimental.

En términos generales los tramos de fibra óptica del arreglo se distribuyeron de la siguiente manera:

- 5m de la fibra por la que se realiza la inyección de luz (puerto de entrada de la LPG, conectado al emisor de luz).
- 1,5m de fibra en la que se encuentra inscrita la LPG bajo ensayo.
- 5m de fibra que dirige la luz hacia el instrumento de medición (puerto de salida de la LPG, conectado al OSA).

De este modo de la carrera total de 11,5m de longitud, 10m fueron fijados. Sólo 1,5m quedaron en estado “no controlado” de posición de prueba en prueba (que incluyen los ≈3 cm de fibra en los que se encuentra grabada la LPG). Así se minimizó la probabilidad de cambios en la birrefringencia del material de la fibra por la que se propaga la luz a través del circuito óptico empleado.

Además de las medidas aplicadas para minimizar los efectos de los potenciales cambios de birrefringencia de la fibra en la implementación del arreglo experimental montado para evaluar la respuesta de las LPGs a cambios de HR, se tuvo en cuenta el control de otros factores de influencia con el objetivo de estabilizar en la mayor medida posible el montaje de medición. Esto se concretó en la construcción de un sistema específicamente diseñado que fue llamado “Cámara de HR”.

4.2.3.1. Descripción de la Cámara de HR

En esta sección se describen las características del sistema que fue construido con el propósito de realizar los ensayos que permitieron determinar la respuesta espectral de las LPG con diferentes *coatings* ante barridos de humedad ocasionados en forma controlada.

Conceptualmente la cámara de HR fue un sistema que poseyó la capacidad de mantener controlada tanto la temperatura como la humedad del ambiente interno de un recinto herméticamente cerrado. Consistió en una caja de vidrio con una abertura sobre su cara superior que brindó asiento a un conjunto de tapas. Éstas fueron una serie de planos de acrílico y madera diseñados de forma tal que permitieron su fácil y rápida remoción y la conexión de fibras ópticas en forma cómoda. Además, brindaron la zona de apoyo al actuador que formó parte del control térmico (como se detallará

posteriormente en esta sección). La Figura 4. 5 muestra un esquema de la cámara con sus dimensiones mecánicas y el detalle del sistema de tapas.

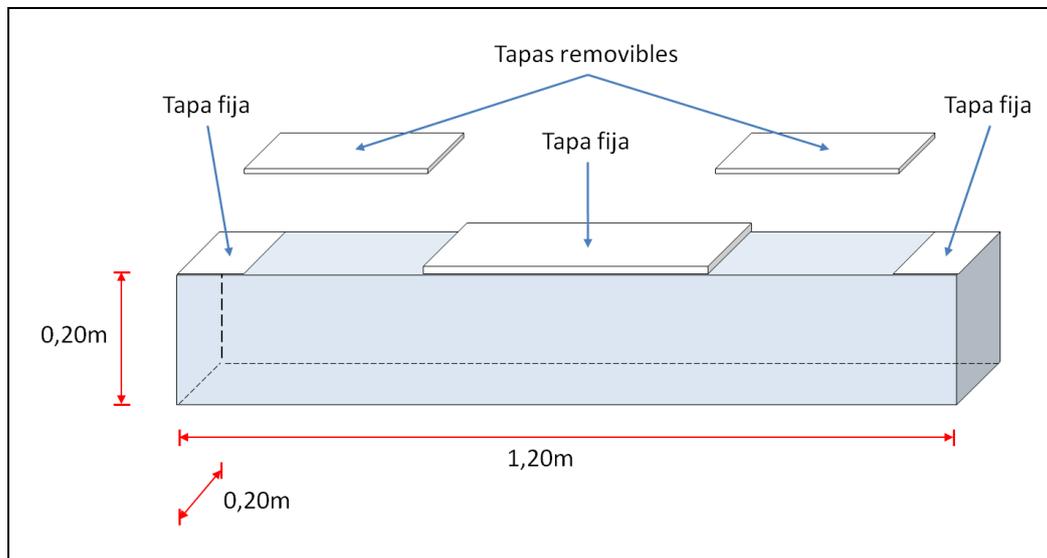


Figura 4. 5. Esquema de la cámara de HR con sus medidas y sistema de cierre.

Con el objetivo de garantizar su hermeticidad, las tapas removibles se asentaron sobre burletes de goma ubicados en los bordes de las dos aberturas superiores. Para fijar las tapas a la caja se implementaron seguros basados en el uso de barras roscadas y tuercas del tipo mariposa, que actuaron sobre sunchos ubicados de forma tal que la tensión de contacto tapas/caja se distribuyó lo más uniformemente posible. A su vez sobre la cara superior de la caja de vidrio se ubicaron dos tapas fijas situadas en los extremos y sobre las cuales se realizaron orificios que alojaron conectores pasantes (de pared). Se usaron conectores del tipo FC/PC y FC/APC para permitir el conexionado de cables de fibra óptica y del tipo DB para hacer el conexionado de los cables de la alimentación eléctrica y de la comunicación digital de los dispositivos ubicados dentro de la cámara. Las dos aberturas superiores de la caja permitieron la manipulación cómoda de todos los elementos a ser ingresados y ubicados en su interior. La tapa fija central ofició de soporte y apoyo para el actuador térmico (omitido en la Figura 4. 5).

El volumen interior de la cámara fue suficiente para alojar el tramo de fibra con la LPG grabada bajo ensayo, los soportes que mantuvieron tensionada a la fibra óptica (a la tensión de referencia), los actuadores de humidificación y deshumidificación, el actuador térmico, los sensores utilizados para monitorear HR/temperatura y demás elementos periféricos necesarios para el armado del arreglo.

La Figura 4. 6 muestra un diagrama en bloques del sistema completo. Para mantener controlada la temperatura se usó un equipo disponible en el laboratorio basado en el empleo de un TEC (*thermoelectric cooler*). Para que este opere se lo vincula con un sistema electrónico (TE Technology Inc. Modelo CP-200HT) que, en función de las mediciones que realiza interrogando dos sensores de temperatura en forma permanente, es capaz de comandar al actuador térmico en un lazo cerrado de

control del tipo PID (proporcional, integrativo, derivativo). El actuador térmico (celda Peltier) contó con la capacidad tanto de enfriar como de calentar el aire interno de la cámara a través de una platina de aproximadamente 20cm x 15cm de área. Este equipo posee un *cooler* (Fan) que impuso el movimiento de aire que provocó la convección forzada de calor, agilizando el intercambio entre el actuador y el aire interno de la cámara.

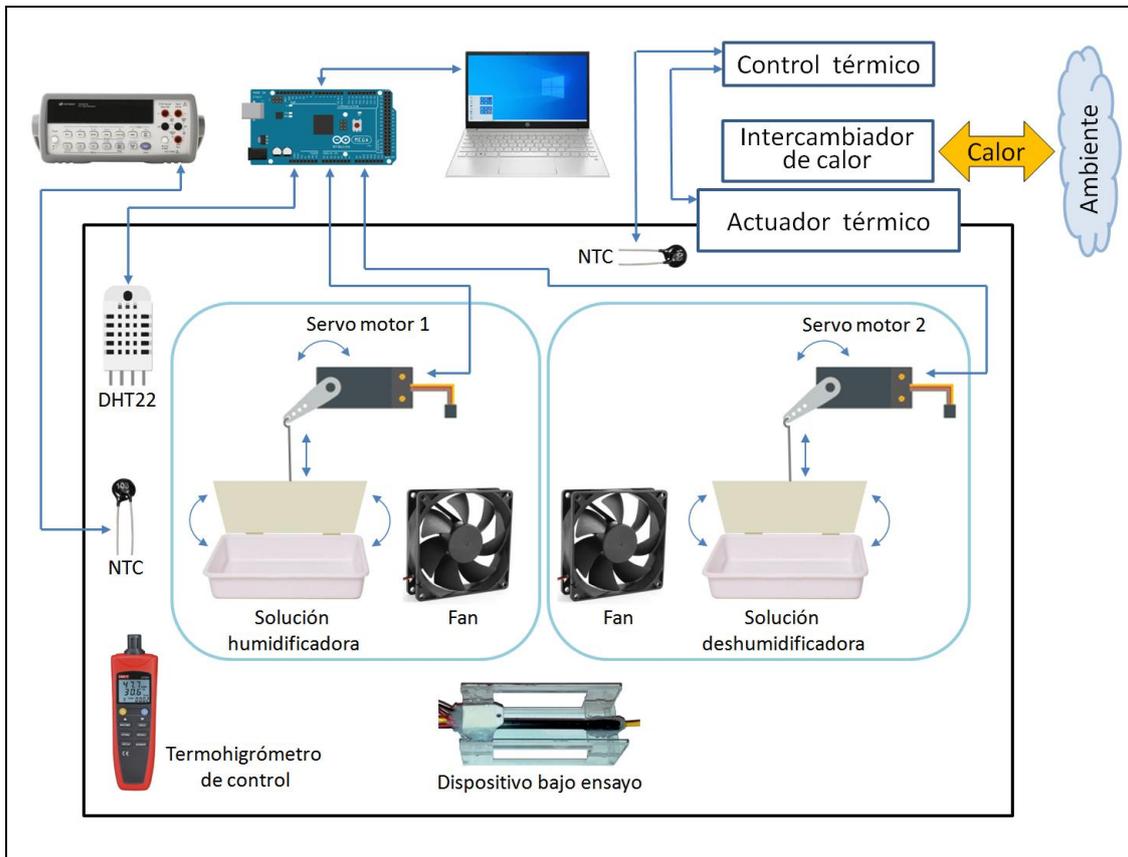


Figura 4. 6. Diagrama en bloques de la cámara de HR construida.

Los ensayos para caracterizar la dinámica térmica de la cámara probaron que ésta tardó aproximadamente 30 minutos en estabilizar la temperatura en su interior con una precisión que se encuentra en el orden de 0,01°C. Para la realización de esta serie de pruebas no se introdujeron masas dentro de la cámara que simulen la carga térmica de los elementos que luego fueron ensayados (las LPGs como elementos sensores de HR).

El control térmico garantizó dos cuestiones a tener en cuenta:

- que los cambios observados en la respuesta espectral de las LPGs bajo ensayo no sean debido a cambios en la temperatura (magnitud a la cual toda LPG es sensible),

- que los cambios de birrefringencia inducidos por cambios de temperatura generen un impacto mínimo sobre la característica de transmisión de la LPG.

Para sensar la temperatura el equipo de control contó con dos termistores del tipo NTC dispuestos en lugares diferentes del interior de la cámara, uno sobre la platina de intercambio de calor del actuador y el otro en un punto cercano a la LPG bajo ensayo. Además se agregaron tres elementos de monitoreo de temperatura extras: 1) uno basado en el uso de adquisidor de datos de laboratorio de la firma Agilent modelo 34970A; 2) otro basado en el empleo de un sensor del tipo DHT22 conectado a una placa Arduino Mega 2560 que permitió registrar la temperatura y la HR interna de la cámara en una computadora notebook; y finalmente, 3) otro basado en el uso de un termohigrómetro del tipo *handheld* de la firma UNI-T. Estos elementos de monitoreo fueron dispuestos en sitios diferentes de la cámara para vigilar y evaluar la evolución térmica general del volumen interno de la misma.

Las características básicas de los sensores de monitoreo usados son listadas a continuación:

- DHT22:
 - Firma: Aosong Electronics Co.
 - Precisión: 0,5°C y de 2%HR a 5%HR.
 - Sensor de temperatura basado en termistor.
 - Sensor de HR del tipo capacitivo.
 - Rango de medición en temperatura: -40°C a 125°C
 - Rango de medición en HR: 0% a 100%.
 - Interfaz: comunicación digital a una placa Arduino.
- Termohigrómetro:
 - Firma: UNI-T modelo UT332.
 - Precisión: 0,5°C y 2,5%RH (en el rango de temperatura y humedad abordado en los ensayos).
 - Sensor de temperatura basado en termistor.
 - Sensor de HR del tipo capacitivo.
 - Rango de medición en temperatura: -40°C a 125°C
 - Rango de medición en HR: 0% a 100%.
 - Interfaz: visual a través de un display.

Para mantener constante la tensión mecánica de la fibra óptica durante cada ensayo de barrido en humedad se implementó el mismo mecanismo descrito en tiempo de fabricación de las LPGs, basado en fijar un extremo de la fibra y someter al otro extremo a una tracción generada por un peso de referencia (sistema masa/polea previamente descrito). Cabe aclarar que dicho sistema de tracción no está representado en la Figura 4. 6.

El control de humedad interna implementado fue del tipo “a lazo abierto” lo cual implicó la intervención de un operador humano. Para lo cual se diseñó un software para PC que corre sobre Windows, siendo LabView el entorno de desarrollo empleado. El software permitió visualizar las lecturas de HR y temperatura medidas con el sensor DHT22 situado en el interior de la cámara, brindando al operador la posibilidad de comandar los actuadores a fin de aumentar o disminuir la HR interna de la cámara dependiendo del punto de operación requerido.

La etapa de actuación del control fue basada en el uso de soluciones acuosas saturadas de sales que regulan la HR a 11% (litio cloruro, LiCl) y 97% (potasio sulfato, K₂SO₄) aproximadamente. Estos valores de regulación se mantienen estables en ambientes cuya temperatura se encuentre entre 5°C y 40°C [16], condición que se verificó en todo ensayo realizado debido a que la temperatura de la cámara de humedad fue establecida en 23,00°C. Dentro de la cámara se alojaron dos bateas con dichas soluciones. Las bateas contaron con tapas cuyo cierre/apertura fue comando por una placa Arduino a través de dos servomotores. Las tapas de las bateas, vinculadas a los ejes de los servomotores mediante mecanismos de brazos y bisagras, fueron confeccionadas con corte láser en placa de acrílico de 4mm de espesor. Los brazos fueron implementados con alambre galvanizado de 1,10mm de diámetro. Para asegurar un buen cierre de las tapas sobre las bateas se emplearon contrapesos hechos con discos de acero inoxidable de 4mm de espesor y 5cm de diámetro. Los servomotores fueron accionados por un firmware descargado en la placa Arduino que fue programado con el entorno de desarrollo propietario del fabricante de estas placas. Tal software permitió que la placa Arduino responda a la llegada de comandos vía puerto serie provenientes de la computadora en la que corrió el software con la interfaz de usuario sobre la que actúa el operador humano.

Mediante el accionar sobre la tapa de la batea con la solución de LiCl se pudo disminuir la HR interna de la cámara, mientras que accionando sobre su homóloga con solución de K₂SO₄, se pudo aumentar la HR. El grado de apertura de cada tapa determinó el valor de HR en el que se estabilizó la cámara para cada nivel requerido en los ensayos realizados.

De acuerdo a las sales usadas para generar las soluciones, el rango de HR en el que potencialmente se logró estabilizar el punto de operación de la cámara fue aproximadamente de 11% a 97%. Para mejorar la respuesta dinámica de la cámara ante cada nivel de HR en el que se quiso estabilizar el sistema, se adicionaron dos *coolers* situados en sendas bocas de las bateas de forma que la dirección del aire movilizado por ellos fue tangencial al plano de la boca de cada batea. Mediante esta modalidad se forzó un movimiento interno de aire que homogenizó en humedad al ambiente interno de la cámara en aproximadamente 2 minutos para incrementos de 1,0% en HR. Este tiempo no es constante si se lo evalúa en todo el rango de funcionamiento de la cámara dado

que la tasa de secado/humidificación impuesta por las soluciones reguladoras es dependiente de la HR corriente del ambiente dentro del cual se desempeñan.

Para tomar cada una de las lecturas espectrales se esperó un lapso de tiempo de 15 minutos luego de que se alcanzara la estabilidad de la cámara en el punto de operación (en HR) requerido. El ensayo consistió en operar la cámara de HR barriendo un dado rango en forma escalonada (en donde cada escalón representa un punto de HR estable). Antes de registrar las características del espectro óptico de la LPG bajo ensayo se verificó que la temperatura sea la misma para toda medición realizada.

La Figura 4. 7 muestra el espacio del laboratorio destinado al armado del arreglo experimental para la ejecución de los ensayos de barrido en HR de las LPGs bajo estudio. El laboratorio usado no poseyó ni paredes ni aberturas que linden con el exterior del edificio, lo cual le confiere una buena estabilidad térmica. Esto fue altamente conveniente a los efectos de minimizar el esfuerzo de actuación del control térmico. En la fotografía se observan los elementos necesarios para la generación y estabilización del haz de luz inyectado en la fibra óptica que contiene a la LPG, el equipamiento asociado al control térmico de la cámara, la instrumentación de detección y la notebook de registro de datos y en la que también corre el software que oficia de interfaz con el operador humano.



Figura 4. 7. Arreglo experimental empleado para realizar los ensayos de barrido en HR.

4.2.3.2. Software de soporte

Se generaron dos desarrollos de software con el objetivo de brindar soporte tecnológico al funcionamiento de la cámara de HR. A continuación se describen las principales características de ambos:

- Software que corre en la placa Arduino Mega2560:
 - Función:
 - Interroga al monitor de temperatura y HR (DHT22).
 - Comanda los dos servomotores que articulan, a través de brazos, las tapas de las dos bateas con soluciones saturadas de sales que intervienen en el control de HR.
 - Comunicación:
 - Se comunica con la PC/Notebook sobre la que corre el software con la interfaz de usuario del operador.
 - Es del tipo digital, serie, 9600 bps, sobre capa física USB 1.5.
 - Entorno de desarrollo de software:
 - Arduino 1.8.18.
 - Nombre:
 - CH03Vo6.ino
 - Asociado a la cámara de humedad versión 3.
 - Versión de archivo .ino n°6.
 - Software que corre en la PC/Notebook:
 - Función:
 - Exhibe dentro de una ventana mediante indicadores numéricos los valores de HR y temperatura monitoreados con el sensor DHT22 ubicado dentro de la cámara.
 - Comanda el grado de apertura de las tapas de las bateas que contienen las soluciones saturadas de sales reguladoras. Estos comandos son controlados mediante barras deslizadoras que el operador puede mover con el uso del mouse de la computadora en la que corre el software.
 - Entorno de desarrollo:
 - LabView 12.
-

- Nombre:
 - Humidity C. V3.0.

La Figura 4. 8 muestra un esquema en el que se brinda detalle del flujo de información y comandos que conforman la comunicación entre la placa Arduino y la computadora. Los comandos emitidos desde esta última actúan sobre los servomotores 1 y 2 mientras que los datos de monitoreo emitidos por la placa Arduino bajo demanda de la computadora contienen información de los ángulos de apertura de las tapas asociadas a los brazos vinculados a los ejes de los servomotores y también contienen información de temperatura y humedad medidas por el DHT22.

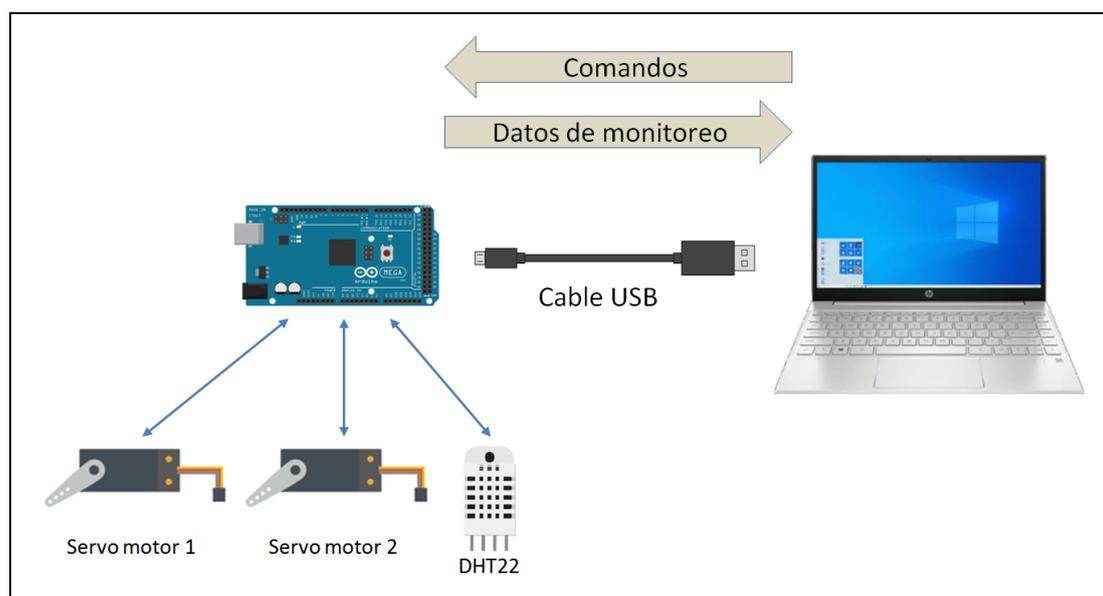


Figura 4. 8. Diagrama de comunicación digital Arduino – PC/Notebook.

En el Apéndice Sección A.1 se encuentra una copia del código Arduino correspondiente al archivo CHO3VO6.ino.

4.2.3.3. Dinámica de la cámara de humedad

Con el objetivo de obtener información de la dinámica asociada a la respuesta de la cámara ante los cambios de humedad impuestos por los actuadores del control (soluciones saturadas de sales reguladoras), se procedió a someter al espacio interior de la cámara a un proceso de deshumificación mediante el uso de la solución correspondiente. Así, se abrió la tapa de la batea forzando el movimiento de aire interno mediante los dos *coolers* (Fan) dispuestos para tal fin. Luego de alcanzar un punto estable de 20% en HR, se procedió a cerrar la batea con la solución de secado y a abrir la batea con la solución que humedece el ambiente para que ello ocurra de manera gradual. A partir de ese momento se registró la evolución temporal de la HR. La Figura 4. 9 muestra el gráfico de los datos experimentales obtenidos.

Esta información permitió acceder a un conocimiento preliminar de la respuesta temporal de la cámara cuya HR interna se desea controlar.

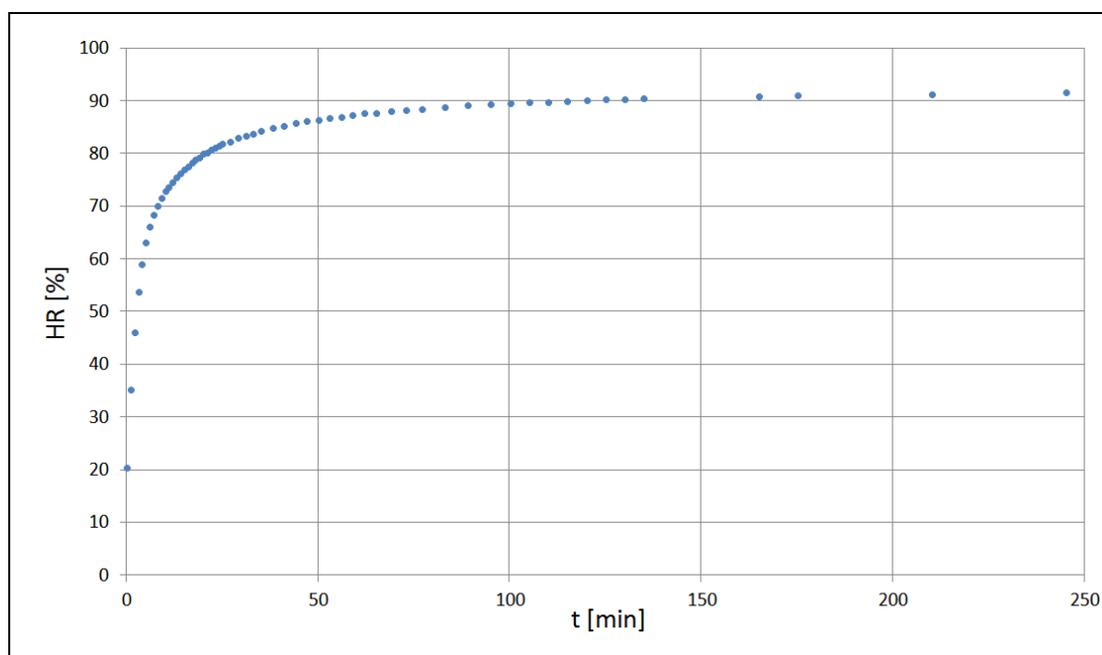


Figura 4. 9. Respuesta temporal de la cámara de humedad ante la apertura de la batea humidificadora.

4.2.4. Consideraciones relativas al uso del instrumental

Con el propósito de obtener los datos experimentales que permitieron establecer la respuesta de la LPG al nivel de humedad del medio que rodea a la fibra, las mediciones registradas durante el ensayo de barrido en humedad fueron implementadas y procesadas de la siguiente manera.

- Para realizar las mediciones espectrales de la transmisión de la LPG se empleó un OSA de la firma Yokogawa, modelo AQ6370B (OSA) con 20pm de precisión.
- En cada punto estable de humedad alcanzado, se registró el espectro de transmisión usando una ventana de observación de 4,5nm (“OSA *wavelength span*”) y tomando 1500 muestras por cada barrido de la ventana antedicha.
- Cada muestra adquirida por el OSA fue promediada 10 veces con el objetivo de reducir los efectos del ruido de medición.
- El espectro de transmisión tomado en toda la ventana de adquisición configurada (en cada barrido) fue promediada 2 veces (técnica estadística llamada “*roll average*” que fue configurada usando las herramientas de software intrínsecas del instrumento).

- La posición espectral (longitud de onda) del pico de atenuación fue determinada mediante la búsqueda del valor mínimo de la función que mejor ajustó visualmente en la nube de puntos experimentales. De diferentes las opciones disponibles en la interfaz de software de la configuración del instrumento para hallar la función de ajuste de las muestras, fue empleado un polinomio de grado 5.
- La incertidumbre asociada a las mediciones de HR fue $\pm 2\%$ (DHT22) en todo el rango abordado.

4.3. Validación del aumento de sensibilidad a la HR con los *coatings* propuestos

Con el objetivo de estudiar la respuesta de las LPGs ante las variaciones de HR en el medio que rodea a la fibra usando los diferentes *coatings* propuestos, se realizaron cuatro ensayos empleado el arreglo experimental de la Figura 4. 6 y la práctica operativa descrita en la Sección 4.2.4 para el registro de los datos experimentales. Se usaron cuatro LPGs con *coatings* formados en base a PVA, PVA+TiO₂, PU, y PU+TiO₂.

En todos los ensayos realizados sobre las LPGs, se mantuvieron las condiciones experimentales resumidas en la Tabla 4. 1 .

Tabla 4. 1. Condiciones experimentales.

Temperatura configurada en el control térmico de la cámara (<i>setpoint</i> de temperatura)	23,00°C
Masa de tracción (tensión de referencia establecida para este ensayo)	[28,62 \pm 0,01] g
Cantidad de realizaciones por ensayo (salvo que se indique lo contrario)	2
Medio que rodea la LPG	aire

4.3.1. PVA

Se ejecutaron dos realizaciones del ensayo con el fin de evaluar la repetibilidad de la respuesta del sensor óptico bajo estudio. El rango de HR barrido en ambas realizaciones fue entre 30% y 80% aproximadamente. La Figura 4. 10 muestra la posición del pico de atenuación en (λ [nm]) de la característica de transmisión de la LPG para diferentes niveles de humedad (HR [%]) en la cámara de humedad, para las dos realizaciones experimentales efectuadas (gráfico superior para la realización 1 e inferior para la realización 2). No se propuso el ajuste de este conjunto de puntos experimentales a través de una expresión matemática.

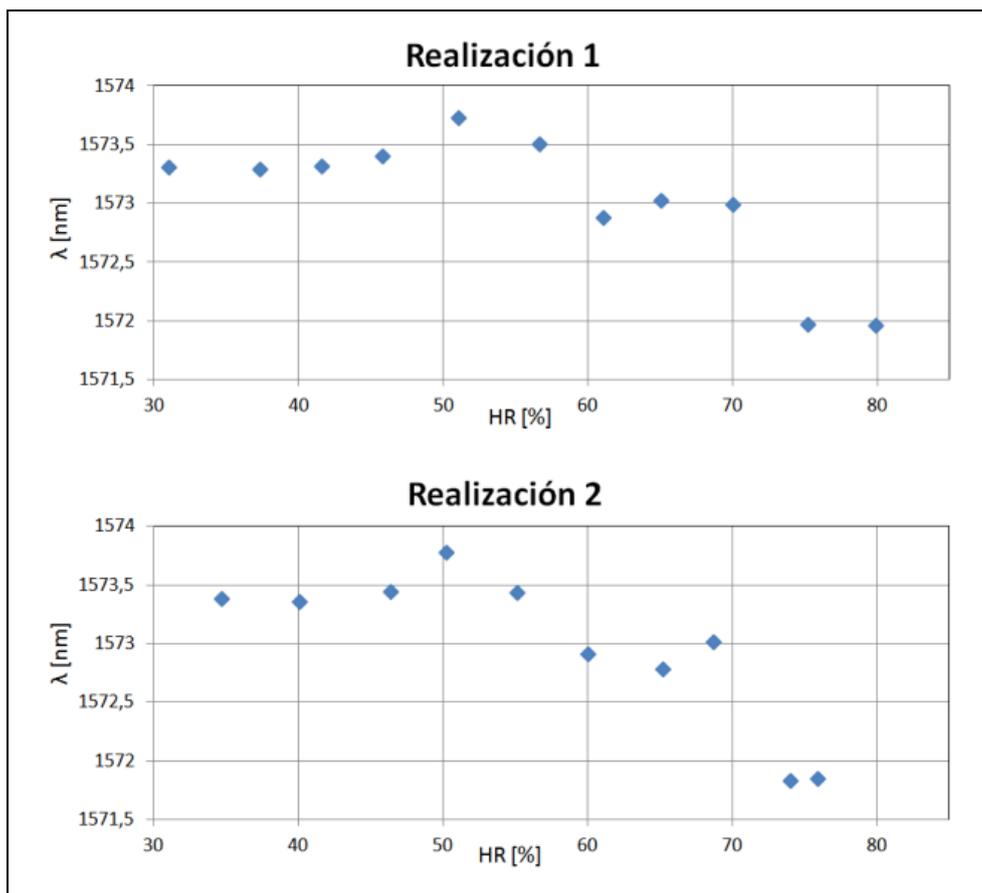


Figura 4. 10. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PVA.

4.3.2. PVA + TiO₂

Se ejecutaron dos realizaciones del ensayo. Para la constitución de la mezcla de PVA+TiO₂, se implementó la siguiente proporción de cantidades másicas (las masas fueron medidas con una balanza de precisión de la firma Sartorius).

- $m_{\text{PVA}} = [15,01 \pm 0,01]\text{g}$
- $m_{\text{TiO}_2} = [12,52 \pm 0,01]\text{g}$

La Figura 4. 11 muestra la posición del pico de atenuación λ [nm] de la característica de transmisión de la LPG en función de la HR [%] para las dos realizaciones experimentales efectuadas. El rango de humedades barrido fue entre 30% y 80% aproximadamente. También se muestran en recuadros dentro de las gráficas, las funciones de ajuste propuestas para modelar matemáticamente la relación λ vs. HR.

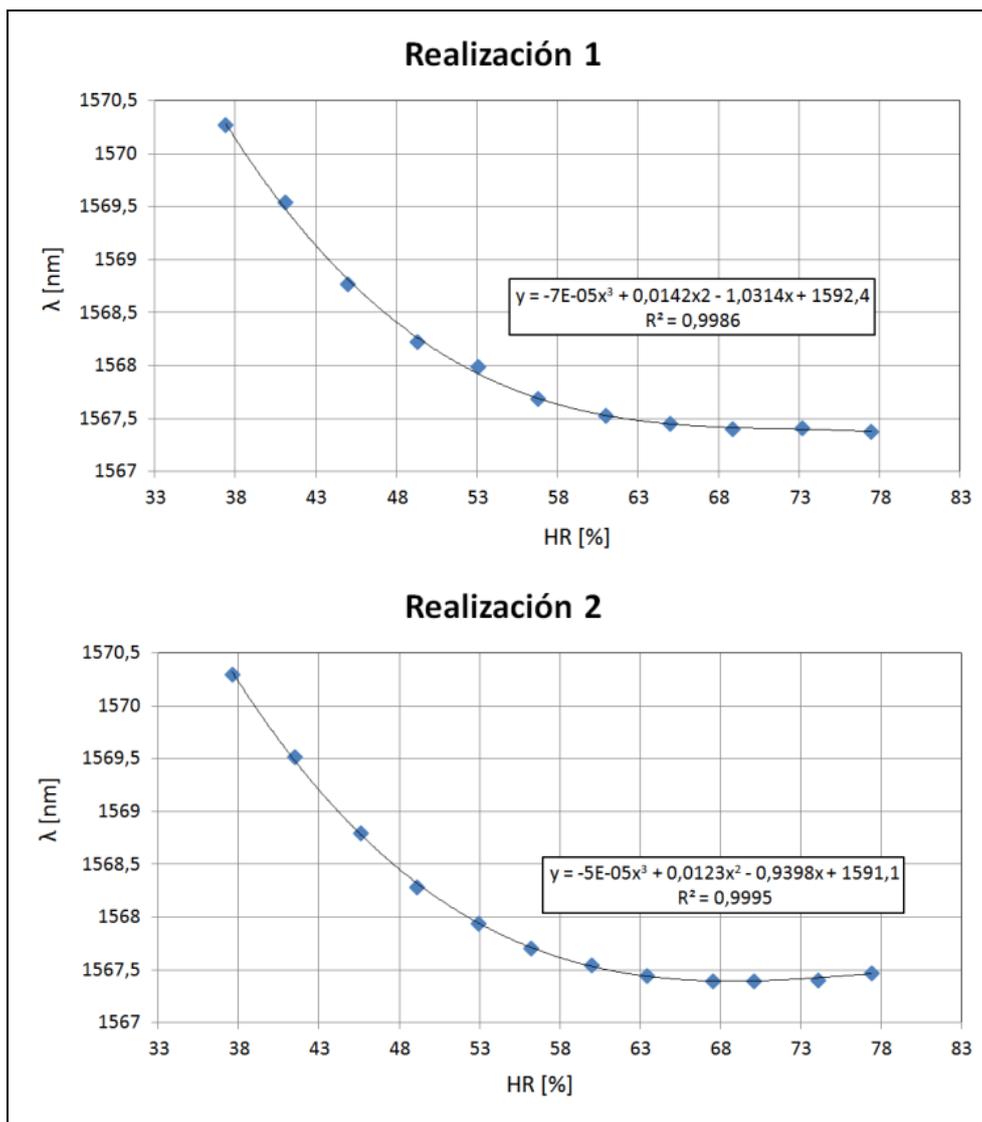


Figura 4. 11. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PVA+TiO₂.

4.3.3. PU

Se ejecutaron dos realizaciones del ensayo. La Figura 4. 12 muestra la posición del pico de atenuación λ [nm] de la característica de transmisión de la LPG en función de la HR [%] para las dos realizaciones efectuadas. El rango de humedades barrido fue entre 30% y 80% aproximadamente. Se muestran en recuadros dentro de las gráficas, las funciones de ajuste propuestas para modelar matemáticamente la relación λ vs. HR.

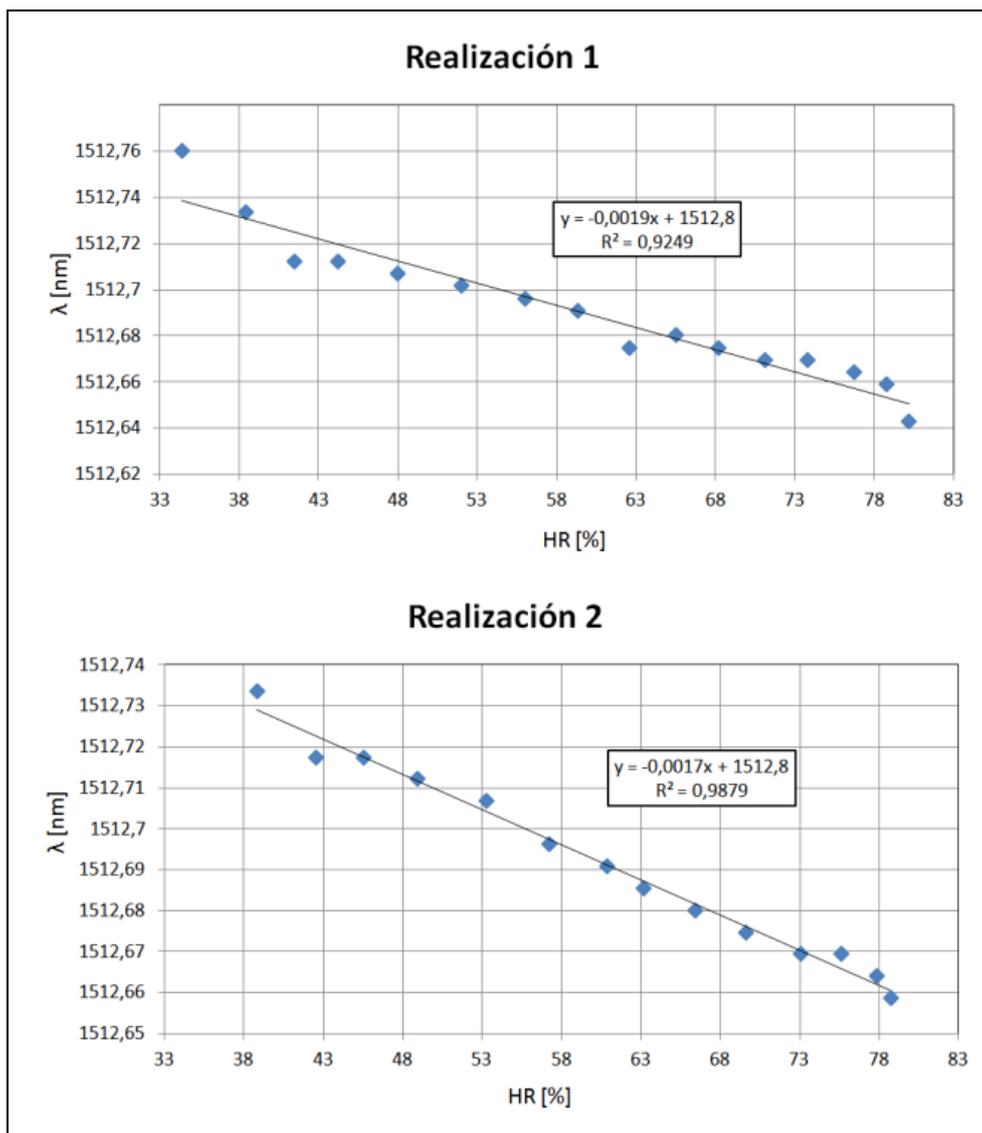


Figura 4. 12. Posición espectral del pico de atenuación λ [nm] en función de la HR [%], para una LPG con coating de PU.

4.3.4. PU + TiO₂

Se ejecutó un único ensayo debido a inconvenientes logísticos. La Figura 4. 13 muestra la posición del pico de atenuación λ [nm] de la característica de transmisión de la LPG en función de la HR [%] en la única realización efectuada. Se muestra en un recuadro dentro de la gráfica, la función de ajuste propuesta para modelar matemáticamente la relación λ vs. HR.

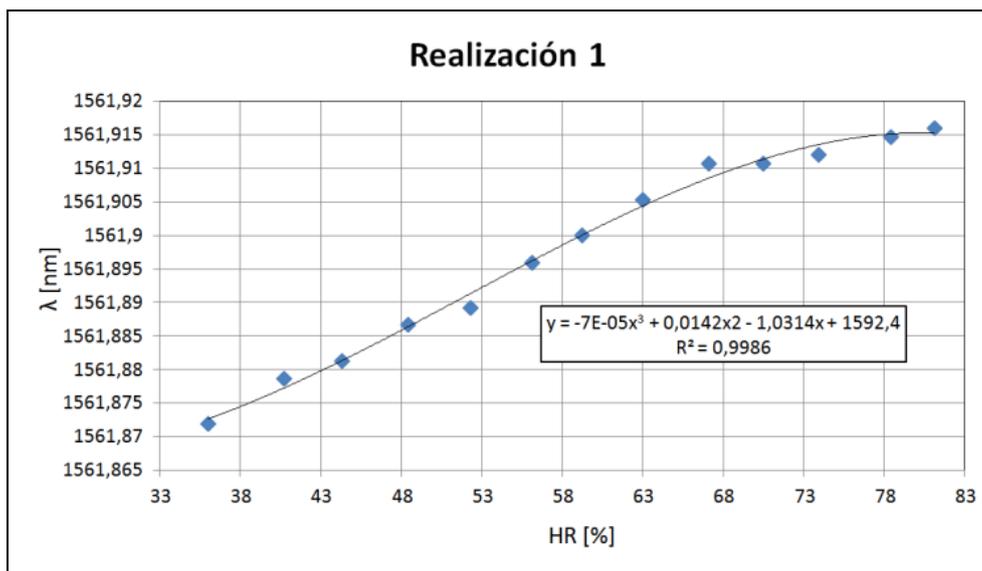


Figura 4. 13. Posición espectral del pico de atenuación en función de la HR para una LPG con coating de PU + TiO₂.

4.3.5. Elección del *coating*

Las gráficas asociadas a realizaciones del mismo ensayo muestran el fuerte grado de repetibilidad del experimento, lo cual refleja la alta estabilidad de las condiciones experimentales que fue alcanzada mediante el arreglo implementado (cámara de humedad). Esto último garantizó que las influencias generadas por variaciones en alguna condición de carga ambiental espuria que actúe sobre la respuesta óptica de la LPG, se mantuvieran acotadas propiciando una respuesta mayormente debida a la variación de HR.

Pudo observarse que el ensayo que involucró al PVA como material base del *coating* sensibilizante a HR, mostró un comportamiento en el que los puntos experimentales se distribuyen en una nube que presenta una gran dispersión respecto de su centroide. Esto implica que si bien puede hallarse una función de ajuste para modelizar la relación λ vs. HR, el coeficiente de bondad del mismo acusaría una fuerte variabilidad de los puntos experimentales frente a dicha curva.

Con respecto al ensayo en el que el *coating* fue realizado en base al uso de PVA+TiO₂, se observó un mejor comportamiento respecto a la dispersión de puntos experimentales. Esto propicia la determinación de una función de ajuste con un mejor coeficiente de bondad. El comportamiento del ensayo acusa además que la respuesta de la LPG potenciada con este *coating* presenta una baja sensibilidad para humedades relativas superiores al 60% (la pendiente de la recta tangente a la función de ajuste en los puntos de este intervalo es prácticamente nula). Por la naturaleza no lineal de la función de ajuste, la sensibilidad se muestra dependiente del valor de HR al que esté sometida la LPG sensora.

Se observó que en los ensayos donde se implementó PU como material base del *coating*, las nubes de puntos experimentales aparentan ser más ajustables usando

funciones lineales. Esta elevada similitud de comportamiento con transferencias lineales muestra que los *coatings* en base a PU ofrecen una opción interesante desde el punto de vista práctico y en vistas al potencial desarrollo tecnológico de un sensor de HR basado en el empleo de una LPG. Si bien la linealidad no es una condición necesaria para que el sistema sensible a la HR bajo estudio sea apto para la potencial conformación de un sensor de humedad, es muy conveniente. En los casos en los que la transferencia es lineal, la sensibilidad es constante en todo el rango de medición de HR lo cual implica que el procesamiento de señal necesario para la obtención de un valor de HR a partir de la información espectral demande menor carga de cómputo matemático.

Por estas razones, se eligió el uso de PU sin TiO_2 dado que este *coating* presentó una mayor sensibilidad al cambio de HR. Se observa en la Figura 4. 12 y Figura 4. 13 que la posición del pico de atenuación λ [nm] cambió aproximadamente 60 pm en una excursión de 40% a 80% en HR para el caso del *coating* con PU, mientras que se verificó un cambio de aproximadamente 40 pm en la misma excursión de HR para el caso del *coating* conformado por PU+ TiO_2 . Debe indicarse que la comparación antedicha fue realizada sobre dos especímenes LPGs diferentes, dado que una vez colocado el *coating* sensibilizante no es posible su remoción y por tanto la reutilización de la LPG. Esto implica que si bien el proceso de fabricación de LPG es estable en lo que a dispersión de características ópticas de las LPGs generadas se refiere, pueden existir diferencias en su sensibilidad al cambio del índice de refracción y al cambio de strain que estén afectando el análisis comparativo.

4.4. Diseño estructural del sensor embebible en mezcla cementícea

El hormigón es un medio químico-mecánico rústico y potencialmente agresivo para embeber una fibra óptica. Esto se evidencia principalmente durante la colada del material fresco en moldes y encofrados para producir estructuras de hormigón, más aún si se usan vibradores mecánicos en obra o varrillado en laboratorios. Una forma de evitar daños potenciales a la fibra óptica ante estos métodos que en muchas ocasiones son inevitables así se trate de hormigones autocompactantes, es mediante el uso de un empaque o encapsulado a modo de escudo que brinde protección mecánica contra los bordes agudos/filosos de los agregados, principalmente en el momento en que los mismos se encuentran en movimiento durante el volcado. Por último, y desde el punto de vista de la robustez mecánica del sensor de HR, el encapsulado debe ser apto para contener y soportar los esfuerzos mecánicos asociados al ambiente en el que debe prestar servicio el sensor, por ejemplo, debe ser capaz de soportar los esfuerzos inducidos como consecuencia del fenómeno de contracción por secado.

Las experiencias alcanzadas por varios grupos de investigación alrededor del mundo se centraron en el uso de dispositivos del tipo FBG en fibra óptica protegidos por encapsulados metálicos [17] [18]. Lo propio puede comentarse respecto a los emprendimientos comerciales [19].

Más allá del requerimiento de protección mecánica, el encapsulado debe permitir que el elemento sensible (LPG en el caso de este trabajo de Tesis) interactúe con el mensurando de interés (humedad). Una última consideración a tener en cuenta es que el sensor bajo estudio fue caracterizado en un ambiente gaseoso (aire húmedo), es decir que la LPG interactuó con un medio específico durante los ensayos de caracterización realizados. Por este motivo, el diseño del encapsulado debió ser compatible con esta restricción para que los ensayos que comprobaron el concepto de medición sigan siendo válidos una vez confinada la LPG no sólo dentro del encapsulado que la proteja sino también cuando esté el ensamble sensor/encapsulado dentro de una muestra de hormigón o cualquier otro material de base cementícea. Además, desde el punto de vista geométrico el encapsulado debe ser cilíndrico y hueco para escudar a la fibra en aquella región en la que se encuentre grabada la LPG permitiendo a su vez que la fibra se encuentre tensionada de la misma manera en la que fue realizado el ensayo de caracterización de la respuesta a la variación de HR.

Asumidos estos lineamientos básicos de diseño, se propuso la evaluación de un encapsulado de forma tubular (dentro del cual la fibra óptica se encuentre inserta) con un arreglo de orificios que permitan el intercambio de aire húmedo entre el exterior y el interior (y viceversa) por difusión.

4.4.1. Diseño conceptual del encapsulado

El encapsulado implementado consistió en un tubo de fibra de carbono (de la firma Awa International). Sobre la superficie del mismo se implementó un arreglo lineal de 9 orificios de 1 mm de diámetro y distanciados entre sí en aproximadamente 6 mm. La principal función de éstos fue proveer un canal de intercambio que permitió el movimiento de aire humedecido a través del encapsulado. La mecanización de los orificios fue realizada mediante técnicas manuales. La validación del funcionamiento de los orificios, como canales de difusión del aire humedecido/seco, fue comprobada experimentalmente [20].

La Figura 4. 14 muestra un diagrama en el que se describe gráficamente el concepto del encapsulado. El trazo continuo negro representa la fibra óptica enhebrada en el objeto cilíndrico que simboliza la existencia del tubo de fibra de carbono. Aproximadamente en el centro del cilindro se observa una serie de segmentos verticales que cortan al trazo negro simbolizando la existencia de la LPG (con el *coating* sensibilizante depositado sobre su superficie). Puede verse que la LPG se encuentra ubicada longitudinalmente cerca del patrón de orificios para que el contacto con el aire que los atraviesa sea inmediato.

En la figura se aprecia la inclusión de dos elementos que ofician de sellos (tapones) en los extremos y de una termocupla (TC). La existencia de la TC será justificada en las secciones siguientes. En el esquema, los terminales de la TC atraviesan al sello izquierdo con el propósito de permitir el acceso eléctrico a la misma desde el exterior.

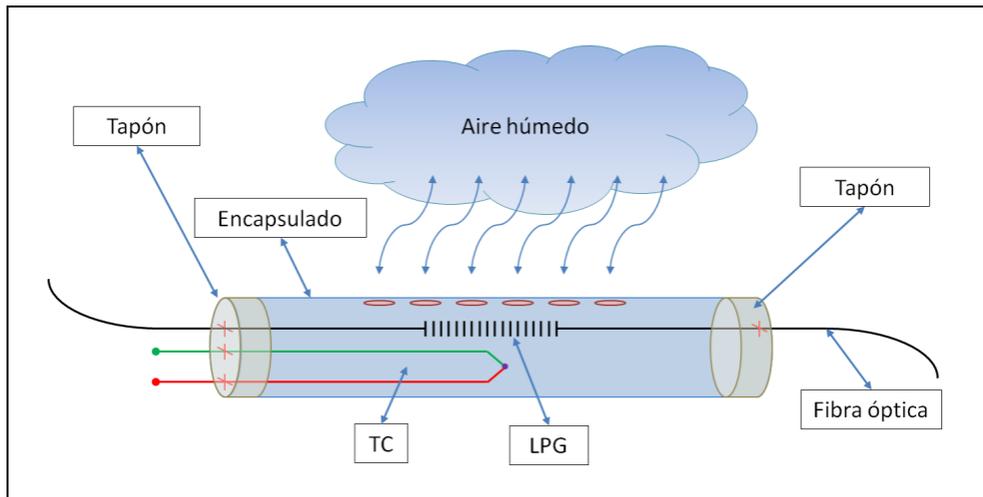


Figura 4. 14. Diagrama conceptual del encapsulado implementado.

4.4.2. Descripción geométrica

Las características dimensionales del encapsulado diseñado son las siguientes (ver Figura 4. 15):

- Diámetro interno: $(4,0 \pm 0,2)\text{mm}$
- Diámetro externo: $(6,0 \pm 0,2)\text{mm}$
- Longitud: $(100,0 \pm 0,1)\text{mm}$

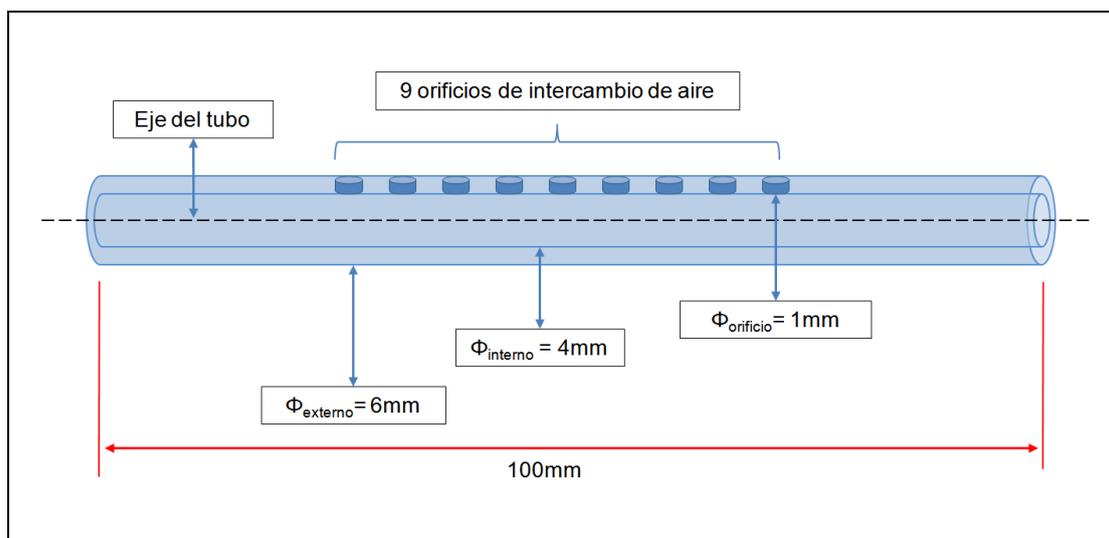


Figura 4. 15. Características dimensionales del tubo.

4.4.3. Sellos laterales (tapones)

Una vez enhebrada la fibra óptica en el tubo, se procedió a su fijación en ambos extremos mediante la aplicación de un pegamento epoxi de fraguado rápido. Esto permitió la formación de masas que actuaron a modo de tapones (uno en cada extremo) cuya función fue la de impedir el ingreso de líquido a través de las aberturas situadas en los extremos del tubo durante el proceso de embebido del sensor en el material cementíceo en estado fresco. La sujeción de la fibra óptica se realizó asegurando que ésta estuviera lo mas alineada posible con el eje del tubo (este proceso fue ejecutado en forma manual). Debido a que la respuesta espectral del LPG es sensible a la deformación axial sufrida por la fibra óptica, se aplicó pegamento mientras la fibra se mantuvo sometida a una tensión mediante un sistema de polea/masa para mantener constantes las condiciones de tracción. La tensión producida (tensión de referencia) tuvo como objetivo reproducir las condiciones establecidas durante el ensayo de caracterización de la LPG a la variación de HR. La Figura 4. 16 muestra el arreglo físico implementado para realizar el proceso de aplicación de pegamento en los extremos del encapsulado.

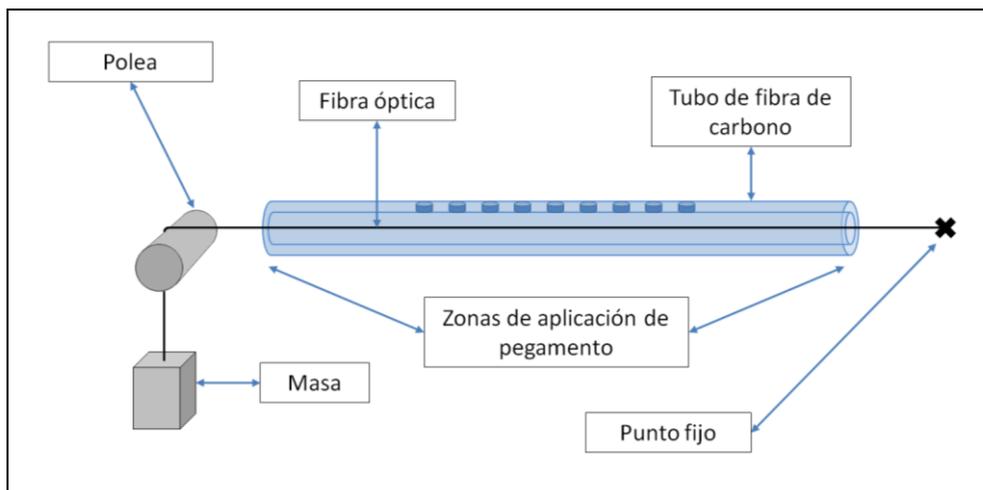


Figura 4. 16. Arreglo físico implementado para realizar el proceso de aplicación del pegamento en los extremos del encapsulado.

4.4.4. Termocupla (TC)

Dentro del encapsulado fue incluida una termocupla del tipo T (como muestra la Figura 4. 14) construida mediante la unión de dos filamentos de cobre y constantán respectivamente. La unión fue realizada a través de una soldadura típica en el campo de la electrónica usando un soldante basado en estaño/plomo en proporciones 60% / 40% respectivamente. El principal propósito de la inclusión de la TC fue el de usarla para la determinación de la temperatura del aire en el entorno cercano a la LPG (es decir, dentro del encapsulado). Las termocuplas tipo T son aptas para ser empleadas en ambientes húmedos. Esta implementación brindó la posibilidad de realizar la

desafectación térmica de los datos previniendo el caso en el que exista una variación de temperatura que afecte a la respuesta espectral de la LPG.

Para usar a la TC como elemento sensor de temperatura se procedió a realizar un ensayo con el objetivo de determinar la curva de calibración de la misma. Para ello se implementó el arreglo experimental mostrado en la Figura 4. 17. Éste consistió en excitar térmicamente a la juntura sensora alcanzando diferentes temperaturas, y medir la fuerza electromotriz inducida por efecto Seebeck mediante el uso de un microvoltímetro de laboratorio de la firma Hewlett Packard (modelo HP34401A). La estabilización térmica se alcanzó mediante el empleo de un controlador y una platina con un actuador basado en una celda Peltier de la firma TE Technology Inc. (modelo CP-200HT).



Figura 4. 17. Arreglo experimental montado para determinar la curva de calibración de la TC.

La Figura 4. 18 muestra el detalle del apoyo y la instalación de la TC sobre la platina térmica. Para aislarla eléctricamente de la platina se utilizó un envoltorio de cinta Kapton (que es apta para soportar las temperaturas del rango usado durante la ejecución del ensayo). Ésta permitió adherir fielmente la TC a la platina propiciando un contacto térmico apropiado (se despreció el aumento en la resistencia térmica de la interfaz entre la superficie de platina y la TC debido a la inserción de la cinta Kapton).

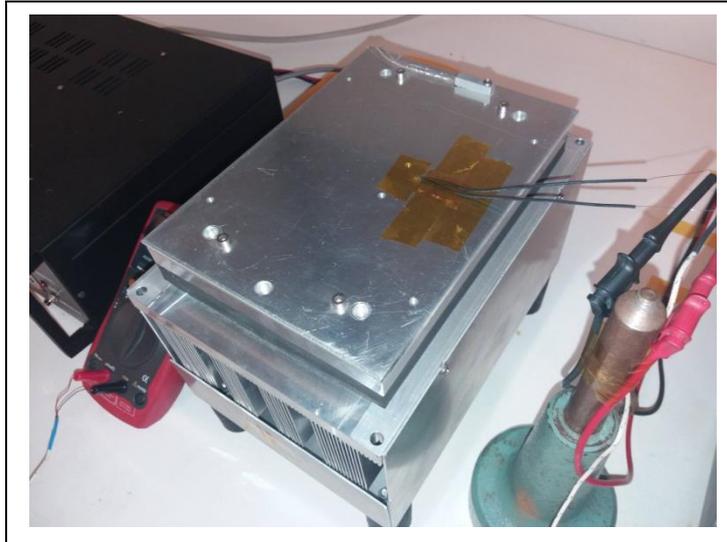


Figura 4. 18. Detalle de la instalación de la TC sobre la platina térmica para la ejecución del ensayo de caracterización.

Se realizaron medidas en cuatro puntos de estabilización térmica de la platina. La Figura 4. 19 muestra los puntos experimentales obtenidos durante el ensayo. Los mismos vinculan a la fuerza electromotriz inducida en bornes de la TC y a la temperatura inductora (impuesta por la platina térmica). Se muestra un ajuste lineal con su respectivo coeficiente de bondad.

Conforme a los resultados de este ensayo, la sensibilidad de la TC construida fue de $39,6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

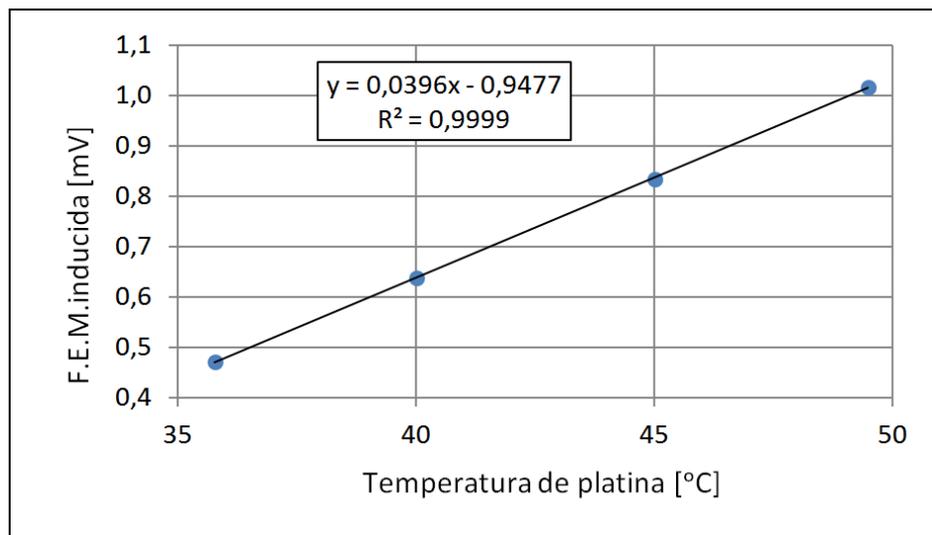


Figura 4. 19. Fuerza electromotriz inducida por efecto Seebeck en los terminales de la TC vs. la temperatura de la platina.

4.4.5. Configuración física alcanzada en la fase 2

La Figura 4. 20 muestra cómo luce el sensor presentado con el encapsulado de fibra de carbono. Se aprecian los dos cables de acceso al puerto de lectura de la TC ubicados en el extremo izquierdo del encapsulado (cables negro y rojo). En ambos extremos se observan los sellos de pegamento epoxi y los ingresos de fibra óptica. Con el objetivo de propiciar una protección mecánica apropiada al resto de la fibra óptica se utilizaron vainas plásticas (en amarillo) en ambos puertos de acceso.

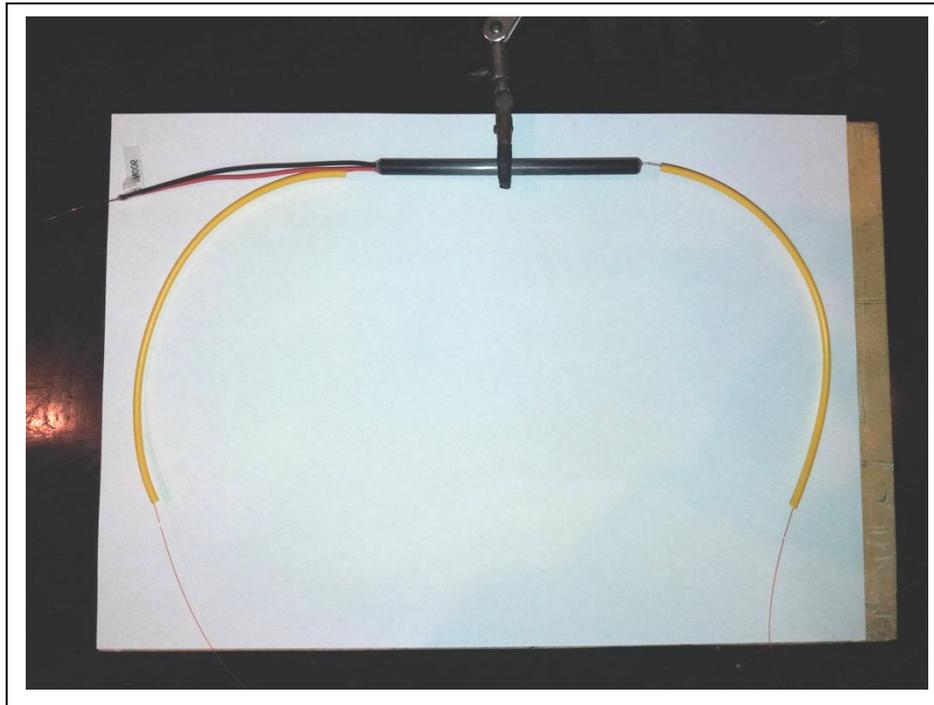


Figura 4. 20. Configuración física final del sensor experimental de HR.

4.6. Referencias

- [1] *Hygrometric Assessment of Internal Relative Humidity in Concrete: Practical Application Issues*. José L. Granja, Miguel Azenha, Christoph de Sousa, Rui Faria and Joaquim Barros, 2014, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 12, pp. 250 – 265.
- [2] *Introducción a la durabilidad y patología de las estructuras de hormigón armado*. L.P. Traversa y Y. A. Villagrán Zaccardi, 2010.
- [3] *Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials*. Baroghel-Bouny, V., Mainguy, M., Lassabatere, T. and Coussy, O., 1999, *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1225 1238.

- [4] *Recent Developments in Fiber Optics Humidity Sensors*. Ascorbe, J., Corres, J., Arregui, F., & Matias, I., 2007, *Sensors*, 17(4), 893. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s17040893>
- [5] *A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications*. Barrias, A., Casas, J., & Villalba, S., 2016, *Sensors*, 16(5), 748. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/s16050748>
- [6] *Development of optical fibre humidity sensors for assessing the quality of housing insulation materials*. Wang, Y., Sun, T., Fabian, M., Grattan, K. T., Forman, T., & Mutschler, R., 2016, In 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) (pp. 1-3). IEEE.
- [7] *Long-period fiber grating moisture sensor with nano-structured coatings for structural health monitoring*. S. Zheng, 2015, *Struct. Heal.Monit.*, vol. 14, no. 2, pp. 148 – 157.
- [8] *Mode transition in high refractive index coated long period gratings*. A. Cusano et al., 2006, *Opt. Express*, vol. 14, no. 1, pp. 19 – 34.
- [9] *Micro and nanostructured materials for the development of optical fibre sensors*. C. Elosua et al., 2017, *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, pp. 2312 – 2350.
- [10] *Detection and determination of manganese concentration in water using a fiber Bragg grating coupled with nanotechnology*. J. F. Akki, A. S. Lalasangi, K. G. Manohar, P. Raikar, T. Srinivas, and U. S. Raikar, 2011, *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 32, pp. 6033 – 6038.
- [11] *Development and study of anodic Ti/TiO₂ electrodes and their potential use as impedimetric immunosensors*. A. G. Mantzila and M. I. Prodromidis, 2006, *Electrochim. Acta*, vol. 51, no. 17, pp. 3537–3542
- [12] *Long period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles for corrosion monitoring*. Y. Huang, Z. Gao, G. Chen, and H. Xiao, 2013, *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 7.
- [13] *Polarization changes at Lyot depolarizer output for different types of input beams*. J. Carlos Gonzalez De Sande y Gemma Piquero, 2012, *Journal of the Optical Society of America*, DOI: 10.1364/JOSAA.29.000278
- [14] *Asymmetric transverse-load characteristics and polarization dependence of long-period fiber gratings written by focused CO₂ laser*. Y. Wang, D. N. Wang, W. Jin and Y. Rao, 2007, *Applied Optics*, vol. 46, no. 16.
- [15] *Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings*. B. Bachim and T. Gaylord, 2003, *Applied Optics*, vol. 42, no. 34.
- [16] *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. Lewis Greenspan, 1977, *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry*, Vol. 81 A, No.1.

[17] *Monitoring Ingress of Moisture in Structural Concrete Using a Novel Optical-Based Sensor Approach*. T. L. Yeo, M. A. C. Cox, L. F. Boswell, T. Sun, and K. T. V. Grattan, 2006, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 45, pp. 186 – 192.

[18] *Optical Fiber Relative Humidity Sensor Based on a FBG with a Di-ureasil Coating*. S. F. H. Correira, P. Antunes, E. Pecoraro, P. P. Lima, H. Varum, L. D. Carlos, R. A. S. Ferreira, and P. S. André, 2012, *Sensors*, vol. 12, pp. 8847 – 8860.

[19] https://www.hbm.com/es/4599/sensores-de-fibra-optica-newlight/?product_type_no=newLight

[20] *Packaging Design Assessment for an Experimental Fiber Optic Humidity Sensor Embeddable in Concrete Structures*. D. H. Alustiza, M. Mineo, N. A. Russo, A. López, Y. A. Villagrán Zaccardi, 2022, *IEEE Xplore Digital Library*, DOI: 10.1109 / ARGENCON55245.2022.9939756.

5. Fase experimental III. Ensayos en pasta de cemento

5.1. Comentarios previos

Con el objetivo de comprobar la factibilidad de implementar OFSs del tipo LPGs en sistemas embebidos de monitoreo de HR interna en estructuras de hormigón, en este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas en las que se sometió al sensor experimental descrito en el Capítulo 4 a un ambiente de servicio similar al que se verifica dentro de una estructura de hormigón real. La meta establecida en esta fase del Plan de Tesis fue la de validar el concepto de uso de LPGs como elemento sensor en la medición de HR. El diseño propiamente dicho y formal de un sensor basado en LPGs no es un objetivo declarado en el Plan. Por este motivo determinados aspectos tecnológicos relativos a la implementación del sensor son susceptibles de perfeccionamiento. Es decir, el propósito de este capítulo es presentar los datos obtenidos que demuestran el correcto funcionamiento del sensor experimental de HR cuando éste se encuentra embebido dentro del material. En el contexto de este manuscrito se entiende por “correcto funcionamiento” al hecho de que el sensor se comporte dentro de los márgenes y lineamientos verificados en fase de prueba y caracterización, una vez que éste se encuentre dentro del material cementíceo.

En esta fase experimental se sometió al sensor a las condiciones de funcionamiento imperantes luego de ser embebido en una probeta de pasta de cemento (PDC) cuya dosificación es descrita posteriormente en este capítulo. Se realizaron maniobras y prácticas que respondieron a dos estrategias de avance, siendo la segunda de ellas promovida por la aparición de restricciones experimentales eventuales que interrumpieron la ejecución de la estrategia inicialmente establecida para la realización de los ensayos. Las dos estrategias son descriptas brevemente a continuación:

- Estrategia de avance 1: fue la inicialmente planteada para cumplir con el conjunto de actividades asociadas a la fase experimental final del Plan de Tesis. Se planificó someter al sensor experimental a pruebas en las que estando éste embebido en una probeta prismática de PDC, se humedezca el ambiente del entorno de la probeta en forma controlada utilizando la cámara de HR. El ensayo planteado consistió en el relevo del corrimiento espectral del pico de atenuación del transductor LPG causado por la variación del nivel de humedad interna de la probeta. Como elemento de referencia para la determinación de la HR interna de la probeta se usaría un sensor comercial DHT22 [1] acondicionado para que soporte el hecho de funcionar dentro de la probeta de PDC. Las mediciones del sensor comercial serían consideradas como los valores de referencia de HR interna del prisma en la zona en la que tal sensor sería instalado.
- Estrategia de avance 2: fueron mantenidas las premisas mencionadas en la estrategia 1 en lo que a propósitos se refiere, pero la forma de someter a prueba al sensor experimental fue modificada en función de las situaciones emergentes observadas en la práctica operativa llevada adelante durante la realización de la estrategia 1. Éstas, si bien dificultaron la aplicación de la misma, permitieron el acceso a una serie de lecciones aprendidas que realimentaron el diseño de la estrategia.

Con el fin de presentar los resultados de esta fase experimental, en este capítulo se brinda en forma cronológica la descripción de cada línea de trabajo realizada al abordar ambas estrategias de avance. También se explican las causas que produjeron la modificación de la estrategia 1 para dar origen a la estrategia 2.

5.2. Estrategia de avance 1

5.2.1. Instalación del sensor experimental en la probeta de mezcla cementícea

Para brindar un adecuado soporte mecánico al sensor que lo mantenga inmóvil durante el proceso de volcado de la PDC en el molde a usarse, se diseñó una estructura de sostén. Ésta ofició de esqueleto que mantuvo al sensor de fibra óptica en la posición requerida durante la etapa mencionada. También brindó una gran facilidad en lo que a manipulación del sensor experimental se refiere, mejorando la seguridad con la que se gestionó el manejo manual del ensamble. Tal estructura fue llamada “caballete”.

La Figura 5. 1 muestra la implementación final y el detalle dimensional del caballete. Todas las piezas fueron mecanizadas a partir de una lámina de acrílico translúcido de 2mm de espesor, usando un sistema industrial de corte láser de CO₂ (de la firma Mazak).

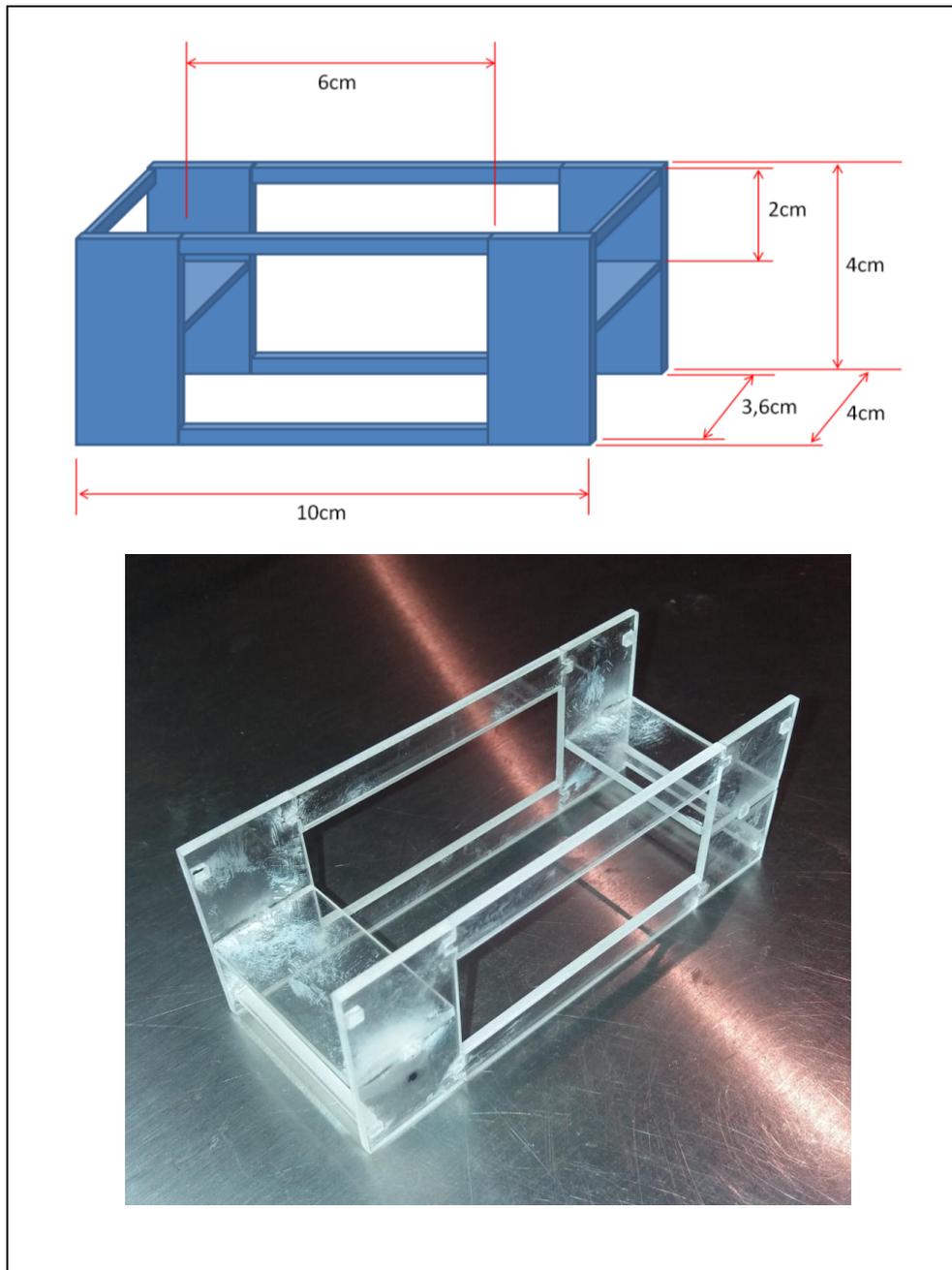


Figura 5. 1. Estructura de soporte del sensor para su manipulación (caballete).

El encapsulado del sensor fue ubicado sobre el caballete usando como asiento a las dos superficies horizontales de los extremos de éste como muestra la Figura 5. 2.

Para adherir el encapsulado cilíndrico a las superficies de apoyo del caballete se empleó pegamento epoxi de fraguado rápido.

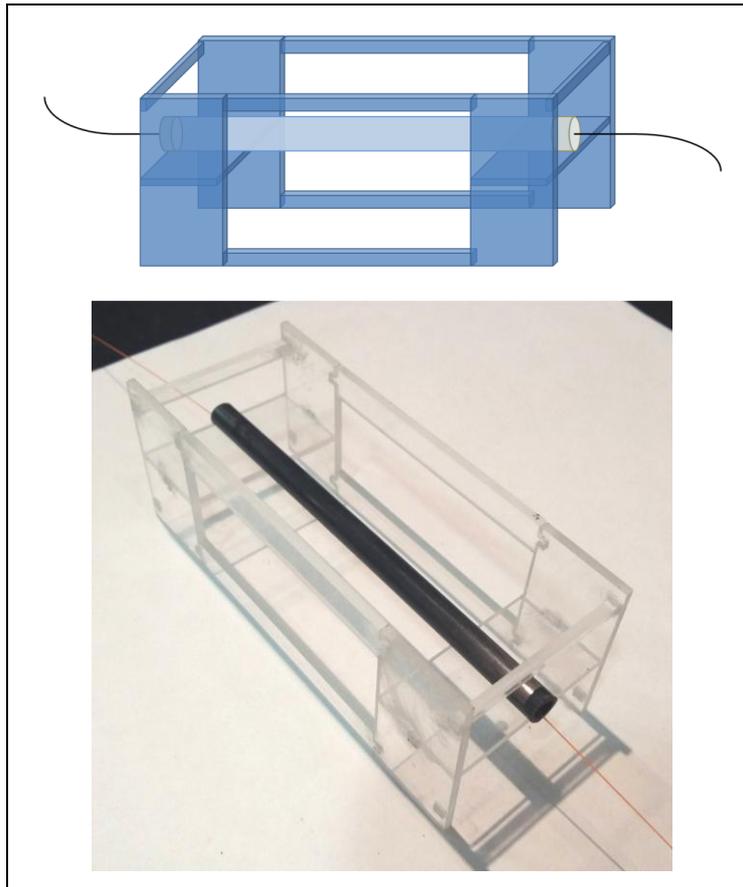


Figura 5. 2. Ubicación del sensor sobre el caballete.

El caballete fue diseñado para ser usado en moldes de probetas prismáticas de 4cm*4cm*16cm. La Figura 5. 3 muestra la posición del caballete con el sensor dentro de una probeta de PDC. Se observa la posición de los dos puertos de acceso de fibra óptica del sensor (en trazo continuo negro). El posicionamiento del caballete dentro del molde es tal que el eje del encapsulado del sensor coincide aproximadamente con el eje de la probeta.

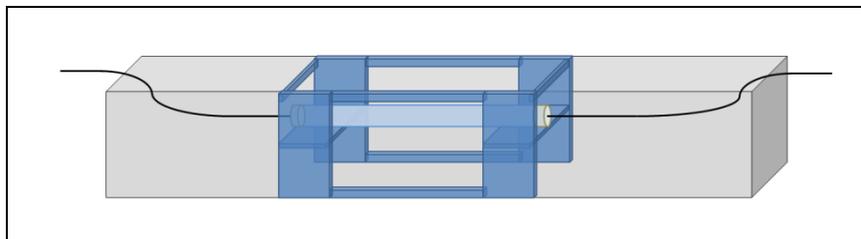


Figura 5. 3. Ubicación del caballete dentro de la probeta de PDC.

Como previamente fue mencionado y, con el objetivo de referenciar las mediciones espectrales del sensor experimental con valores de HR, se ubicó un sensor DHT22 sobre el encapsulado de fibra de carbono como muestra la Figura 5. 4. Para fijar

el DHT22 al encapsulado se empleó pegamento epoxi de fraguado rápido. Este sensor cuenta con una serie de rendijas y una grilla de orificios frontal para permitir el intercambio gaseoso entre la zona en la que se encuentra el elemento sensible del sensor y el ambiente exterior. Las rendijas laterales fueron selladas y los orificios frontales también salvo una hilera que fue ubicada dentro del prisma de PDC en igual orientación y profundidad que el patrón de orificios del encapsulado del sensor experimental. De esta manera se equalizaron las condiciones de medición de ambos sensores (sensor de referencia y sensor experimental).

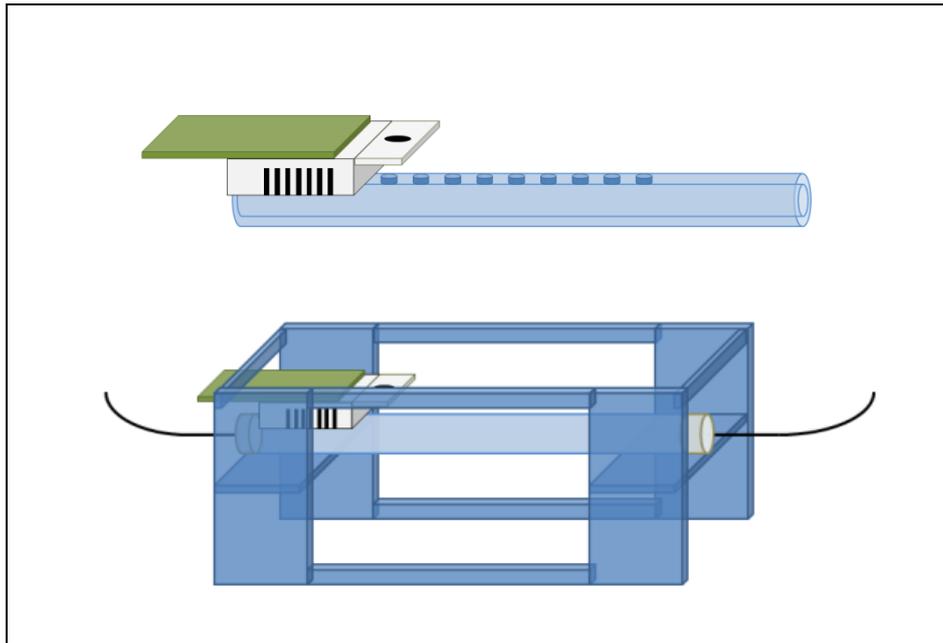


Figura 5. 4. Montaje del sensor comercial usado como referencia.

La Figura 5. 5 muestra el montaje real del ensamble. Se observan los cables de interrogación de la TC (cables negro y rojo), los puertos de fibra óptica (con vaina amarilla), el sensor comercial DHT22 (con sus cables de alimentación e interrogación) tomado como elemento de referencia, el encapsulado de fibra de carbono y el caballete.

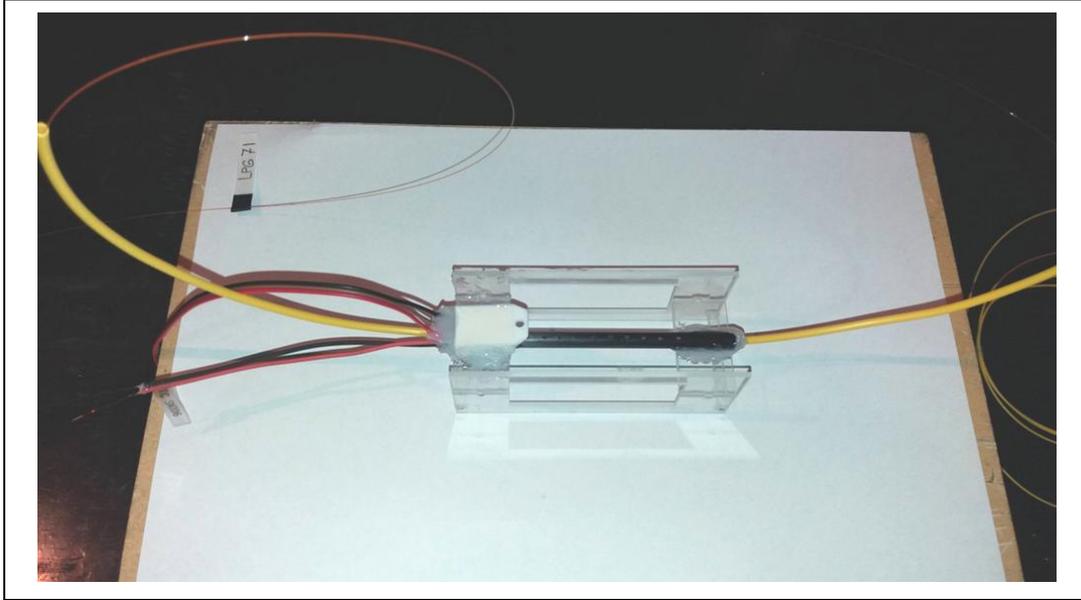


Figura 5. 5. Ensamble sensor experimental/DHT22/caballote.

En la Figura 5. 6 se muestra un ensamble ubicado en uno de los espacios de un molde triple. Nota: en tal figura se muestran fotografías asociadas a uno de los intentos que se realizaron para embeber el sensor en PDC. En dicho intento la vaina amarilla de protección de la fibra óptica de los puertos de entrada y salida, no se había implementado aún.

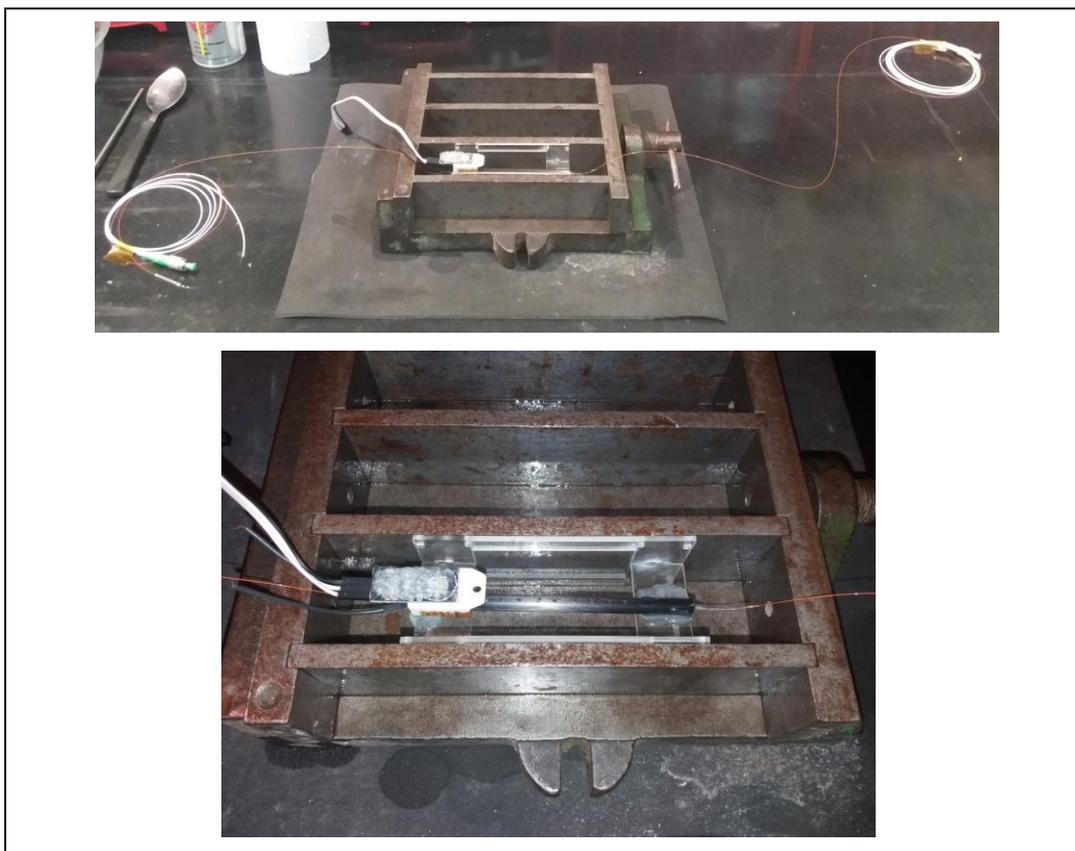


Figura 5. 6. Ensamble ubicado en un molde triple.

5.2.2. Preparación de la probeta de PDC

Tanto los materiales empleados para la preparación de la probeta como los elementos y herramientas a ser usados, fueron provistos en su totalidad por el Grupo de Tecnología del Hormigón del LEMIT. En la Tabla 5. 1 se brindan las características fundamentales del proceso de preparación de la probeta.

Tabla 5. 1. Preparación de la probeta.

Forma de la probeta	prismática
Dimensiones	4cm * 4cm * 16cm
Material	PDC
Relación a/c	0,5
Cantidad preparada de material	0,720 litros (teniendo en cuenta un factor de seguridad de 1,2 a modo de resguardo por posibles desperdicios/derrames).
Masa de cemento (m_c)	600g
Masa de agua (m_a) <small>Nota: se usó agua destilada</small>	300g
Tipo de cemento	CPF40

Tiempo de mezclado	8 minutos aproximadamente
Temperatura del agua usada para preparar la mezcla	Entre 19°C y 21°C
HR ambiente durante el proceso de preparación de la probeta (mezclado y volcado)	Entre 54% y 56%
Temperatura ambiente durante el proceso de preparación de la probeta (mezclado y volcado)	Entre 27°C y 28°C
Temperatura de la PDC antes de volcarse en el molde	29,1°C

La técnica de mezclado del cemento y agua fue manual. Durante este proceso se monitoreó tanto la temperatura como la HR del ambiente del laboratorio en el que se ejecutó la práctica operativa.

Antes de realizar el volcado de la mezcla en el molde se lubricaron sus paredes para facilitar el proceso del desmolde del prisma una vez alcanzado el estado endurecido. El producto lubricante usado fue WD40.

El volcado fue realizado en dos pasos. El primero consistió en volcar la pasta en estado fresco llenando hasta la mitad de la altura del molde. Luego de alcanzar tal nivel, se sometió el molde a dos *shocks* mecánicos suaves con el objetivo de que la mezcla se escurra en el volumen del molde ocupando los intersticios y espacios libres. La segunda fase consistió en continuar el llenado del molde hasta que se complete el volumen total del mismo con la mezcla de PDC.

Para la preparación de la mezcla, se utilizó una relación a/c de 0,5 con el objetivo de alcanzar la formación de una moderada a alta cantidad de poros capilares, caracterizados por su gran volumen y por estar fuertemente conectados entre sí. De esta manera se pretendió que la estructura de poros y canales faciliten el ingreso de aire humedecido al seno de la probeta por difusión natural, acotando los tiempos involucrados para la ejecución de los ensayos de esta fase experimental. Según la literatura explorada y desde el punto de vista analítico, si se considera un capilar cuyo modelo geométrico se asimile a una forma cilíndrica, el fenómeno de difusión ocurre sin que el radio del canal influya en el proceso siempre y cuando las dimensiones que definen a tal canal sean mucho mayores al recorrido medio de las moléculas de agua. En estas condiciones el proceso de difusión dentro del cuerpo bajo estudio responde a la primera ley de Fick [2].

La Figura 5. 7 muestra la probeta con el ensamble embebido en la PDC preparada en estado fresco, correspondiente a uno de los intentos realizados.



Figura 5. 7. Molde con la preparación en estado fresco. Se observan los accesos de los puertos de fibra óptica, los cables de la TC y el sensor de referencia.

El cemento utilizado fue del tipo CPF40 cuyas principales características son mostradas en la Tabla 5. 2.

Tabla 5. 2. Características fundamentales del cemento usado.

Densidad	3,01g/cm ³
Finura (determinada a partir de la prueba de permeabilidad al aire utilizando un permeámetro Blaine)	490m ² /kg
Cantidad de partículas retenidas en el tamiz de 75µm	1,5%

La Tabla 5. 3 muestra la composición química del cemento usado.

Tabla 5. 3. Composición química.

Filler	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	LOI
LPC	63.67	18.55	3.14	3.02	ND	1.57	1.59	0.61	0.22	ND	9.2

Previo al desmolde la mezcla reposó durante 7 días habiendo sido cubierta la zona superior del molde con un film de nylon para ralentizar la deshumidificación y evitar fisuras en la probeta. Transcurrido este tiempo se procedió a la acción de desmolde para la obtención del prisma sin mayor dificultad en todos los intentos realizados.

5.2.3. Descripción del ensayo

Se ubicó al prisma dentro de la cámara de humedad. La idea inicial de este arreglo fue la de generar un aumento paulatino del nivel de humedad del ambiente interno de la cámara y registrar las mediciones del sensor de referencia y las del sensor experimental. En este arreglo, la notebook también exhibió las mediciones del sensor de referencia ubicado dentro del prisma de PDC bajo ensayo. Para la interrogación espectral del sensor experimental se usó el OSA (Yokogawa) disponible en el laboratorio de Fibras Ópticas del CIOp. La Figura 5. 8 muestra el arreglo experimental utilizado. En este punto cabe mencionar que la cámara de humedad que aparece en esta Figura es una versión preliminar de la descrita en la Sección 4.2.3.1. de esta Tesis. Justamente, a partir de los resultados obtenidos empleando esta cámara se hicieron las modificaciones que condujeron a la versión mejorada descrita en 4.2.3.1.

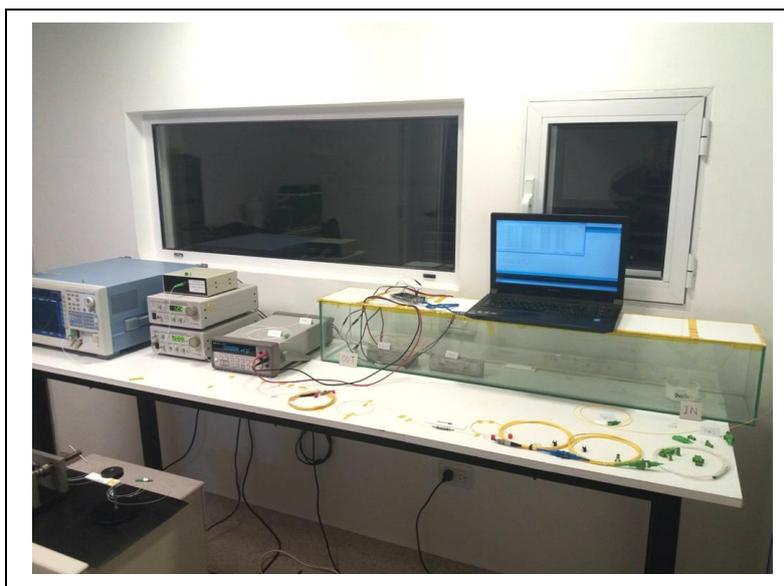


Figura 5. 8. Arreglo experimental montado para la realización del ensayo siguiendo la estrategia 1.

5.2.4. Resultados y discusión preliminar de la estrategia 1

La estrategia 1 fue planteada sobre la base de lograr el cumplimiento de condiciones experimentales: 1) que el sensor comercial tomado como referencia funcione dentro del prisma de PDC luego del proceso de volcado de la pasta en estado fresco en el molde (el sensor DHT22 es de naturaleza electrónica y por ende no es compatible al contacto directo con el agua); y 2) que el encapsulado implementado (del sensor experimental bajo estudio) funcione conforme a lo previsto una vez embebido dentro del prisma de PDC soportando las solicitudes mecánicas emergentes durante la evolución del curado, y manteniendo inalteradas la condición de estrés mecánico general de la estructura que contiene a la LPG en su interior (para que el comportamiento espectral de la LPG luego de ser embebida en la probeta, no cambie fuertemente respecto del registrado en la etapa de caracterización).

Antes de comenzar el ensayo propiamente dicho y durante la fase de verificación del correcto funcionamiento de cada bloque del arreglo experimental, se observó la condición 1) no fue verificada por más que el sensor DHT22 fue encapsulado con un sellado plástico a fin de prevenir el ingreso de agua a sus zonas sensibles. En específico, el sensor DHT22 dejó de comunicar la medición de HR a la placa Arduino que lo interrogaba a través de su interfaz digital, probablemente debido al ingreso de agua dentro del mismo ante la falla del sellado durante la etapa del volcado de la pasta de cemento en el molde.

Respecto de la condición 2) se verificó que unas horas luego del desmolde, la luz inyectada al puerto de entrada del sensor experimental no alcanzó el puerto de salida, evidenciando la interrupción del circuito lumínico. Posteriormente se comprobó que la fibra óptica se averió cortándose en un punto interno del encapsulado. A este respecto se especula que al humedecer el tubo de fibra de carbono éste sufrió una expansión debido a la absorción de agua (hinchamiento). Esta inestabilidad dimensional del tubo de fibra de carbono al ser puesto en contacto con la PDC en estado fresco, produjo que la fibra se vea sometida a una tensión superior al límite de rotura (recordar que los extremos del tramo de fibra óptica fueron solidarizados con los extremos del tubo de fibra de carbono), sobre todo considerando que la reducción del diámetro (ahusamiento) de la fibra óptica en cada μ -taper de la LPG debilitó la resistencia mecánica a la tracción de la fibra.

El acaecimiento de los dos eventos mencionados interrumpió la ejecución del ensayo. Esto causó que sea reformulada la estrategia 1 para la evaluación de la factibilidad de uso del sensor experimental, dando origen a la estrategia 2 como fue mencionado en la sección 5.1.

5.3. Estrategia de avance 2

Si bien los objetivos primarios del ensayo no fueron alterados en la puesta en práctica de la estrategia 2 respecto de la 1, existieron diferencias de implementación orientadas a solventar los problemas detectados.

En los preparativos de la implementación de la estrategia 1, el mal funcionamiento del sensor de referencia ubicado dentro de la probeta fue provocado por el ingreso de agua (durante el volcado de la PDC en estado fresco en el molde) hacia zonas interiores del mismo que no son capaces de soportarla. Se propuso entonces a modo correctivo, la colocación del sensor de referencia dentro del prisma, en una etapa posterior a la del volcado de la PDC en estado fresco. Dicho posicionamiento fue ejecutado estando la PDC en estado endurecido, lo cual garantizó que el sensor DHT22 no esté en contacto con agua líquida y consecuentemente no fue arriesgada la integridad de la electrónica interna de éste.

La segunda situación problemática a resolver fue el corte de la fibra óptica debido al esfuerzo de tracción que probablemente el encapsulado impuso sobre la fibra que contiene al transductor LPG. Dicho esfuerzo de tracción fue transferido a la fibra óptica a través de los dos puntos en los que ésta fue fijada al tubo de fibra de carbono. Como fue descrito en la Sección 4.3.3 los extremos del tubo del encapsulado fueron solidarizados a la fibra óptica mediante la aplicación de sellos hechos en base al uso de un adhesivo epoxi. Con el objetivo de eliminar la tensión mecánica transferida a la fibra se decidió no aplicar sellos que adhieran los extremos de la fibra a los extremos del encapsulado. Para evitar el ingreso de aire humedecido por las aberturas de los extremos del tubo hacia el interior del mismo se implementaron sellos que, respetando la hermeticidad requerida, no vincularon mecánicamente a la fibra óptica con el tubo de fibra de carbono. El material elegido para la conformación de los sellos fue grasa de litio. Ésta posee un gran poder de sellado por su excelente adherencia a casi cualquier superficie siendo a su vez altamente resistente a la absorción de agua.

Debido a que en este nuevo esquema de inserción de la fibra óptica dentro del tubo de fibra de carbono aquella quedó liberada de tensiones axiales, se tuvo que implementar un sistema basado en el uso de polea y masa para reproducir las condiciones de excitación mecánica presentes en tiempo de caracterización de la LPG empleada. A consecuencia de esto, el arreglo experimental fue reestructurado como se detallará en los próximos párrafos.

Finalmente, en la implementación del encapsulado usado en la estrategia 2 fue eliminado el uso de la TC debido a que se verificó en laboratorio que la estabilidad térmica del sistema bajo ensayo fue controlada con un ciclo límite menor al $0,01^{\circ}\text{C}$. Esta cota en las posibles variaciones térmicas implicó potenciales corrimientos en longitud de onda del pico de atenuación inferiores a $0,06\text{pm}$ (asumiendo una sensibilidad de $60\text{pm}/^{\circ}\text{C}$, valor típico en las unidades LPG fabricadas localmente).

Estos corrimientos por variación de temperatura representan un $0,1\%$ de los causados por el cambio de HR (en el rango de 40% a 80% aproximadamente y para un espécimen LPG típico), lo cual resultó despreciable. La estabilidad térmica alcanzada del arreglo experimental fue resultado de la implementación de mejoras que son detalladas en las siguientes secciones de este capítulo.

5.3.1. Instalación del sensor experimental en la probeta de mezcla cementícea

A fin de minimizar el tiempo de difusión del aire húmedo dentro de la probeta a ser ensayada, en la estrategia 2 se decidió emplear prismas de menor volumen que los inicialmente propuestos en la ejecución de la estrategia 1. Para ello se diseñó un molde que no sólo sea de menor envergadura que el estándar de 4cm*4cm*16cm usado previamente, sino que también cuente con la posibilidad de posicionar al encapsulado de la fibra óptica de forma tal que ésta pueda acceder al prisma por las caras de los extremos.

La Figura 5. 9 muestra un esquema donde se brinda detalle de la forma del molde diseñado y sus dimensiones.

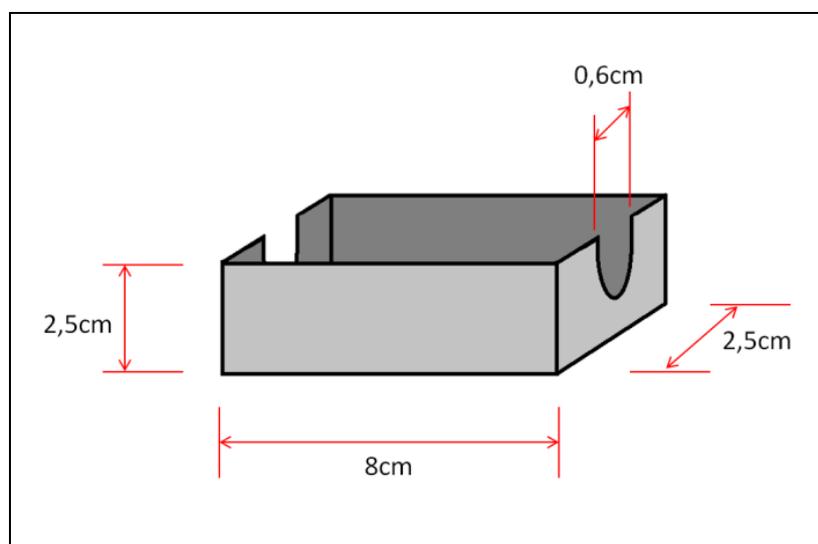


Figura 5. 9. Molde diseñado para la realización de las probetas prismáticas usadas en la estrategia 2.

El molde fue realizado en acero inoxidable a partir de una chapa de 0,7mm de espesor. La técnica constructiva consistió en realizar el corte de la chapa mediante el empleo de un láser de corte industrial (de la firma Mazak). Una vez obtenido el corte del desarrollo del molde personalizado, se procedió al plegado manual de la chapa para la conformación propiamente dicha del molde como muestra la Figura 5. 10.

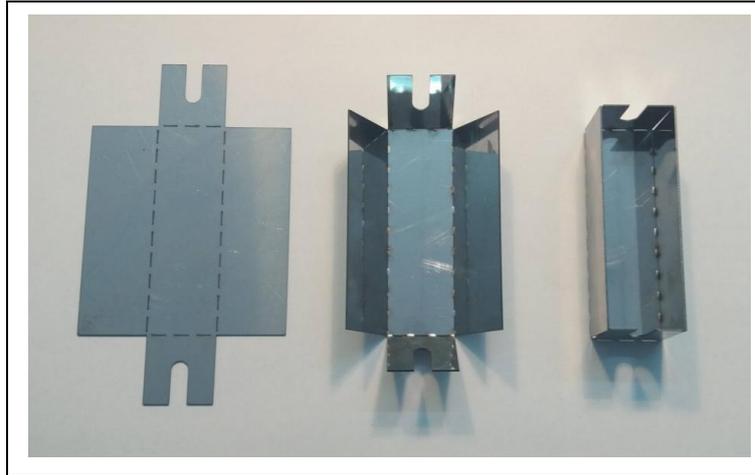


Figura 5. 10. Corte en chapa para la conformación del molde personalizado.

El troquelado del material base sobre las aristas del molde prismático facilitaron el plegado de la chapa. La distancia entre troqueles y el espesor de los mismos fueron ajustados en vistas a no debilitar a nivel estructural al molde durante el proceso de extracción del prisma de PDC en estado endurecido.

En la figura pueden observarse las comisuras ubicadas en los extremos del molde. Éstas están destinadas a alojar los extremos del encapsulado de fibra de carbono. La Figura 5. 11 muestra la forma de colocación del encapsulado del sensor experimental en el molde.

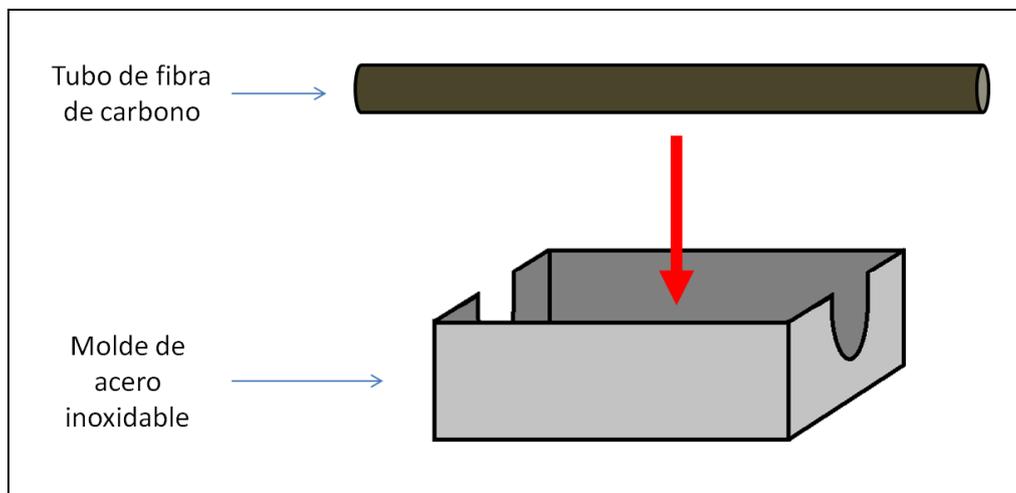


Figura 5. 11. Detalle de la colocación del encapsulado en el molde.

La Figura 5. 12 muestra el montaje del encapsulado en el molde previo al volcado de la PDC en estado fresco. Para evitar derramamientos de PDC por las comisuras durante el volcado, se colocaron cintas Kapton a modo de barrera y sello. En la figura se puede observar la grilla de los orificios de intercambio gaseoso sobre la superficie del

encapsulado. El tubo de fibra de carbono fue ubicado de modo que la hilera de los orificios fue apuntada a la cara superior del molde (cara abierta).

Las uniones de las aristas laterales del molde también fueron selladas de la misma manera. El uso de cinta Kapton permitió una fácil remoción de los elementos de sellado durante el proceso de desmolde del prisma.



Figura 5. 12. Presentación del encapsulado de fibra de carbono en el molde.

5.3.2. Preparación de la probeta de PDC

La mezcla usada para la preparación de la PDC respondió a la misma dosificación empleada en la estrategia 1. El procedimiento de mezclado de partes y volcado en el molde también fue similar al usado previamente. Las masas a usarse fueron inferiores debido al menor volumen del molde personalizado que fue necesario rellenar. El instrumento de medición de las masas tanto de agua como de cemento fue el mismo usado previamente. La Figura 5. 13 muestra una instancia previa al comienzo del proceso de mezclado y volcado.



Figura 5. 13. Instancia previa al proceso de mezclado y volcado de la PDC en el molde personalizado.

Con el objetivo de generar un asiento para la ubicación del sensor DHT22 empleado como referencia de HR dentro del prisma, fue ubicado un objeto de idénticas dimensiones y forma sobre el encapsulado del sensor experimental. Estando este objeto en posición se realizó el volcado de la mezcla propiciando que ésta rellene apropiadamente los intersticios. Una vez alcanzado el estado endurecido del material del prisma, fue removido este objeto dejando liberado un bajo relieve de dimensiones apropiadas para alojar un sensor DHT22 con su línea de orificios de intercambio gaseoso alineada con la del encapsulado del sensor experimental.

El proceso de curado se extendió por 14 días y fue realizado dentro de un recipiente de plástico y hermético como muestra la Figura 5. 14 a una temperatura ambiente que osciló entre 19°C y 21°C.

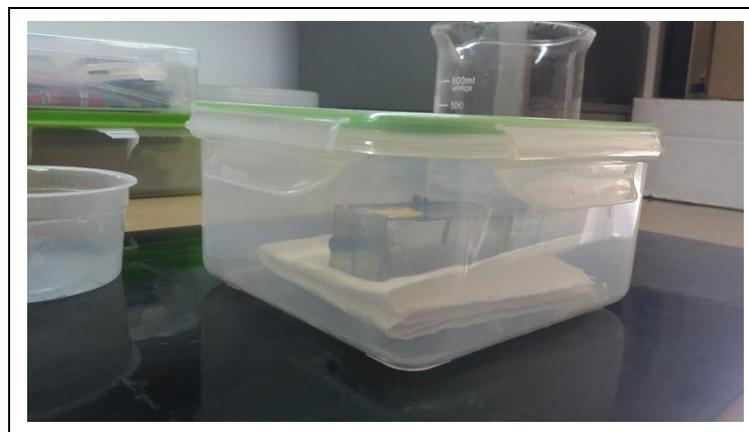


Figura 5. 14. Curado de la probeta personalizada.

La Figura 5. 15 muestra la cara superior del molde con la mezcla en estado endurecido. Se observa el bajorrelieve que fue destinado a alojar al sensor de referencia usado. En la figura el prisma aún no fue removido del molde apreciándose las cintas Kapton colocadas en las aristas para evitar el derrame lateral de líquido durante la fase de volcado.

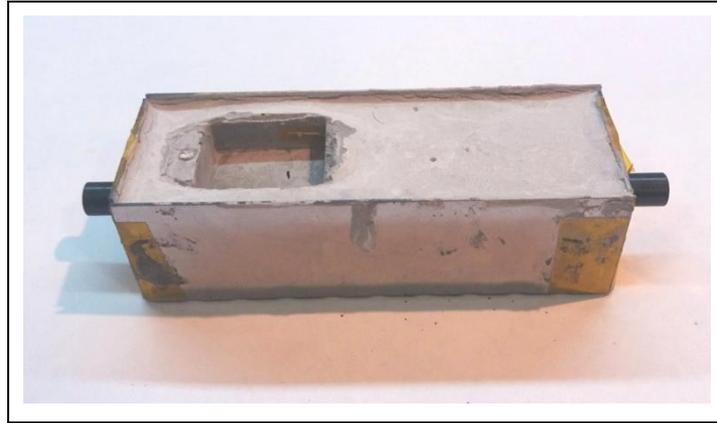


Figura 5. 15. Asiento bajo relieve para el sensor DHT22.

Para el desmolde de la probeta se flexionaron las paredes del molde hacia el exterior como muestra la Figura 5. 16. El prisma de PDC fue fácilmente removido debido al lubricante aplicado sobre las paredes internas del molde previo al volcado de la PDC en estado fresco. El molde fue utilizado en repetidas oportunidades verificándose un correcto estado de reutilización (no se observaron degradaciones superficiales ni roturas en las zonas troqueladas).



Figura 5. 16. Desmolde de la probeta.

5.3.3. Descripción del ensayo

La Figura 5. 17 muestra un esquema del arreglo experimental finalmente utilizado. Éste consistió básicamente en la reutilización del soporte tecnológico empleado para la caracterización del sensor experimental. En la figura se observa la implementación del sistema polea/masa para asegurar las mismas condiciones de tracción presentes durante la caracterización realizada en la fase experimental previa. Cabe aclarar que la figura no exhibe la presencia del sensor de HR que actuó como sensor de referencia (DHT22) colocado sobre el sensor experimental.

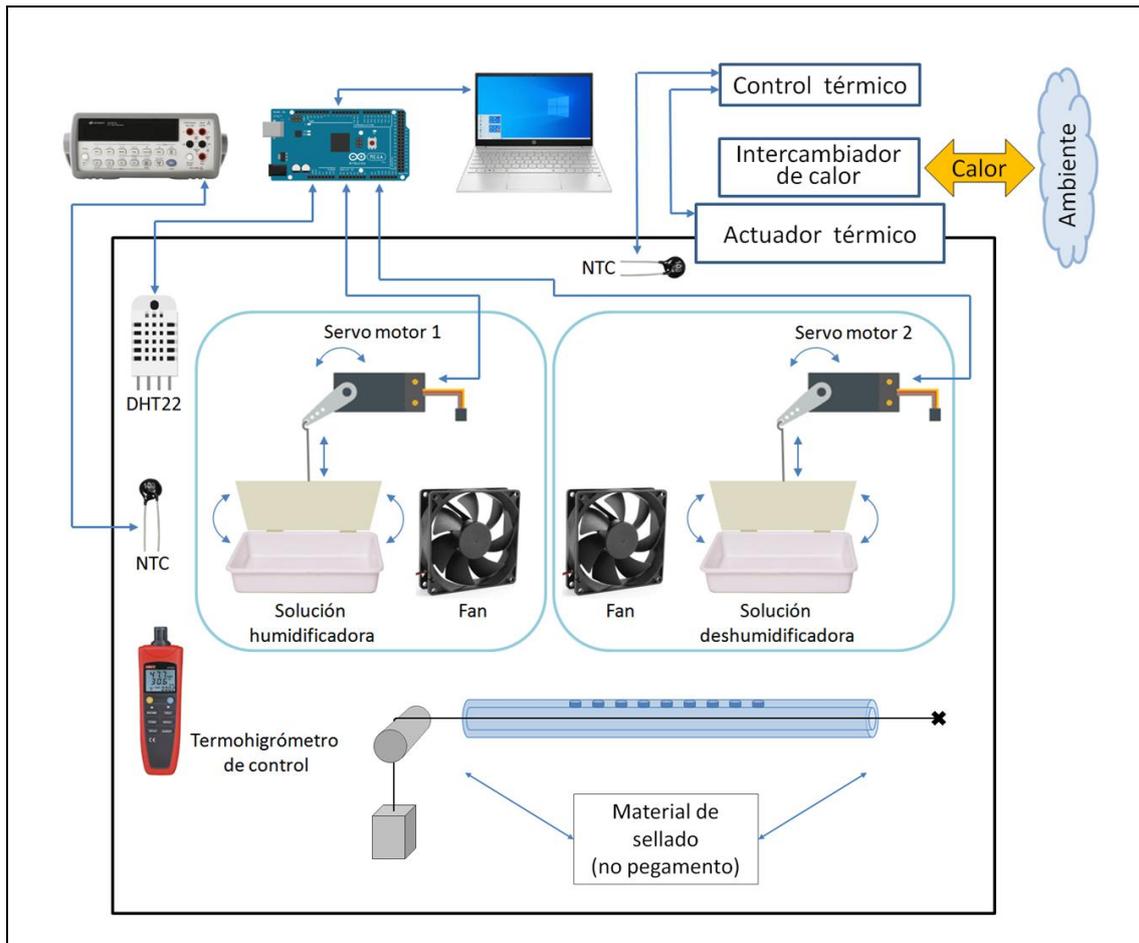


Figura 5. 17. Diagrama del arreglo experimental de la estrategia 2.

5.3.3.1. Colocación del sensor experimental dentro del encapsulado y montaje de la probeta dentro de la cámara de humedad

La colocación del sensor experimental consistió en la ejecución de los pasos descritos en los siguientes párrafos.

Paso 1. Se empalmó un tramo de fibra óptica terminado en un conector FC/PC (*pigtail*) a uno de los extremos del tramo de fibra (puerto de salida de luz) que contenía al sensor (ver Figura 5. 18). La lámina de acrílico blanca que se observa en la figura ofició de soporte para que el manejo de la LPG sea seguro y no comprometa la integridad de la misma ante potenciales movimientos bruscos no deseados.



Figura 5. 18. Sensor con conector FC/PC en un extremo (parcialmente conectorizado).

Paso 2. Se enhebró el tramo de fibra (usando el extremo sin conectorizar) por dentro del tubo de fibra de carbono (encapsulado) ya embebido dentro de la probeta de PDC (ver Figura 5. 19).

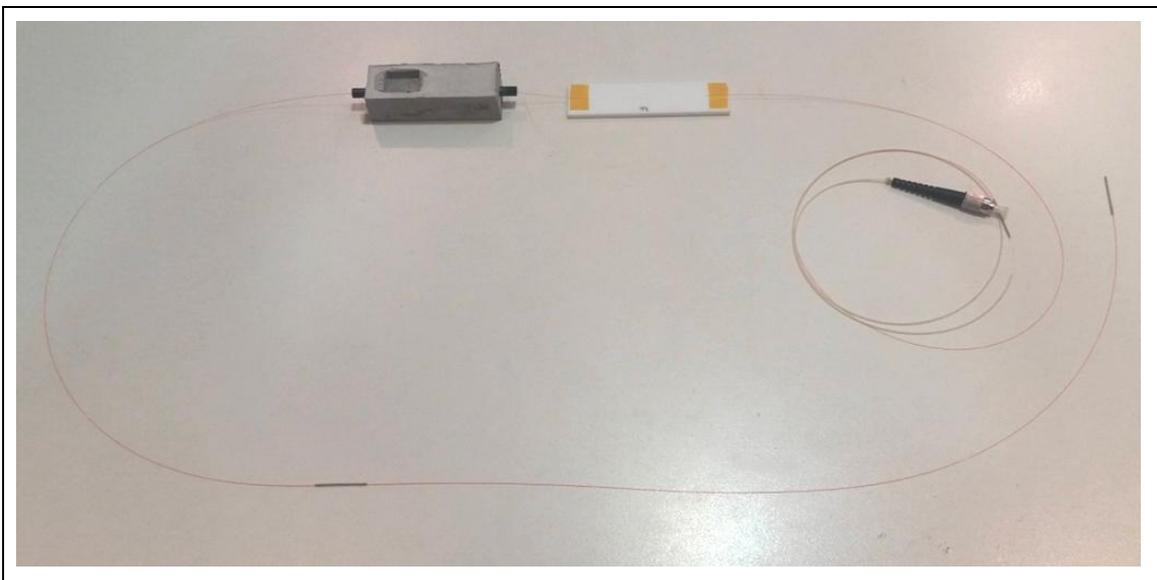


Figura 5. 19. Fibra óptica enhebrada en el encapsulado por el extremo no conectorizado.

Paso 3. Se empalmó un tramo de fibra óptica terminado en un conector FC/APC (*pigtail*) al extremo libre de la fibra que contenía al sensor (puerto de entrada de luz) (ver Figura 5. 20).

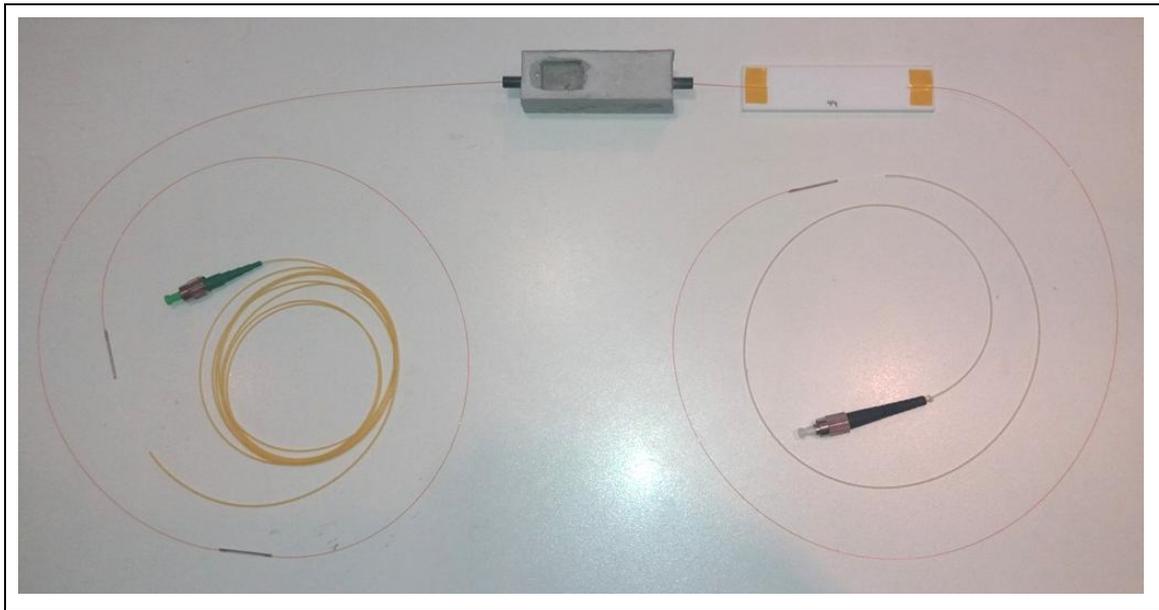


Figura 5. 20. Sensor plenamente conectorizado.

Paso 4. Se montó la probeta con la fibra óptica enhebrada dentro de la cámara de humedad.

Paso 5. Se montó el sistema de polea/masa y punto fijo (como el mostrado en la Figura 5. 21) para someter a la LPG a la tensión de referencia e igualar las condiciones mecánicas presentes durante la caracterización del sensor. Este arreglo fue realizado dentro de la cámara de humedad. El sistema de sujeción fue realizado usando partes mecánicas específicamente construidas mediante corte láser en acrílico y chapa de acero. También se utilizaron barras roscadas, y cortes de goma para implementar las zonas de contacto (a modo de prensillas) que no dañen la superficie de la fibra óptica.

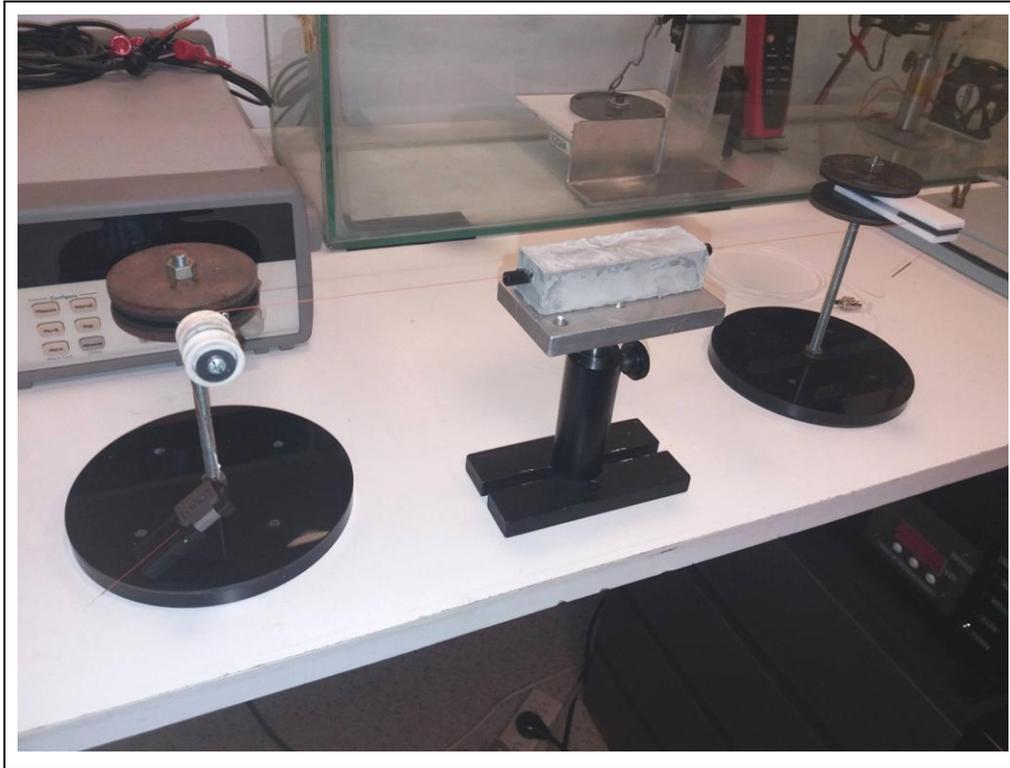


Figura 5. 21. Ejemplo del montaje del sistema de polea/masa y punto fijo tomado en un extremo de la fibra que contiene al sensor ya enhebrado en el encapsulado.

Paso 6. Se instaló el sensor de referencia en el asiento bajo relieve de la cara superior del prisma de PDC.

Paso 7. Se aplicó grasa de litio en los extremos del encapsulado para hermetizarlo y así evitar la influencia del aire humedecido proveniente del ambiente en forma directa sobre el sensor LPG.

Paso 8. Se vincularon los conectores FC/PC y FC/APC de los extremos de la fibra óptica que contenía al sensor a los conectores pasantes ubicados en las tapas fijas de la cámara de humedad.

Paso 9. Se fijaron mediante el empleo de cinta Kapton los tramos de fibra libres tanto al piso como a las paredes internas de la cámara de humedad a fin de prevenir potenciales cambios en la forma en la que la fibra fue acomodada dentro del recinto.

Paso 10. Se instalaron las bateas con las soluciones reguladoras de humedad.

Paso 11. Se cerró la cámara de humedad verificando que no existan potenciales rendijas por las cuales el aire externo a la cámara pueda mezclarse con el interno.

5.3.3.2. Acondicionamiento de la probeta

Con el objetivo de preparar a la probeta para el ensayo se la sometió a un período de tiempo de acondicionamiento en el que se estabilizó el nivel de humedad interna al

nivel más bajo lograble en términos de los tiempos con los cuales se contó. El barrido en HR se inició en dicho punto y se lo realizó en forma ascendente.

Para comenzar el período de acondicionamiento de la probeta introducida en la cámara de humedad, se accionó el comando asociado al actuador de deshumidificación (batea con solución saturada de LiCl) para secar el ambiente interno de la cámara y la probeta inmersa en éste. Este proceso fue mantenido durante 14 días monitoreándose tanto la HR de la probeta (mediante el sensor de referencia DHT22 instalado en la misma), como la del ambiente interno de la cámara.

5.3.3.3. Ejecución del ensayo

El ensayo ejecutado fue condicionado en su extensión temporal por la presencia del prisma de PDC. Se observó que el tiempo de estabilización de la HR interna de la probeta fue superior a cuatro días para todos los niveles de humedad generados para la evaluación.

5.3.4. Resultados de la estrategia 2

La Figura 5. 22 muestra la posición del pico de atenuación más prominente de la característica de transmisión de la LPG utilizada, en el intervalo de HR barrido durante el ensayo. También se muestran en un recuadro dentro de la gráfica, la función de ajuste propuesta para modelar matemáticamente la relación λ vs. HR.

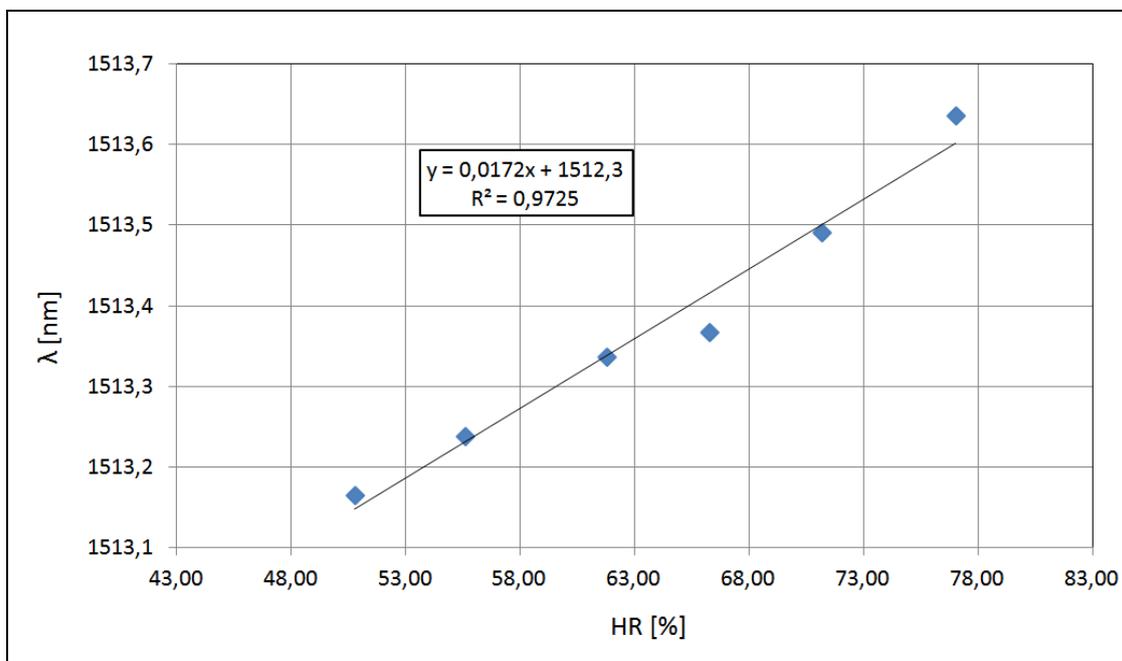


Figura 5. 22. Posición espectral del pico de atenuación en función de la HR de la LPG cuyo encapsulado fue embebido dentro del prisma de PDC.

En el Capítulo 6 de esta Tesis se realiza el análisis y la interpretación de los resultados expuestos teniendo en consideración el contexto en el que las mediciones que definen los puntos experimentales fueron ejecutadas.

5.4. Referencias

[1] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>

[2] *La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos*. Luis F. Luco. 2001. En AATH (Ed.), *Durabilidad del Hormigón Estructural* (pp. 1 – 45).

6. Discusión

6.1. Respeto de los resultados alcanzados

Las actividades desarrolladas en el marco del Plan de Tesis resultaron en las siguientes líneas temáticas de análisis y discusión en función de los emergentes experimentales obtenidos.

- La generación de LPGs en forma local.
- La aplicación de LPGs de generación propia al sensado de humedad.
- La demostración de la factibilidad del uso de LPGs de generación propia para la determinación de humedad interna en probetas de PDC.

6.1.1. Fase experimental 1: Generación de LPGs

Las actividades realizadas durante la Fase experimental 1 del Plan de Tesis demostraron que la generación de LPGs mediante el empleo del método de inducción por arco eléctrico impone condicionamientos al diseño geométrico de las mismas. Éstas impactan en sus características ópticas, particularmente en la ubicación espectral del pico de atenuación del espectro en el rango de observación (esto último determinado por el rango de emisión de la fuente lumínica empleada). La técnica empleada impone una cota inferior al período de red cuyo valor es aproximadamente $100\mu\text{m}$, debido a las dimensiones que adopta la zona de influencia del arco eléctrico necesario para la inducción de cada marca. Períodos de red inferiores no son realizables en términos prácticos con la configuración experimental implementada en esta Tesis. Si la distancia entre los puntos medios de cada marca fuese inferior a tal distancia, las zonas de transición entre perfiles vecinos comenzarían a solaparse entre sí destruyendo la configuración física de marcas contiguas. Esta observación surgió de consideraciones estrictamente empíricas al momento de depurar la técnica de formación de los μ -*tapers* que conforman las LPGs. En definitiva, las características geométricas de las LPG fabricadas determinan las longitudes de onda correspondientes al acoplamiento modal de la luz transmitida por el núcleo de la fibra a modos que se propagan por el revestimiento, y por ende la posición espectral de los correspondientes *dips* de atenuación. Como se mencionó antes, sólo aquellos comprendidos en el rango de iluminación empleado serán observados en la respuesta espectral de la red.

Se pudo verificar experimentalmente que la carga ambiental del medio que constituye el entorno del laboratorio durante la conformación de la LPG, es altamente influyente sobre la respuesta espectral final de la misma. Debido a ello, el proceso de fabricación de las unidades de los lotes descritos en la Sección 3.7 fue realizado durante un lapso de tiempo suficientemente corto como para que la carga ambiental del laboratorio no influya apreciablemente en el proceso de fabricación trayendo como consecuencia un comportamiento dispar en las LPGs generadas de la misma manera. Se verificó que las condiciones de HR y temperatura del ambiente presentaron una variabilidad inferior al 5% durante el lapso en el que se realizaron los dos lotes de LPGs.

El criterio usado para determinar el número de marcas final de la LPG fue basado en la observación marca a marca de la evolución del crecimiento del pico de atenuación. Es decir, una vez detectado el cambio de tendencia de crecimiento del pico de atenuación que sería usado como elemento sensor del mensurando a analizar, se detenía el proceso de generación de marcas procediendo a desmontar la LPG del arreglo experimental de grabado. La aplicación de este criterio, produjo la generación de LPGs con un comportamiento óptico comparable a los resultados experimentales publicados en revistas científicas en las que se trata el tema. Si bien el hecho de buscar maximizar la profundidad del *dip* de atenuación fue satisfactorio en lo que a eficiencia de acoplamiento de potencia óptica se refiere entre el modo de propagación del núcleo de la fibra y los modos del revestimiento, no resultó una característica que beneficie la detección y/o el seguimiento del pico propiamente dicho. Esto es debido a que la detección de la posición del pico de atenuación consiste en la determinación de la longitud de onda en la que menos radiación lumínica se transmite por el núcleo al puerto de salida del tramo de fibra en la que se encuentra grabada la LPG. Ello implica que cuanto más profundo sea el pico de atenuación, menos luz es transmitida al puerto de salida de la fibra en la longitud de onda en la que tal pico se encuentra espectralmente ubicado. A su vez, cuanto menor es la potencia de la luz detectada, más comparable es ésta con la potencia asociada al ruido de medición en el instrumento usado (lo cual puede introducir algún error en la determinación de la posición del *dip*) (ver Figura 3. 14). En futuras implementaciones de LPGs generadas en forma local el pico de atenuación debe tener una profundidad tal que la relación señal a ruido no perjudique el seguimiento de éste por el instrumento de medición a ser empleado. Una forma de lograr esto es usando un criterio que limite la cantidad de marcas final que conforman a la LPG estableciendo una cota de profundidad del pico de atenuación determinada de forma tal que garantice su detección limpia para un apropiado seguimiento.

Para la determinación de las sensibilidades de las LPGs se emplearon diferentes especímenes producidos localmente. Si bien los valores determinados para caracterizar tales sensibilidades (a cambios de temperatura, del índice de refracción de medio que rodea a la fibra óptica, y a cambios en la deformación axial debido a la tracción a la cual se encuentra sometida la fibra óptica) fueron propios del espécimen bajo ensayo, se estimó que representaron estadísticamente al comportamiento de una LPG típica debido a que las condiciones experimentales imperantes durante el proceso de generación fueron conservadas.

Los resultados de esta fase experimental demuestran en esencia la posibilidad y capacidad de construir LPGs en forma local. Hecho alcanzado luego de la depuración de una técnica que fue documentada en forma de procedimiento. Por este motivo no se realizan interpretaciones más allá de la meta alcanzada y del impacto económico que esto implica al momento de emplear estos dispositivos en la generación de sensores, dado que su costo en el mercado internacional es bastante elevado.

Debido al desarrollo de las técnicas y facilidades de laboratorio que fueron generadas para cumplir con las actividades experimentales asociadas a este Plan de Tesis, se cuenta a nivel regional con la infraestructura necesaria para fabricar y caracterizar LPGs grabadas en fibra óptica mediante la técnica de inducción por arco

eléctrico, propiciando la posibilidad de proveer este tipo de dispositivos ópticos a los proyectos de investigación (locales o no) que los requieran.

6.1.2. Fase experimental 2: Implementación experimental de un sensor de humedad

Para mejorar la sensibilidad de la LPG a la presencia de agua en estado gaseoso contenida en el medio que rodea a la fibra, se exploró la posibilidad de intermediar a la zona sensora de la fibra óptica (LPG) con el medio circundante, empleando una estructura sensible a la presencia de agua. La exploración fue basada en las posibilidades existentes de realizar la deposición de un *coating* químico sobre la superficie de la fibra. El criterio de selección de la técnica de deposición fue básicamente gobernado por la simpleza logística, y el bajo costo de los insumos necesarios. A su vez los materiales ensayados para la generación del ya mencionado *coating* fueron principalmente seleccionados considerando no solo a su comportamiento hidrofílico, sino también su sencillez de adquisición.

La técnica finalmente usada para la deposición puede ser refinada con el objetivo de alcanzar metas de desempeño comparables a las que se obtienen con las técnicas referenciadas en la Sección 4.2.2.5, asumiendo el hecho que el esfuerzo logístico para ello puede impactar en el costo económico tanto del proceso propiamente dicho como de los materiales usados. Por ejemplo, puede emplearse una técnica que garantice cierto grado de uniformidad del espesor de la capa sensibilizante a expensas de aumentar la complejidad del proceso y por consiguiente incumplir el criterio de simpleza de implementación y bajo costo de insumos. Cabe aclarar que la calidad geométrica de la capa del material sensibilizante lograda por los caminos implementados y descritos en esta Tesis fue suficiente para alcanzar los propósitos establecidos en el marco de este trabajo.

No se realizaron estudios orientados a evaluar la influencia del espesor del *coating* sensibilizante sobre la respuesta a la HR en ninguno de los materiales ensayados. Tampoco se evaluó la influencia de las proporciones másicas de TiO₂ respecto de PU y PVA para la conformación del *coating* sobre el grado de sensibilidad a la HR. Esta puede ser una tarea a encarar en una etapa futura.

Como fue mencionado, uno de los materiales explorados para la generación del *coating* químico fue PVA. La forma en la que este material fue depositado sobre la superficie puede ser alterada aprovechando la propiedad que éste polímero presenta por la cual se disuelve en agua. Como trabajo de exploración futuro puede estudiarse la relación existente entre el espesor de la capa depositada sobre la superficie de la fibra, y la concentración de PVA disuelto en agua procediendo tanto a inmersiones controladas en tiempo como a ciclos de secado forzado (en horno) o natural (al aire).

Desde el punto de vista de implementación tecnológica del encapsulado, se comprobó que la estrategia elegida cumplió con su función en el marco de las pruebas ejecutadas en el contexto del laboratorio. El diseño del encapsulado demostró haber sido funcional (para lograr las metas experimentales establecidas en la Fase 2 y 3) luego de haber realizado los cambios necesarios a causa de las lecciones aprendidas durante

la ejecución de la estrategia de avance 1. En función de las observaciones realizadas debe reverse el diseño del encapsulado si se pretende transferir el concepto del sensor de HR a un plano de implementación de campo. Esta transferencia no fue contemplada en el Plan de Tesis, motivo por el cual no se avanzó en el desarrollo tecnológico asociado.

En las pruebas realizadas se usó un tubo de fibra de carbono pero su capacidad de absorber agua hace pensar en su reemplazo como material base del cilindro que escude a la fibra óptica para protegerla del medio cementíceo que la rodea si se pretende transferir los resultados obtenidos a través de un desarrollo tecnológico. En tiempo de servicio, un sensor debe ser tal que los agentes ambientales no modifiquen las condiciones de caracterización del mismo. Para asegurar esto, la tensión de la fibra que contiene a la LPG es la magnitud considerada “clave”, debido a que tal condición mecánica debe necesariamente ser mantenida en virtud de que la caracterización previa del sensor permita la generación de una curva de calibración que sea válida bajo cualquier condición de servicio. En el encapsulado finalmente implementado en la estrategia de avance 2, si bien se aseguraron las condiciones de funcionamiento del sensor de HR (garantizando el medio gaseoso en el entorno de la LPG), fue necesario no solidarizar la fibra a éste. Esto último no cumple con cualquier requerimiento orientado a la manipulación en campo del ensamble final del sensor experimental. La ventaja que el material (fibra de carbono) confirió al encapsulado para el armado del arreglo experimental de laboratorio, fue su gran versatilidad para ser trabajado (dado que fue fácilmente perforado y cortado mediante técnicas manuales y usando herramientas de fácil acceso y disponibles en el laboratorio). Una potencial línea de exploración a futuro puede ser basada en la búsqueda de un material que presente una baja dilatación ante los cambios de temperatura y que simultáneamente no se comporte como un material higroscópico. De ese modo el encapsulado presentaría una alta estabilidad mecánica ante la carga ambiental. Así, los vínculos de sujeción entre el encapsulado y la fibra que contiene a la LPG no someterían a esta última a un ciclado en tensión mecánica al variar tanto la temperatura como la humedad del medio en el que se encuentre inmerso el encapsulado.

En la caracterización realizada del sensor experimental no se ejecutaron estudios tendientes a la determinación del grado de histéresis con el que el sensor se comporta ante barridos cíclicos del nivel de humedad. Este estudio si bien es de gran interés ingenieril, no fue considerado de importancia troncal en el contexto de este trabajo de Tesis debido a que los objetivos del mismo no están orientados al desarrollo de un sensor de campo, como fue previamente mencionado. Respecto a lo último, justamente son los emergentes de esta Tesis los que sientan precedentes para una posterior explotación de los mismos en vistas a un desarrollo tecnológico orientado a la implementación de un sensor que pueda ser instalado en una estructura civil.

6.1.3. Fase experimental 3: Ensayos en pastas de cemento

Durante los ensayos en los que se embebió un sensor experimental dentro de un prisma de PDC se observó el desplazamiento espectral del pico de atenuación usando la instrumentación adecuada, mostrando conceptualmente la factibilidad de emplear este

tipo de tecnología óptica en forma embebida para el sensado de HR interna en estructuras de base cementícea.

6.1.3.1. Respecto del arreglo experimental implementado

El proceso de medición y obtención de los puntos experimentales graficados en la Figura 5. 22 fue extremadamente dificultoso de realizar debido a que los lapsos de tiempo necesarios para alcanzar la estabilización de la cámara para cada valor de HR y T requeridos, fueron bastante extensos (días en algunos casos). A su vez y como se mencionó previamente, el tipo de control implementado para la gestión de la HR y la T fue a lazo abierto por definición lo cual demandó la asistencia del operador para corregir cualquier desviación respecto del punto de estabilización requerido, dificultando la práctica operativa para ejecutar el ensayo y extendiendo su duración. El ensayo planteado por el cual se evaluó el desempeño del sensor experimental embebido en la probeta de PDC, duró 35 días aproximadamente debido a que el proceso de ingreso de aire humedecido al interior de la probeta impuso largos tiempos de espera.

6.1.3.2. Influencia de factores ambientales no controlados

Se observaron cambios en la respuesta de la LPG al barrido en HR, entre lo medido en la fase de caracterización al aire respecto de lo medido en la fase en la que se embebió el sensor en PDC. Esto se evidencia si se comparan el cambio de posición del pico de atenuación en función de la HR mostrado en la Figura 4. 12 (fase de caracterización) versus lo mostrado en la Figura 5. 22 (fase de evaluación en estado embebido). Este comportamiento es esperable debido a que si bien fueron minimizados los efectos del cambio de birrefringencia del material de la fibra óptica en todos los aspectos posibles, ineludiblemente la fibra fue manipulada luego de la caracterización al aire para ser embebido el sensor dentro de la probeta.

Estudios científicos publicados [1] [2] evidencian la dependencia del estado de polarización de la luz que se propaga por la fibra óptica con excitaciones mecánicas externas orientadas en dirección radial debido al cambio de las propiedades birrefringentes del material que ocurre a causa de tales excitaciones. Las tensiones axiales de la fibra óptica son también causa de cambios de igual naturaleza. El impacto de estos cambios se manifiesta en la característica espectral de transmisión [1].

La inevitable manipulación entre ensayos realizada sobre el tramo de fibra con la LPG grabada, generó cambios que impactaron en la respuesta espectral de esta última lo cual se tradujo en cambios de su respuesta a la variación del nivel de humedad del medio que la rodea. Es decir, tal manipulación indujo cambios de las propiedades birrefringentes del material de la fibra óptica que distorsionaron la respuesta del sensor. Por ejemplo, el hecho de acomodar a la fibra óptica dentro de la cámara de humedad formando bucles con radios de curvatura distintos en la fase de caracterización respecto de la fase en la que la LPG estuvo embebida, generó condiciones de flexión/tracción en la fibra que fueron diferentes entre las dos fases.

En sistemas de sensado basados en el comportamiento espectral de dispositivos de fibra óptica en los que se use una fuente que emita radiación luminosa con algún

grado de polarización no nulo (como por ejemplo, un emisor del tipo SLD), los efectos de los potenciales cambios de las propiedades birrefringentes del medio en el que se propaga la luz deben ser mitigados dado que su libre accionar inestabiliza el sistema de medición en sí mismo. Cualquier proceso estocástico relacionado con la temperatura y/o con el estado mecánico de la fibra óptica genera cambios en el espectro de transmisión y por ende impacta en las mediciones del mensurando. Obsérvese que es imposible diferenciar si los cambios detectados en el espectro de transmisión (que rigen el principio de funcionamiento del elemento sensor para el caso de una LPG), son a causa de cambios en el mensurando (HR en este caso) o a causa de cambios de la birrefringencia en algún punto del camino óptico barrido por la luz si la fibra óptica es manipulada de alguna manera que genere una redistribución de estreses mecánicos (por ejemplo).

Una forma de mitigar este efecto no deseado es forzando el nivel de polarización de la luz a un valor lo más pequeño posible. El objetivo de esto es provocar que la luz inyectada en la fibra óptica en la que se encuentre la LPG sensora sea lo más cercana posible al comportamiento de un haz no polarizado. Cabe aclarar que el tipo de fuente de luz usada en el arreglo experimental (SLD) presenta un nivel de polarización no nulo debido a su propia naturaleza constructiva y de funcionamiento. En pos de ejecutar esta estrategia de mitigación, en sistemas de fibra óptica puede emplearse un arreglo llamado “Despolarizador de Lyot” [3] que consiste en insertar en el circuito óptico un dispositivo que básicamente despolariza la luz inyectada por el emisor. El despolarizador provoca que el haz de luz emergente de éste presente su energía distribuida en cantidades similares en todas las direcciones de polarización y no en una dirección dominante sobre el resto.

La Figura 6. 1 esquematiza las modificaciones necesarias del circuito óptico para la implementación de la estrategia de despolarización de luz basado en el arreglo de Lyot.

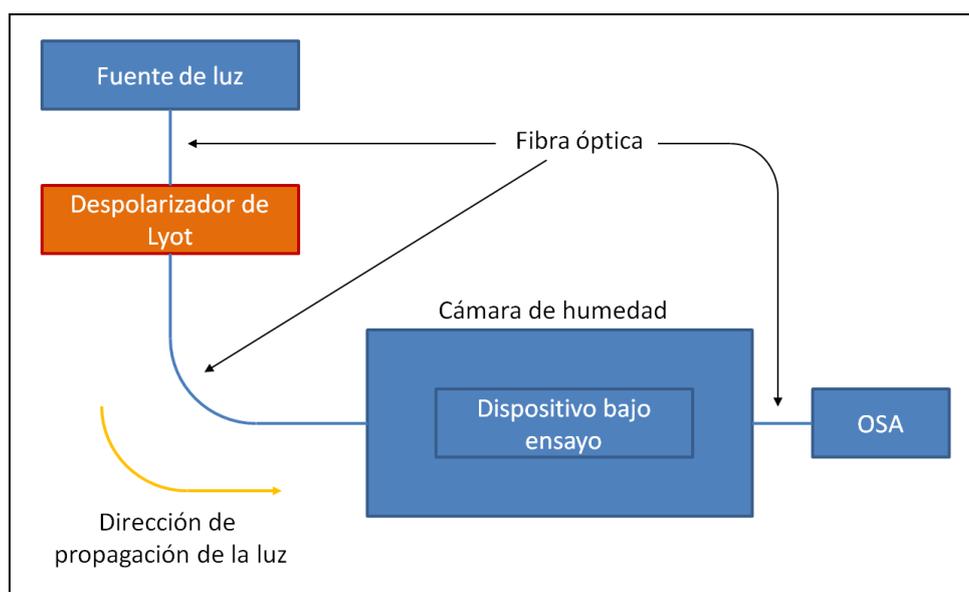


Figura 6. 1. Esquema del circuito óptico que incluye el despolarizador de Lyot en fibra óptica.

La realización del despolarizador de Lyot consiste en el uso de fibra del tipo PMF (*polarization maintaining fiber*) empalmada con fibra SMF (*single mode fiber*) conforme a lo descrito en las fuentes bibliográficas de referencia [4]. Esta estrategia no pudo ser implementada debido a inconvenientes logísticos asociados a la procuración de fibra del tipo PMF. Además, una vez implementada la modificación del circuito óptico, sería necesaria una nueva y completa caracterización del sensor LPG tanto en aire como en estado embebido dentro de la PDC.

Otra estrategia para mitigar este efecto es a través del uso de fibra óptica que no sea susceptible a cambios de sus propiedades birrefringentes ante cambios en la carga ambiental. Es decir, podría generarse una LPG directamente sobre una fibra óptica del tipo PMF. Este tipo de fibra presenta en su arquitectura interna cuerpos de estrés distribuidos longitudinalmente que tienden a dominar por sobre cualquier otro estrés emergente debido a cambios en el estado de torsión, deformaciones axiales y cambios de birrefringencia a causa de variaciones térmicas ambientales transferidas a la fibra. El desarrollo de una LPG en este tipo de fibra demandaría:

- Un reajuste de la técnica de fabricación.
- Contar con fibra del tipo PMF sobre la cual generar las LPGs.

6.2. Limitaciones de los estudios realizados

Se han encontrado estudios [5] [6] [7] en los que se evaluaron diferentes estrategias para el sensado de HR empleando dispositivos de fibra óptica cuyos principios de medición son de carácter espectral. Si bien los resultados de estos estudios muestran mejores sensibilidades que las alcanzadas en este trabajo de Tesis, las técnicas desarrolladas aquí tanto para la generación de la LPG como para la generación del *coating* sensibilizante, presentan las siguientes ventajas:

- Son considerablemente más simples de implementar.
- Son menos costosas en lo que a insumos materiales se refiere.
- Implican requerimientos a nivel laboratorio que son menos exigentes.

6.2.1. Respecto del material usado para embeber el sensor experimental

Los estudios realizados en estado embebido fueron hechos en probetas de PDC y no de hormigón. Esto impone una restricción analítica dado que una de las motivaciones de este plan de Tesis fue basada en la necesidad técnica existente de determinar la HR interna con vistas a usar tal información en sistemas de monitoreo de salud de estructuras, las cuales usan normalmente hormigón como material constructivo. No obstante, la justificación del uso de PDC se basó en el hecho de que

ésta tiende a ser más estable dimensionalmente que el hormigón durante la transición del estado fresco al endurecido. Desde el punto de vista práctico la minimización de los potenciales cambios volumétricos del material en el que se embebió el sensor experimental, brindó una mayor garantía mecánica en lo que a integridad del sensor bajo ensayo se refiere.

Es evidente que una etapa de desarrollo tecnológico de los sensores LPG en materiales cementíceos, requerirá la implementación de los mismos dentro de probetas de hormigón, para lo cual será necesaria una adecuada adaptación ingenieril de los mismos. Sin embargo, los emergentes de este trabajo de Tesis demuestran la factibilidad de emplear sensores ópticos basados en el uso de LPGs para determinar el nivel de humedad interna en ese tipo de materiales.

6.2.2. Respecto del efecto del arreglo experimental sobre el comportamiento de la fibra óptica

Debido a la naturaleza de los ensayos realizados pequeños segmentos de fibra óptica (en los cuales las LPGs fueron grabadas) estuvieron expuestos en forma directa al ambiente humedecido propiciando la potencial absorción de agua por parte del material constitutivo de la fibra. De los 1,5m asociados al tramo de fibra ubicado dentro de la cámara de humedad, sólo 5cm aproximadamente quedaron en contacto con un medio humedecido debido a la remoción del revestimiento protector (PMMA) para el grabado de la LPG. La mayor parte de la longitud de la fibra conservó la protección por lo que se la consideró escudada del ambiente húmedo. Por este motivo se despreció el efecto a corto plazo sobre la característica de transmisión debido a la potencial absorción de agua en el material base de la fibra óptica.

Cabe mencionar que la tasa de absorción de humedad del vidrio es muy baja a causa de que es un material no poroso y amorfo, lo que implica que no presenta cavidades que puedan retener o absorber humedad de manera significativa. Esto, potenció la suposición por la cual se consideró despreciable a la humedad absorbida por el vidrio que conformó a la fibra óptica en las secciones en las que fue removido el material de protección durante los lapsos de experimentación.

6.2.3. Respecto del tratamiento estadístico de los ensayos ejecutados

Otra limitación de los estudios realizados en la mayoría de los ensayos ejecutados tiene fundamentos estadísticos. Si bien los procedimientos experimentales fueron llevados adelante con extremo cuidado, conciencia y pureza práctica, hubiera sido deseable contar con una mayor extensión temporal para la ejecución del plan de Tesis con el objetivo de incorporar una evaluación estadística de los comportamientos encontrados.

6.3. Consideraciones relativas a los sensores basados en LPG en el campo de la Ingeniería Civil

Las actividades relacionadas con la medición de magnitudes y parámetros de interés en el campo de la durabilidad, monitoreo de salud y/o mantenimiento de estructuras, brinda un escenario de aplicación en el que sensores basados en LPGs pueden alcanzar un alto nivel de uso. La medición de HR interna es un ejemplo dentro de un conjunto de potenciales aplicaciones cuyos límites no se encuentran definidos al día de la fecha. Esto es debido a que la explotación tecnológica de LPGs en fibra óptica para el sensado de magnitudes no es aún un hecho adoptado por la industria. En contraposición a lo mencionado, sensores basados en FBGs son actualmente el baluarte de los sensores de fibra óptica empelados en SHM.

Conforme al rastillaje de publicaciones científicas realizado, puede decirse que el uso de LPGs en técnicas de sensado se encuentra en fase investigativa. Más allá de esta observación, existe un elemento común en la mayoría de las publicaciones analizadas. La principal propiedad de las LPGs usadas como elementos sensores en el campo de las mediciones radica en el hecho de que son sensibles en forma indirecta a la conformación química del medio que rodea a la fibra que la contiene. Esta característica posiciona a las LPGs como dispositivos de sensado que gozan de cierto grado de exclusividad al respecto. De hecho, la gran potencialidad de éstas en el campo de la Ingeniería Civil es probablemente erigida sobre la base de esta propiedad.

Es de esperarse que las LPGs sean a corto/mediano plazo protagonistas en futuros desarrollos tecnológicos que involucren el monitoreo de la evolución temporal de la concentración de agentes químicos considerados de gran importancia en la durabilidad del hormigón (a saber, cloruros, sulfatos, carbonatos, entre otros).

No obstante a lo anterior, el aporte tecnológico de un sensor basado en LPG no se centra en su capacidad de medir la concentración de agentes químicos solamente. La forma en la que éste puede ser interrogado permite a la implementación de mediciones semidistribuidas. Las posiciones espectrales de los picos de atenuación de varias LPGs grabadas en la misma fibra óptica pueden distribuirse en la banda del emisor utilizado de forma que sus corrimientos no se solapen al interactuar con sus respectivos mensurando. Esto brinda la potencial capacidad de realizar mapeos discretos de parámetros de interés en el volumen de una estructura bajo monitoreo.

6.4. Referencias

- [1] *Asymmetric transverse-load characteristics and polarization dependence of long-period fiber gratings written by focused CO₂ laser*. Y. Wang, D. N. Wang, W. Jin and Y. Rao, 2007, *Applied Optics*, vol. 46, no. 16.
- [2] *Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings*. B. Bachim and T. Gaylord, 2003, *Applied Optics*, vol. 42, no. 34.
- [3] *Degree of Polarization in the Lyot Depolarizer*. W. K. Burns, 1983, *Journal of Lightwave Technology*, vol. LT-1, no. 3.

[4] *Polarization changes at Lyot depolarizer output for different types of input beams.* J. Carlos Gonzalez De Sande y Gemma Piquero, 2012, Journal of the Optical Society of America, DOI: 10.1364/JOSAA.29.000278

[5] *Humidity Sensor Based on a Long-Period Fiber Grating Coated with Polymer Composite Film.* Yunlong Wang, Yunqui Liu, Fang Zou, Chen Jiang, Chengbo Mou and Tingyun Wang, 2019, Sensors, 19(10), 2263.

[6] *High-resolution polymer optical fibre humidity sensor utilizing single-passband microwave photonic filter.* Xin Cheng, Junhui HU, Kun Zhu, Zhiyong Zhao, 2021, Measurement, Vol. 179. 109462.

[7] *Humidity Sensor Based on Fiber Grating Coated with Graphene Oxide.* Shuqi Qiao 2019. Journal of Physics Conference Series. 1213 (04): 042076.

7. Conclusiones

7.1. Comentarios previos

La necesidad de contar con estructuras civiles más confiables y resilientes es un desafío de la industria de la construcción y de las disciplinas afectadas por la misma como por ejemplo la Ingeniería Civil. La falta de ejecución de rutinas y tareas de mantenimiento trae aparejado un alto gasto económico en reparación de estructuras con evidencias y signos de deterioro avanzado. Por este motivo, el establecimiento de sistemas de alarma temprana que garanticen la detección de procesos que atenten contra la salud de las estructuras, debe ser tenida en cuenta y formar parte de cualquier proyecto asociado a una estructura de gran porte.

Las técnicas de SHM han demostrado ser mecanismos útiles y beneficiosos para alcanzar metas de cualquier gestión de mantenimiento vinculada a estructuras de hormigón armado. En este escenario y considerando la permanente superación tecnológica que se verifica en el ámbito de las fibras ópticas, los OFS se presentan en la actualidad como elementos de sensado altamente atractivos para asistir a la Ingeniería Civil en el objetivo de lograr sistemas de monitoreo de salud confiables, robustos y durables. Esto se aprecia al momento de observar las ventajas que los OFS ofrecen sobre los sensores convencionales en lo que a desempeño funcional se refiere en ambientes agresivos (sea desde el punto de vista electromagnético o desde el punto de vista de la composición de la atmósfera circundante). Por ejemplo, los OFS brindan una potencial solución al monitoreo de estructuras que forman parte de centrales hidroeléctricas (dado que su composición inerte desde el punto de vista eléctrico los hace inmunes a interferencias electromagnéticas), o de plantas industriales que involucran procesos en ambientes inflamables (pues al ser sensores eléctricamente no conductivos están libres de emisión de chispas). Otras ventajas que pueden mencionarse de los OFS son las siguientes: soportan temperaturas muy altas y muy bajas (900°C ... 4°K), son livianos y de pequeño tamaño, es posible embeberlos en la estructura a medir sin comprometer su resistencia, pueden ser interrogados de forma remota tanto en forma continua como luego de períodos extendidos de tiempo. Finalmente cabe destacar, los OFS ofrecen opciones de medición que permiten el monitoreo distribuido o semi-distribuido de procesos o magnitudes físicas/químicas, lo cual constituye una ventaja no sólo funcional sino también logística frente a los sensores convencionales debido fundamentalmente a su simplicidad de cableado que permite su operación con una única fuente de luz y un único sistema de interrogación.

Toda estructura de hormigón interactúa con el entorno que la rodea de diferentes maneras durante su ciclo de vida. Más allá de las interacciones para las que se diseñó la estructura, existen otras interacciones que pueden generar cambios en su desempeño funcional, de seguridad o estético. En este contexto, algunos agentes ambientales son considerados nocivos para el hormigón porque representan causas potenciales de daño a la salud de la estructura (por ejemplo, pueden aparecer diferentes patologías por procesos de carbonatación, ingreso de cloruros y/o sulfatos, entre otros). A este respecto, la presencia de agua (en fase líquida o gaseosa) dentro del material juega un papel preponderante en todos los fenómenos de transporte y degradación. El conocimiento del nivel de humedad interna en diferentes lugares estratégicos de una estructura de hormigón es un elemento de juicio de gran importancia para los ingenieros civiles a la hora de tomar decisiones relacionadas con el mantenimiento de

dichas estructuras. De esta forma, monitorear los niveles de humedad brinda información que facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo. Esto puede evitar altos niveles de inversión económica en reparación y modernización de estructuras.

Desde el punto de vista físico, el aire húmedo se difunde dentro de la matriz de hormigón debido a un gradiente de concentración del contenido de moléculas de agua que existe entre el entorno que rodea la estructura y el interior del material en sí mismo. Los poros y canales que inherentemente existen dentro del hormigón, facilitan el ingreso de humedad. Por ello, contar con sensores embebidos en la estructura de hormigón para monitorear la humedad relativa interna representa un recurso tecnológico de gran valor.

7.2. Conclusiones generales

El trabajo de Tesis fue desarrollado en concordancia con un plan de actividades definido en términos de tareas de un perfil fuertemente experimental. Como se explicó previamente el abordaje ordenado del conjunto de tareas a ser ejecutadas demandó seccionar el plan en fases (fase experimentales 1, 2 y 3). Con el objetivo de exponer las conclusiones de este trabajo de Tesis Doctoral se agrupan las mismas en función de la etapa a la que cada una de ellas está asociada.

7.2.1. Fase experimental 1

La ejecución de la Fase experimental 1 del plan de actividades destinadas al desarrollo de esta Tesis, promovió la generación de técnicas y procedimientos de laboratorio que fortalecieron la capacidad local para desarrollar dispositivos de fibra óptica. En función de la cantidad y calidad de los producidos, se concluye que al momento de redacción de esta Tesis, se cuenta a nivel institucional con la capacidad adquirida de fabricar LPGs en fibra óptica, en donde se entiende por capacidad tanto a la experticia orientada a las prácticas como al equipamiento y logística periférica (infraestructura).

El mecanismo seleccionado para ser utilizado en esta Tesis con el objetivo de generar LPGs en fibras ópticas se basó en la llamada *técnica de inducción por arco eléctrico*. Se adaptaron las facilidades preexistentes en el laboratorio a las necesarias para cumplir con los requerimientos experimentales que esta técnica demanda. Para lograr esto fue necesario la depuración de un arreglo experimental y la generación de un procedimiento compatible con el instrumental disponible. El resultado de esto conllevó a la gestación de una técnica propia que, siendo basada en la previamente mencionada, adiciona las bondades del uso de los automatismos disponibles en una máquina empalmadora de fibra óptica. Una ventaja resultante fue la repetibilidad de las características asociadas a la acción de ataque eléctrico de marca en marca para conformar la LPG.

La técnica puesta en marcha representa una contribución mayúscula a las facilidades disponibles en el CIOp en particular y al Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología (SNCyT) en general, en lo que a generación de dispositivos ópticos se refiere. Este logro brinda la posibilidad de interacción o vinculación con otros grupos de investigación del país y de Latinoamérica para generar diferentes aplicaciones de estos dispositivos. Por otro lado, proporciona una potencial transferencia tecnológica mediante desarrollos orientados hacia diferentes áreas de la ingeniería y la industria, sobre todo considerando que a la fecha (junio de 2023) no existen empresas comerciales fabricantes de este tipo de elementos en toda América del Sur.

7.2.2. Fase experimental 2

Durante esta fase se evaluó la respuesta del sensor ante la deposición de capas sensibilizantes conformadas por diferentes materiales que presentan un marcado comportamiento hidrofílico. Existen tres observaciones básicas a destacar:

- Los materiales evaluados son de fácil adquisición en el mercado, lo que simplifica la logística de implementación de un potencial sensor a ser desarrollado comercialmente como emergente de esta Tesis.
- Dichos materiales son de muy bajo costo comparándolos con los materiales implementados en trabajos publicados de similar naturaleza (óxido de grafeno o quitosan, por ejemplo).
- La técnica de deposición del *coating* que fue evaluada es extremadamente simple de ser implementada dado que ésta no demanda el uso de equipamiento ni soporte tecnológico de media o alta complejidad, a diferencia de las técnicas de deposición mencionadas en la Sección 4.2.2.5 a modo introductorio.

Si bien la determinación de las sensibilidades alcanzadas acusa valores inferiores a los publicados por investigaciones que utilizan otros materiales, las ventajas mencionadas previamente hacen necesario evaluar el uso de los materiales ensayados en este trabajo de Tesis ante el potencial desarrollo de un sensor de HR basado en los emergentes de la misma. Se concluye que tanto la simpleza de implementación de la técnica de deposición como los resultados aceptables de la sensibilidad lograda, son elementos de juicio que merecen ser evaluados en caso de efectivizarse un desarrollo tecnológico orientado al diseño de un sensor de HR basado en LPG en fibra óptica.

7.2.3. Fase experimental 3

Los ensayos ejecutados evidencian que el sensor experimental de humedad es capaz de soportar el proceso de encapsulado en los términos planteados en la estrategia de avance 2. Si bien fue comprobado en la estrategia de avance 1 que el funcionamiento del sensor es condicionado por los procesos de encapsulado y embebido en PDC, las modificaciones en el arreglo experimental que fueron implementadas en la estrategia

de avance 2 acusaron resultados que permiten concluir que el desarrollo de un sensor cuya base conceptual responda al sensor experimental ensayado en esta Tesis, es factible.

7.3. Investigaciones futuras

El desarrollo de este Plan de Tesis propició la gestación de un conjunto de propuestas de líneas investigativas secundarias. Las mismas son brevemente mencionadas y explicadas a continuación:

- Análisis estadístico del proceso de generación local de LPGs: como trabajo a futuro se propone un análisis sobre un lote de LPGs conformado por una cantidad de unidades mayor que el realizado (50 unidades), con el propósito de estudiar la estabilidad del proceso de fabricación local de LPGs empleando herramientas estadísticas que permitan una caracterización profunda y una identificación/control adecuados de los agentes que influyen en el proceso de grabado (carga ambiental, por ejemplo).
- Implementación de otras técnicas alternativas de generación de LPGs: por ej. interferométricas basadas en el uso de una fuente de luz. Se estima que las LPG generadas por irradiación UV a través de una máscara de amplitud pueden resultar más estables en lo que a dispersiones de fabricación se refiere, además de obtener especímenes que presenten mayor robustez mecánica en la zona donde está la red grabada, dado que no se requiere la remoción del polímero protector de la fibra óptica. Debe aclararse que al momento de la realización de este trabajo de Tesis, la fuente laser UV disponible en el CIOp (que es un equipo de muy alto costo en dólares) no se encontraba en buenas condiciones operativas, por lo que la utilización de esta técnica para la generación de los transductores LPG, no fue una opción. Actualmente se está subsanando este problema, por lo que la implementación a corto plazo de la generación de LPGs con irradiación UV, será factible.
- Estudio del control de las sensibilidades de las LPGs generadas en forma local: evaluar las sensibilidades a las diferentes magnitudes físicas de cada modo de propagación del revestimiento y maximizar cada una de ellas con una elección adecuada del mismo o acciones externas apropiadas. Desarrollar un modelo que permita simular el comportamiento óptico de la LPG para agilizar el mecanismo de diseño de estos dispositivos en aplicaciones específicas (para medir solo temperatura y no tener que desafectar el efecto de las otras dos magnitudes, por ejemplo).
- Estudios para la determinación de la durabilidad de un sensor de humedad basado en el uso de LPG en fibras ópticas: en el presente Plan de Tesis no se realizaron estudios orientados al comportamiento de un sensor experimental conforme al paso del tiempo ni en condiciones de

laboratorio ni en condiciones de servicio en estado embebido dentro de una estructura de hormigón.

- Estudios orientados a la determinación del grado de histéresis del sensor experimental realizando barridos continuos tanto ascendentes como descendentes en HR. Este estudio brindaría información de valor ingenieril para el desarrollo de un sensor de humedad embebible en una estructura civil y basado en el uso de LPGs.
- Estudios de los tiempos de respuesta del sensor ante excitaciones de humedad de dinámica conocida. Si bien, en el contexto de este trabajo de Tesis se realizaron observaciones relativas al comportamiento dinámico del sensor, no se ha orientado el plan de acción para profundizar conocimientos al respecto. La logística experimental necesaria para abordar este estudio es diferente al soporte tecnológico implementado para la realización de los arreglos experimentales ejecutados.
- Estudios orientados a evaluar la influencia del espesor del *coating* sensibilizante sobre la sensibilidad a la HR. En este sentido sería importante considerar también el efecto generado al aplicar cierto número de capas delgadas, con algún tratamiento intermedio de las mismas (un recocido por ej.) para evitar la remoción de las capas previamente depositadas.
- Estudios orientados a explorar el impacto de la calidad geométrica del *coating* sensibilizante (espesor y uniformidad superficial) sobre la repetibilidad de la respuesta a la HR en diferentes especímenes.
- Estudios orientados a evaluar diferentes la respuesta en sensibilidad de *coatings* implementados con diferentes proporciones de TiO_2/PU y TiO_2/PVA , así como el desarrollo de nuevas formulaciones del recubrimiento sensibilizante con vistas a lograr un aumento de la sensibilidad de los sensores o una mejora en su respuesta dinámica.
- Estudios orientados a la implementación de sensores basados en LPGs generadas en fibra del tipo PMF, ya que mitigar los efectos de los cambios en la característica de transmisión de la LPG debido a los cambios del estado de polarización de la luz inyectada por la fuente lumínica es altamente importante para robustecer el comportamiento del sensor ante cambios de la carga ambiental que afecta al mismo.
- Estudios orientados a evaluar el impacto de forzar la despolarización del haz inyectado por la fuente lumínica a través de un despolarizador de Lyot: por las mismas causas que el ítem previo.

7.4. Desarrollos tecnológicos futuros

Los emergentes de este trabajo de Tesis Doctoral brindan antecedentes y fundamentos que dan crédito al análisis de factibilidad de un proyecto de desarrollo tecnológico de un sensor de HR embebible en materiales cementíceos de uso civil y que sea basado en el empleo de LPG en fibra óptica.

Conforme a la experiencia lograda durante la Fase Experimental 3, el principal desafío reconocido a nivel tecnológico estriba en el diseño del encapsulado del elemento sensible. Durante la ejecución de las acciones asociadas a la estrategia de avance 1 pudieron identificarse diferentes puntos de debilidad que en la estrategia de avance 2 fueron solventados a nivel del arreglo experimental. El diseño del encapsulado no solo debe ser robusto ante las agresiones del medio en el que se encuentra inmerso el sensor sino también funcional en todo aspecto, incluyendo el relacionado con la mantención de condiciones físicas que definen la calibración del mismo. Además, dicho diseño debe ser adecuado para ser colocado en la estructura civil en condiciones de obra, las cuales se diferencian bastante de las condiciones de laboratorio.

Así mismo, la potencial generación de un sensor basado en los emergentes de este trabajo de Tesis Doctoral implica el desarrollo de un sistema de hardware y software que ejecute la interrogación de tal sensor. Debido a que la fibra óptica sobre la que se graba la LPG permite que se graben más de una unidad sensora sobre la misma fibra, el sistema de interrogación podría implementar un mecanismo de sensado discreto en diferentes puntos de una estructura de hormigón con el objetivo de realizar mapeos escalares de HR.

Durante las tareas del plan de Tesis se realizaron mediciones espectrales usando instrumentos de laboratorio no aptos para ser transportados a ambientes rústicos como los existentes en el campo práctico o de obra. Por ese motivo el desarrollo de un sistema de interrogación como el mencionado debe responder a los requerimientos técnicos demandados por todo equipo idóneo y competente en el contexto de campo. Estos requerimientos están relacionados con la robustez, la facilidad de ser transportado, el bajo peso, el conjunto de criterios ergonómicos usados en el diseño para el fácil y cómodo uso por parte del operador (interfaz máquina-humano). Sin embargo, es conveniente mencionar que el grupo de investigación vinculado a este trabajo de Tesis ya ha participado en proyectos tecnológicos aplicados a las áreas de ingeniería civil y aeroespacial, en los cuales ha implementado equipos de interrogación de sensores de deformación y temperatura basados en el empleo de redes de Bragg grabadas en fibra óptica, por lo el diseño e implementación de interrogadores de sensores LPG es altamente factible en el marco de un proyecto de desarrollo tecnológico.

7.5. Publicaciones y presentaciones vinculadas con el trabajo de Tesis

7.5.1. Congresos y reuniones científicas

- “*Generación de redes de período largo en fibras ópticas para la implementación de sensores de pH*”. D. Aredes, D. Alustiza, N. Russo, V. Arce, R. Duchowicz. CIII Reunión de la Asociación de Física Argentina (RAFA2018). Póster. Del 17 al 21 de Septiembre. 2018. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA, CABA, Argentina.
- “*Potencialidades y Aplicaciones de Sensores de Fibra Óptica en el Hormigón. Capacidad Local para la Generación de Sensores*”. D. Alustiza, N. Russo, A. López, Y. Villagrán Zaccardi. Memorias de la 1er Jornada de Jóvenes Investigadores en Tecnología del Cemento y el Hormigón. 1era Edición. Organizado por CIC, LEMIT y Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH). ISBN 978-987-3838-11-8. La Plata. LEMIT. Junio 2019.
- “*Manufacture of Long Period Fiber Gratings for the Development of Optical Sensors*”. D. Alustiza, M. Mineo, D. Aredes, E. Vaio, N. Russo. Del 1 al 4 de diciembre del 2020. IEEE ARGENCON2020. UTN FRRE. Resistencia, Prov. del Chaco, Argentina. 2020.
- “*Sensitivity Improvement of an LPG-based Fiber Optic Humidity Sensor*”. D. Alustiza, M. Mineo, D. Aredes, P. Gara, V. Arce, N. Russo. Del 1 al 4 de diciembre del 2020. IEEE ARGENCON2020. UTN FRRE. Resistencia, Prov. del Chaco, Argentina. 2020.
- “*Desarrollo de Sensores de Fibra Óptica para la Determinación de Humedad en Mezclas Cementíceas*”. D. Alustiza, M. Mineo, A. López, Y. A. Villagrán Zaccardi, N. Russo. IX Congreso Internacional y 23^a Reunión Técnica de la Asociación Argentina del Hormigón. AATH 2020. UTN FRLP / LEMIT. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Publicado en Memorias, ISBN 978-987-47035-2-1 (edición digital). 2 al 6 de noviembre. 2020.
- “*Aplicación de Redes de Período Largo en Fibras Ópticas para la Sensorización de Materiales Cementíceos*”. D. Alustiza, N. Russo, Y. Villagrán Zaccardi. 5^o Jornadas de Intercambio y Difusión de los Resultados de Investigaciones de los Doctorados en Ingeniería. UTN. Modalidad virtual. 6 y 7 de Octubre. 2020. Publicado en Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN (AJEA). Número 5. ISSN: 2683-8818. ISBN: 978-950-42-0200-4.
- “*Desarrollo de Sensores de Contaminantes Ambientales Basados en LPGs Recubiertas con Nanopartículas de Plata*”. C. Villa-Pérez, M.

Mineo, D. Alustiza, N. Russo, V. Arce. RAFA2021, CVI Reunión de la Asociación Física Argentina. Póster. Octubre. 2021.

- “*Sensores de Fibra Óptica Basados en Redes de Bragg en Entornos con Radiación Ionizante*”. Juan A. Suica, Juan Longhino, Diego Alustiza, José Luis Cruz, Pablo A. Costanzo Caso, Miguel V. Andrés, Leonardo Morbidel. RPIC 2021. Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan / CONICET. 3 al 5 de Noviembre. 2021. Publicado en Actas de la XIX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control. ISBN: 978-987-88-2891-6.
- “*Packaging Design Assessment for an Experimental Fiber Optic Humidity Sensor Embeddable in Concrete Structures*”. D. Alustiza, N. Russo, M. Mineo, A. López, Y. A. Villagrán Zaccardi. Del 7 al 9 de septiembre del 2022. IEEE ARGENCON2022. VI Biennial Congress of Argentine. Instituto de Energía Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan - CONICET, Prov. de San Juan, Argentina. 2022.
- “*Redes de período largo en fibras ópticas sensibilizadas con nanopartículas de plata*”. D. Alustiza, C. Villa Pérez, N. A. Russo, V. B. Arce. XXIII Congreso Argentino de Fisicoquímica y Química Inorgánica. CAFQI XXIII. El Calafate. Del 11 al 14 de abril de 2023.
- “*Sensores de contaminantes ambientales basados en LPGs revestidas con poliuretano*”. D. Alustiza, C. Villa Pérez, N. A. Russo, V. B. Arce. XVIII Taller de óptica y Fotónica - XIII Encuentro de Estudiantes de Óptica y Fotónica. EEOF – TOPFOT 2023. Universidad Nacional de Quilmes. 29 - 31 de mayo. 2023.

7.5.2. Revistas nacionales e internacionales

- “*Fabricación Local de Sensores de Fibra Óptica Aplicables al Sensado de Magnitudes Relevantes en Ingeniería Civil*”. D. Alustiza, N. Russo, M. Mineo, D. Aredes. Revista Ingenio Tecnológico. Con referato. Año 1. Vol 1 (2019), 100003. Publicada el 15/08/2019.
- “*Characterization of Long Period Gratings Manufactured with Fiber Optic Fusion Splicer for Sensor Development*”. D. Alustiza, M. Mineo, N. Russo. Latin American Applied Research. Vol. 51 No. 1 (2021). Páginas 21 - 26. ISSN 1851-8796 (online). Publicado el 24/12/2020.
- “*Sensitivity Improvement of an LPG-based Fiber Optic Humidity Sensor*”. D. H. Alustiza, M. Mineo, D. Aredes, P. M. David Gara, V. B. Arce y N. A. Russo. 2020 IEEE Congreso Biental de Argentina (ARGENCON), 2020, Páginas 1 - 5. Fecha de publicación 13/08/2021.

- “*Manufacture of Long Period Fiber Gratings for the Development of Optical Sensors*”. D. H. Alustiza, M. Mineo, D. Aredes, E. Vaio, N. A. Russo. 2020 IEEE Congreso Bienal de Argentina (ARGENCON), 2020. Fecha de publicación 13/08/2021.
- “*Introducción a los sensores de fibra óptica para el monitoreo de salud de estructuras civiles*”. D. Alustiza, M. Mineo, A. López, N. Russo, Y. Villagrán Zaccardi. Ingenio Tecnológico. Vol. 4, e027. ISSN-e: 2618-4931. Publicado el 28/04/2022.
- “*Packaging Design Assessment for an Experimental Fiber Optic Humidity Sensor Embeddable in Concrete Structures*”. D. Alustiza, N. Russo, M. Mineo, A. López, Y. A. Villagrán Zaccardi. IEEE Xplore Digital Library. Editor IEEE. ISBN 978-1-6654-8015-4. Publicado el 09/11/2022. DOI: 10.1109/ARGENCON55245.2022.9939756.
- “*Experimental fiber optic humidity sensor with applicability to civil structures health monitoring*”. D. Alustiza, M. Mineo, V. B. Arce, C. Villa Pérez, N. A. Russo. Óptica Pura y Aplicada (OPA) / Optics and Photonics in Argentine / Sensors and Photonic Devices. Vol. 56 (2) 51138 (2023). Sociedad Española de Óptica. Aceptado para publicar el 06/06/2023.

Apéndices

A.1. Código del programa CH03V06

En esta sección se muestra el código de programa llamado “CH03V06.ino”. Éste corrió en la placa Arduino Mega 2560 que forma parte del arreglo experimental implementado para la caracterización del sensor de HR de fibra óptica basado en el uso de LPG. La plataforma de programación fue el entorno de desarrollo de software de la Arduino 1.8.18.

```
Nombre de programa: CH03V06.ino
Versión: 6.0
Autores: Ing. Diego Alustiza, Ing. Marcos Mineo

////////////////////////////////////
//                               //
// Sistema "Cámara de Humedad 3.0" //
// Versión V06 del software del Arduino //
// 18/10/2022 //
//                               //
////////////////////////////////////

// Notas varias
// -----
// Servomotor lado izquierdo: servo1 (humedece el ambiente interno de la cámara)
// Servomotor lado derecho: servo2 (seca el ambiente interno de la cámara)

// Uso de los pines de la placa Arduino:
// Pin 2: (salida) conexión servomotor1
// Pin 4: (salida) conexión servomotor2
// Pin 6: (salida) comunicación DHT22
// Pin 8: (entrada) pulsador incremento manual de posición angular del servomotor1
// Pin 9: (entrada) pulsador decremento manual de posición angular del servomotor1
// Pin 10: (entrada) pulsador incremento manual de posición angular del servomotor2
// Pin 11: (entrada) pulsador decremento manual de posición angular del servomotor2

// Tabla con la descripción de comandos recibidos desde la PC
// Código de comando Descripción Estructura
// 0 NONE
// 1 FIND_HOME FB F3 20 01 00 00 + CHKsum
// 2 INCREMENT_SERVO1_ANGLE FB F3 20 02 00 00 + CHKsum
// 3 DECREMENT_SERVO1_ANGLE FB F3 20 03 00 00 + CHKsum
// 4 INCREMENT_SERVO2_ANGLE FB F3 20 04 00 00 + CHKsum
// 5 DECREMENT_SERVO2_ANGLE FB F3 20 05 00 00 + CHKsum
// 6 SERVO_STEP_CHANGE FB F3 20 06 XX XX + CHKsum ( XX = [00 - B4] )
// 7 CHANGE_TO_SIMULATION_MODE FB F3 20 07 00 00 + CHKsum
// 8 CHANGE_TO_OPERATIVE_MODE FB F3 20 08 00 00 + CHKsum
// 9 GO_TO_SERVO1_ANGLE FB F3 20 09 XX XX + CHKsum ( XX = [00 - B4] )
// B GO_TO_SERVO2_ANGLE FB F3 20 0A XX XX + CHKsum ( XX = [00 - B4] )

// Estructura de la trama de estado a ser transmitida hacia la PC (en hexadecimal), son 16 bytes en total:
// FB F3 20
// XX XX (servo 1 current position, un int (16 bits) enviado a través de dos chars, en donde cada char se envía a través de dos caracteres dado que se envía en hexa)
// XX XX (servo 2 current position, un int (16 bits) enviado a través de dos chars, en donde cada char se envía a través de dos caracteres dado que se envía en hexa))
```

```

// XX XX XX XX (HR, un float (32 bits) enviado a través de 4 chars, en donde cada char se envía a través de dos caracteres dado que
se envía en hexa)
// XX XX XX XX (T, un float (32 bits) enviado a través de 4 chars, en donde cada char se envía a través de dos caracteres dado que
se envía en hexa)
// XX      (checksum que no incluye en encabezado)

//=====

// Includes
// -----
#include <Servo.h>
#include <DHT.h>
#include <TimerOne.h>

// Definiciones
// -----
#define DHTPIN      6                // Pin en el que está conectado el DHT22
#define DHTTYPE     DHT22           // Tipo de DHT conectado a la placa Arduino
#define HEADER_0    0xFB            // 1er byte del encabezado de la trama de transmisión
#define HEADER_1    0xF3            // 2do byte del encabezado de la trama de transmisión
#define HEADER_2    0x20            // 3er byte del encabezado de la trama de transmisión
#define LOW_PART_16 0x00FF          // Máscara para ints
#define HIGH_PART_16 0xFF00         // Máscara para ints
#define LOW_PART_32 0x0000FFFF      // Máscara para floats
#define HIGH_PART_32 0xFFFF0000     // Máscara para floats
#define NO_DATA     0xFF            // Símbolo de "sin datos recibidos"
#define NONE        0x00            // Comando 0 (a ser recibido desde la PC)
#define FIND_HOME   0x01            // Comando 1 (a ser recibido desde la PC)
#define INCREMENT_SERVO1_ANGLE 0x02 // Comando 2 (a ser recibido desde la PC)
#define DECREMENT_SERVO1_ANGLE 0x03 // Comando 3 (a ser recibido desde la PC)
#define INCREMENT_SERVO2_ANGLE 0x04 // Comando 4 (a ser recibido desde la PC)
#define DECREMENT_SERVO2_ANGLE 0x05 // Comando 5 (a ser recibido desde la PC)
#define SERVO_STEP_CHANGE 0x06      // Comando 6 (a ser recibido desde la PC)
#define CHANGE_TO_SIMULATION_MODE 0x07 // Comando 7 (a ser recibido desde la PC)
#define CHANGE_TO_OPERATIVE_MODE 0x08 // Comando 8 (a ser recibido desde la PC)
#define GO_TO_SERVO1_ANGLE 0x09     // Comando 9 (a ser recibido desde la PC)
#define GO_TO_SERVO2_ANGLE 0x0A     // Comando A (a ser recibido desde la PC)
#define STATE_0     0               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_1     1               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_2     2               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_3     3               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_4     4               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_5     5               // Nombre de un estado de la máquina
#define STATE_6     6               // Nombre de un estado de la máquina

// Declaración de objetos
// -----
Servo servo1;                // Crea objeto del tipo Servo denominado servo1 que representa al servomotor MG 996R ubicado
en la izquierda de la cámara (humedece)
Servo servo2;                // Crea objeto del tipo Servo denominado servo2 que representa al servomotor MG 996R ubicado
en la derecha de la cámara (seca)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);    // Inicializa DHT sensor

// Declaraciones de variables globales
// -----
unsigned int actual_servo1_position; // Posición angular servomotor1 [º sexagesimales]
unsigned int actual_servo2_position; // Posición angular servomotor2 [º sexagesimales]
unsigned int step_servomotors = 1;   // Paso angular para mover los servomotores [º sexagesimales]
float HR;                            // Humedad relativa [%]
float T;                              // Temperatura [ºC]
bool simulation_mode = false;        // Modo de funcionamiento del programa que permite ver los datos vía monitor del
IDE del Arduino

// Declaración de unión para transmitir HR y T via puerto serie
// -----

```

```

union union_definicion          // Declaración de la unión
{
  float arreglo_entrada[2];     // Dos floats (8 bytes) para escribir en la unión
  char arreglo_salida[8];       // Ocho chars (8 bytes) para leer la unión y enviar cada byte por puerto serie
} mi_union;

//=====

void setup()
{
  // Configuración del Timer1 para disparar eventos periódicos
  // -----
  Timer1.initialize(1000000);    // Inicializa timer 1 con período de 1 segundo
  Timer1.attachInterrupt(TimerISR); // Asocia la función llamada "TimerISR" a la ISR del timer 1 del microcontrolador de la
  placa Arduino

  // Servomotor
  // -----
  servo1.attach(2);             // El servomotor 1 está conectado al pin 2 del Arduino
  servo2.attach(4);             // El servomotor 2 está conectado al pin 4 del Arduino
  servo1.write(180);            // Inicialización de posición del servomotor 1
  servo2.write(180);            // Inicialización de posición del servomotor 2

  // Inicializa comunicación entre DHT22 y Arduino
  // -----
  dht.begin();

  // Puerto serie
  // -----
  Serial.begin(115200);
}

//=====

// Main
// ----
void loop() {

  // Variables comunicación exterior
  static unsigned char received_command = NONE;
  static unsigned char action_commands;
  static unsigned char received_parameter_h = 0;
  static unsigned char received_parameter_l = 0;
  static unsigned char data = 0;
  static unsigned char checksum = 0;
  static unsigned int data16 = 0;
  static bool new_command = false;
  static unsigned char frame_decode_state = STATE_0;
  static unsigned char initialization_state = STATE_0;

  // Máquina de estados decodificadora de la trama
  // -----
  data16 = pc_serial_check_data();
  if (data16 != NO_DATA)
  {
    data = (unsigned char)data16;
    switch(frame_decode_state)
    {
      case STATE_0: // Identifica Header "FB"
        if(data == HEADER_0) frame_decode_state = STATE_1;
        else frame_decode_state = STATE_0;
        break;
      case STATE_1: // Identifica Header "F3"
        if(data == HEADER_1) frame_decode_state = STATE_2;
        else frame_decode_state = STATE_0;
        break;
      case STATE_2: // Identifica Header "20"
        if(data == HEADER_2) {frame_decode_state = STATE_3; checksum = 0;}
    }
  }
}

```

```

else frame_decode_state = STATE_0;
break;
case STATE_3: // Lee código de comando recibido
received_command = data;
checksum += data;
frame_decode_state = STATE_4;
break;
case STATE_4: // Lee parte alta del parámetro correspondiente al comando recibido
received_parameter_h = data;
checksum += data;
frame_decode_state = STATE_5;
break;
case STATE_5: // Lee parte baja del parámetro correspondiente al comando recibido
received_parameter_l = data;
checksum += data;
frame_decode_state = STATE_6;
break;
case STATE_6: //
if (data == checksum) {new_command = true;}
frame_decode_state = STATE_0;
break;
default:
frame_decode_state = STATE_0;
break;
}
}

//Verificación de existencia de un nuevo comando válido
//-----
if (new_command == true)
{
new_command = false;
action_commands = received_command;
}

// Ejecución de los comandos recibidos
//-----
switch(action_commands)
{
case NONE:
break;

case FIND_HOME:
servo1.write(180);
servo2.write(180);
action_commands = NONE;
break;

case INCREMENT_SERVO1_ANGLE:
if (actual_servo1_position + step_servomotors <= 180)
{
actual_servo1_position = actual_servo1_position + step_servomotors;
servo1.write(actual_servo1_position);
}
action_commands = NONE;
break;

case DECREMENT_SERVO1_ANGLE:
if (actual_servo1_position - step_servomotors >= 0)
{
actual_servo1_position = actual_servo1_position - step_servomotors;
servo1.write(actual_servo1_position);
}
action_commands = NONE;
break;

case INCREMENT_SERVO2_ANGLE:

```

```

if (actual_servo2_position + step_servomotors <= 180)
{
    actual_servo2_position = actual_servo2_position + step_servomotors;
    servo2.write(actual_servo2_position);
}
action_commands = NONE;
break;

case DECREMENT_SERVO2_ANGLE:
if (actual_servo2_position - step_servomotors >= 0)
{
    actual_servo2_position = actual_servo2_position - step_servomotors;
    servo2.write(actual_servo2_position);
}
action_commands = NONE;
break;

case SERVO_STEP_CHANGE:
step_servomotors = (((unsigned int)received_parameter_h) << 8) + (unsigned int)received_parameter_l;
action_commands = NONE;
break;

case CHANGE_TO_SIMULATION_MODE:
simulation_mode = true;
action_commands = NONE;
break;

case CHANGE_TO_OPERATIVE_MODE:
simulation_mode = false;
action_commands = NONE;
break;

case GO_TO_SERVO1_ANGLE:
actual_servo1_position = (((unsigned int)received_parameter_h) << 8) + (unsigned int)received_parameter_l;
servo1.write(actual_servo1_position);
action_commands = NONE;
break;

case GO_TO_SERVO2_ANGLE:
actual_servo2_position = (((unsigned int)received_parameter_h) << 8) + (unsigned int)received_parameter_l;
servo2.write(actual_servo2_position);
action_commands = NONE;
break;

default:
action_commands = NONE;
break;
}

} //Fin de la función loop

//=====
// Definición de funciones
// -----

unsigned int pc_serial_check_data(void)
{
    unsigned char comm = 0;

    if (Serial.available())
    {
        comm = Serial.read();
        return (unsigned int)comm;
    }
    else
    {
        return NO_DATA;
    }
}

```

```

}
}

void TimerISR(void)
{
  actual_servo1_position = servo1.read();
  actual_servo2_position = servo2.read();
  HR = dht.readHumidity();
  T = dht.readTemperature();
  unsigned char auxiliar_1 = 0;
  unsigned char auxiliar_2 = 0;
  unsigned int auxiliar_3 = 0;
  unsigned int auxiliar_4 = 0;
  unsigned char checksum = 0;

  if (simulation_mode == true)
  {
    // Transmisión de datos vía puerto serie (MODO SIMULACIÓN)
    // -----
    // Obs: este modo de funcionamiento del programa sólo sirve para monitorear los datos en forma legible usando el monitor
    // del IDE del Arduino o el software RealTerm

    Serial.print("Modo simulacion");
    Serial.print(" ");

    // Envío de Servo1 current_position
    Serial.print("Servo1: ");
    Serial.print(actual_servo1_position);
    Serial.print(" ");

    // Envío de Servo2 current_position
    Serial.print("Servo2: ");
    Serial.print(actual_servo2_position);
    Serial.print(" ");

    // Envío de HR y T
    Serial.print("HR: ");
    Serial.print(HR);
    Serial.print(" ");
    Serial.print("T: ");
    Serial.println(T);
  }
  else
  {
    // Transmisión de datos vía puerto serie (MODO OPERATIVO)
    // -----

    // El stream de salida responde a la siguiente estructura:

    // Byte 0: 0xFB
    // Byte 1: 0xF3 Encabezado
    // Byte 2: 0x20

    // Byte 3: 0xFF H_part Servo1 angle position
    // Byte 4: 0xFF L_part Servo1 angle position

    // Byte 5: 0xFF H_part Servo2 angle position
    // Byte 6: 0xFF L_part Servo2 angle position

    // Byte 7: 0xFF Byte 1 HR
    // Byte 8: 0xFF Byte 2 HR
    // Byte 9: 0xFF Byte 3 HR
    // Byte 10:0xFF Byte 4 HR

    // Byte 11:0xFF Byte 1 T
    // Byte 12:0xFF Byte 2 T
    // Byte 13:0xFF Byte 3 T
    // Byte 14:0xFF Byte 4 T
  }
}

```

```

// Byte 15:0xXX  Checksum

// Envío del encabezado
Serial.write(HEADER_0);
Serial.write(HEADER_1);
Serial.write(HEADER_2);

// Envío de Servo1 current_position (int)
auxiliar_1 = (unsigned char) ((actual_servo1_position & HIGH_PART_16)>>8);
auxiliar_2 = (unsigned char) (actual_servo1_position & LOW_PART_16);
checksum = checksum + auxiliar_1 + auxiliar_2;
Serial.write(auxiliar_1);
Serial.write(auxiliar_2); //Serial.write(0x01); Serial.write(0x02);

// Envío de Servo2 current_position (int)
auxiliar_1 = (unsigned char) ((actual_servo2_position & HIGH_PART_16)>>8);
auxiliar_2 = (unsigned char) (actual_servo2_position & LOW_PART_16);
checksum = checksum + auxiliar_1 + auxiliar_2;
Serial.write(auxiliar_1);
Serial.write(auxiliar_2); //Serial.write(0x03); Serial.write(0x04);

// Envío de HR (float) y T (float) (envía 4 bytes por cada float)
mi_union.arreglo_entrada[0]=HR; // 4 bytes
mi_union.arreglo_entrada[1]=T; // 4 bytes
for(int q = 0; q < 8; q++)
{
checksum = checksum + mi_union.arreglo_salida[q];
Serial.print(mi_union.arreglo_salida[q]);
}

// Checksum
Serial.write(checksum);
}
}

```

A.2. Interfaz de usuario de la aplicación *Interrogador Cámara de Humedad*

En esta sección se describe la interfaz de usuario del software generado como soporte del arreglo experimental asociado a la cámara de humedad.

Se realizó una aplicación que corre bajo Windows 7 empleando la plataforma de desarrollo LabView 12 de National Instruments. La ventana que conforma a la interfaz de usuario consta de tres solapas principales que son brevemente descritas a continuación:

- Solapa 1 (“*Presentation*”): contiene la información básica de la aplicación de software (autores/fecha/versión) y de la versión de la cámara de humedad sobre la cual opera. Ver Figura A2. 1.
- Solapa 2 (“*Communications Settings and Information*”): contiene los controles que permiten configurar el puerto de comunicación de la PC/notebook que la vincula con la placa Arduino que es parte del arreglo de hardware asociado a la cámara de humedad. Los parámetros que definen la comunicación digital sólo son cambiables mientras que el puerto no sea usado (es decir, que durante una comunicación en proceso,

no pueden cambiarse los parámetros que la definen). Por defecto se implementó una tasa de transmisión de símbolos establecida en 115200 baudios (máxima permitida por el protocolo de comunicaciones serie usado). No se implementó un bit de paridad para la detección de errores automática. Para identificar cada paquete de datos transmitido por la placa Arduino hacia la PC/notebook se implementó un *header* (encabezado de trama de datos) conformado por tres bytes (a saber, “0xFB 0xF3 0x20” en notación hexadecimal). La aplicación que corre en la PC permite configurar el código del *header* para mayor versatilidad de detección de mensajes en el canal de comunicaciones previniendo potenciales cambios a futuro. Además, esta solapa presenta información general del estado de la comunicación en “*tiempo de recepción*” de datos provenientes de la placa Arduino (dentro del recuadro titulado “*Communication Information*”) que permite identificar si el tráfico de datos es correcto. Ver Figura A2. 2.

- Solapa 3 (“*Motor Commands and Status*”): contiene la información del estado de apertura de las tapas de las bateas con las soluciones saturadas para la humidificación y deshumidificación del ambiente interno de la cámara, así como también las lecturas de humedad relativa y temperatura del sensor comercial DHT22 alojado dentro del prisma de PDC bajo ensayo. Se introdujeron botones y casillas de entrada situados dentro del recuadro llamado “*Position Commands*” para establecer el ángulo de apertura con el objetivo de comandar los servomotores vinculados a las bateas y así, proveer gobierno sobre la herramienta de actuación que debe utilizar el operador a fin de lograr el control de humedad. En el recuadro llamado “*System Control*” se brinda información de estado de funcionamiento interno del software y la posibilidad de cambiar el modo de operación de éste a modos que permiten realizar evaluaciones del funcionamiento y diagnósticos. Ver Figura A2. 3.

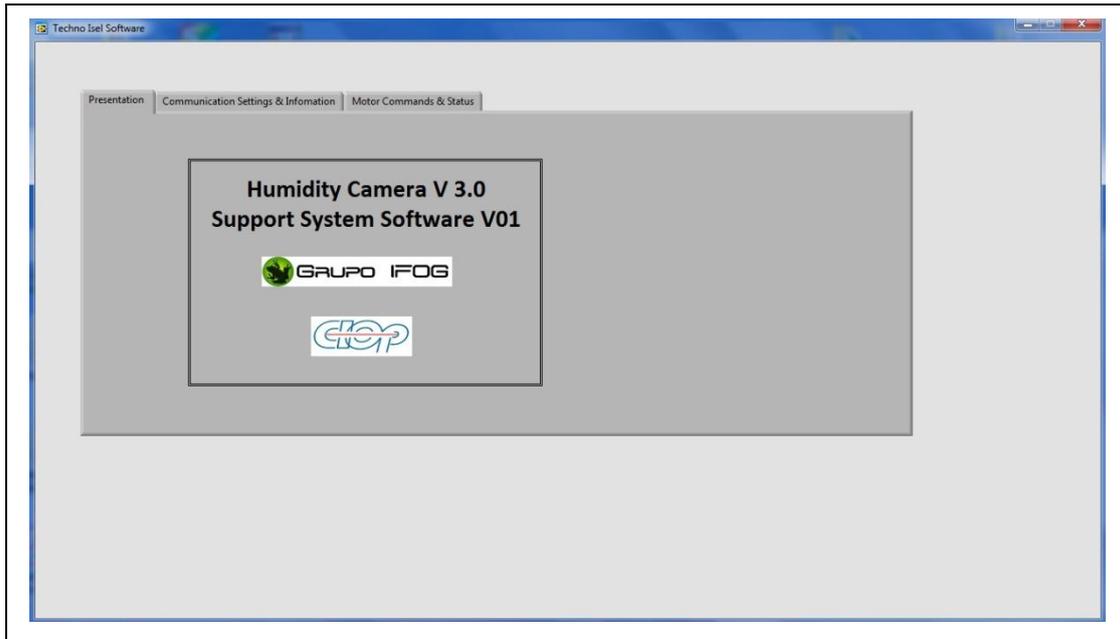


Figura A2. 1. Aspecto de la solapa 1 del software que corre en la PC/notebook.

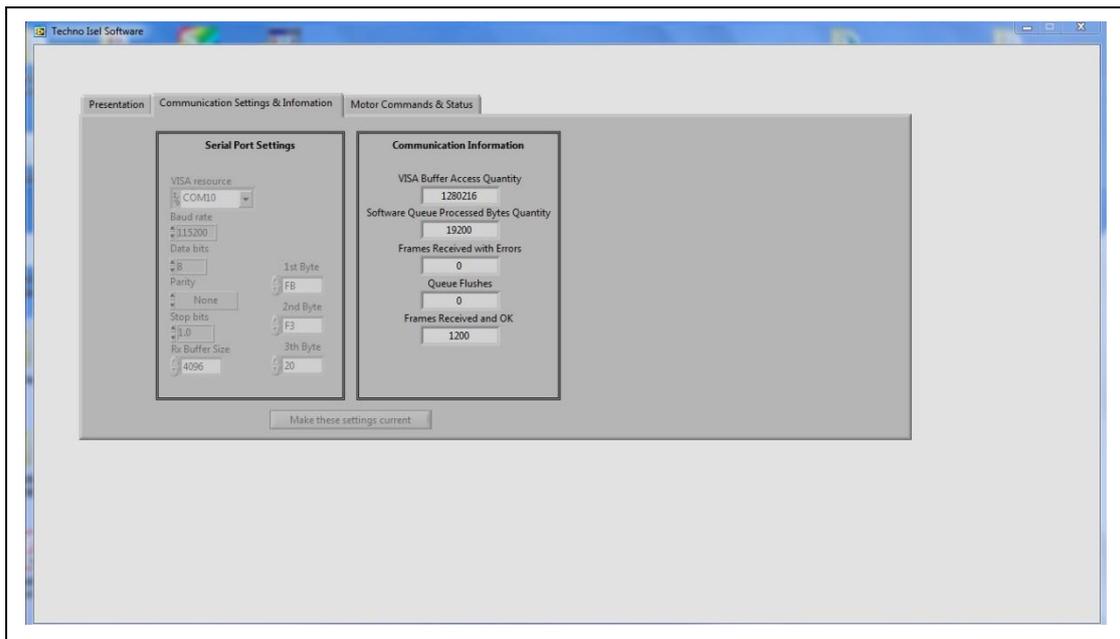


Figura A2. 2. Aspecto de la solapa 2 del software que corre en la PC/notebook.

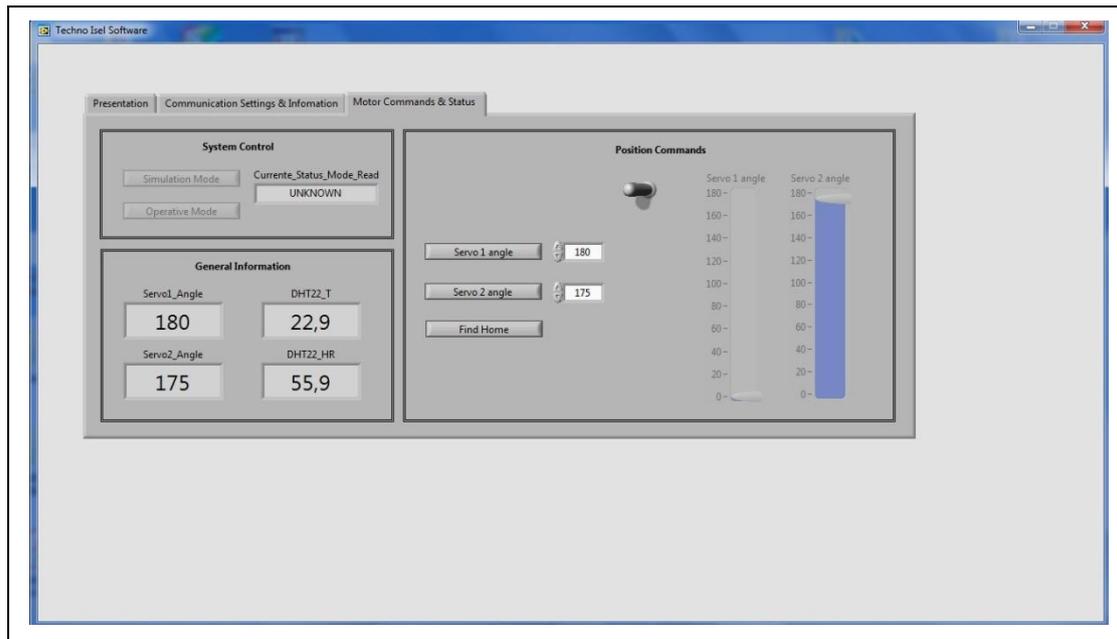


Figura A2. 3. Aspecto de la solapa 3 del software que corre en la PC/notebook.

Nota: en esta versión del software que corre en la PC/notebook no se incluyó la posibilidad de guardar en archivo un lote de datos adquiridos durante un lapso de tiempo. Como trabajo a futuro puede mejorarse este aspecto de la funcionalidad del software con el fin de automatizar la generación de gráficos que describan la evolución temporal de la HR y la T para analizar etapas transitorias, o con el fin de realizar cálculos estadísticos en lapsos de tiempo en los que la cámara se encuentre en estado de régimen tanto en HR como en T.