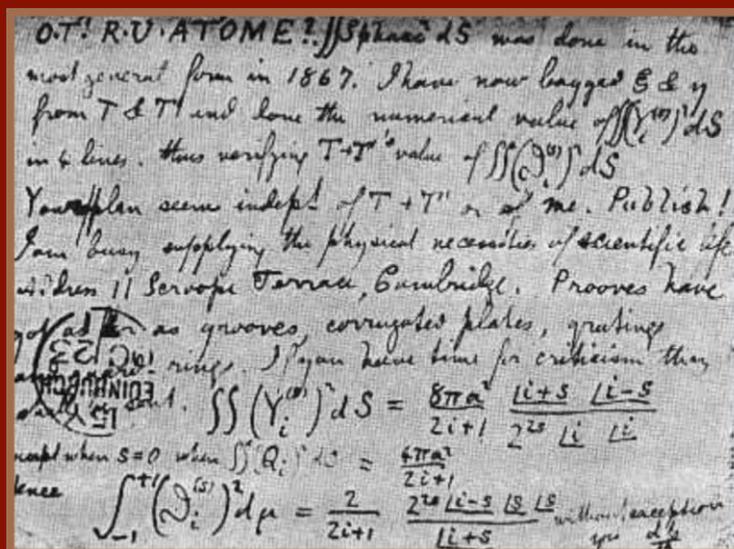


Tesis Doctoral

Ingeniería Aeronáutica

Monitorización de Estructuras Aeroespaciales y
Análisis de Técnicas de Integración de Sensores
de Bragg



Autor: Rosario Fernández Valderas

Director: Jaime Domínguez Abascal, Fernando Lasagni

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

2018



Tesis Doctoral
Ingeniería Aeronáutica

Monitorización de Estructuras Aeroespaciales y Análisis de Técnicas de Integración de Sensores de Bragg

Autor:

Rosario Fernández Valderas

Tutor:

Jaime Domínguez Abascal

Catedrático de Universidad

Director:

Fernando Lasagni

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Tesis doctoral: Monitorización de Estructuras Aeroespaciales y Análisis de Técnicas de Integración de Sensores de Bragg

Autor: Rosario Fernández Valderas

Tutor: Jaime Domínguez Abascal

Director Fernando Lasagni

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

Una vez terminada esta tesis doctoral, me gustaría agradecer a todas las personas gracias a las cuales ha sido posible. En primer lugar, quisiera agradecer al Centro Avanzado de Tecnología Aeroespacial (CATEC) y en especial al responsable de la división de Materiales y Procesos y director de esta tesis, el Dr. Fernando Lasagni, el brindarme la oportunidad de realizar este trabajo en un centro de primer nivel y en un campo tan apasionante como la monitorización de la salud estructural con redes de Bragg. Agradecer su continuo apoyo, útiles consejos, múltiples correcciones y por guiarme no solo en esta tesis, sino a través del mundo de la investigación.

Agradecer al Dr. Jaime Domínguez Abascal, tutor de esta tesis y referente a nivel técnico y académico. Gracias por sus valiosas aportaciones en las diversas líneas, así como por el tiempo dedicado a la corrección de la misma, que ha permitido concluir con éxito el trabajo de los últimos años.

No podría olvidarme de mis compañeros del área de Materiales y Procesos de CATEC, tanto de los actuales como los pasados, pues todos, en mayor o menor medida forman parte de esta tesis. En especial agradecer al doctor Nicolás Gutiérrez, con cuya colaboración realicé parte de este trabajo.

Por último, aunque no por ello menos importante, agradecer a mi familia todo el cariño y el apoyo incondicional que siempre me dan. A mis padres, por su constancia y esfuerzo, y por ser un ejemplo a seguir en todos los aspectos de la vida. A mi hermana Carmen, por hacerme creer que soy capaz de todo lo que me proponga y animarme siempre. A mi tía María Dolores y mis primos, Manuel y Josan, por apoyarme en todo momento. Y por supuesto, a Daniel Pérez, por su amor, cariño, sus consejos y por su paciencia durante todo el tiempo dedicado a esta tesis doctoral. Sin vosotros nada hubiera sido posible. Os quiero mucho.

"La vida no es fácil, para ninguno de nosotros. Pero...¡Qué importa! Hay que perseverar y, sobre todo, tener confianza en uno mismo. Hay que sentirse dotado para realizar alguna cosa y que esa cosa hay que alcanzarla, cueste lo que cueste."

Marie Curie, Premio Nobel de Física en 1903 y Premio Nobel de Química en 1911.

"La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando."

Pablo Picasso

Rosario Fernández Valderas

Sevilla, 2018

Resumen

La presente tesis doctoral tiene como objetivos el estudio y desarrollo de la tecnología de los sensores de Bragg para la monitorización estructural, evaluando sus principales limitaciones y deficiencias que impiden su aplicación en elementos reales en entornos industriales. Con este fin, se ha trabajado en diversas líneas de investigación, elaborando metodologías y proponiendo soluciones a dichos puntos débiles.

La validez de las redes de Bragg para medir cargas térmicas se ha demostrado a través de numerosos ensayos, tanto estáticos como dinámicos. La correcta medida de la temperatura hace posible la monitorización del curado de estructuras de material compuesto, permitiendo el análisis y la caracterización tanto de su proceso de fabricación como de su vida en servicio.

Aunque las múltiples ventajas de los FBGs son ampliamente conocidas en el ámbito industrial, su uso se encuentra restringido a aplicaciones de laboratorio bajo condiciones controladas, a consecuencia de su reducida tasa de supervivencia. Diversas soluciones se han desarrollado, permitiendo elaborar procedimientos robustos y sencillos de integración de sensores de fibra óptica en estructuras reales bajo condiciones de operación.

Las mejoras y herramientas desarrolladas en las diferentes líneas se han aplicado a demostradores representativos de la industria civil y aeroespacial, campos de especial relevancia para la tecnología de las redes de Bragg, donde su implementación mejora de forma significativa los procesos actuales de monitorización estructural y de mantenimiento.

Finalmente, un nuevo método de integración de sensores de Bragg en componentes metálicos se ha propuesto, el cual permite crear estructuras con sensores integrados en los puntos de interés. Dicho procedimiento es factible gracias al empleo de las tecnologías de fabricación aditiva.

Abstract

The present doctoral thesis has as objective the study and development of the technology of Fiber Bragg Grating sensors for the structural monitoring, evaluating its main limitations and deficiencies which impede its use at real elements under industrial environments. With this aim, several fields have been investigated, providing methodologies and solutions to those weak points.

The validity of Bragg sensors for the measurement of thermal loads has been demonstrated by means of numerous tests, both static and dynamic. The proper measure of the temperature enables to monitor the curing of composite material structures, being possible the analysis and characterisation of their manufacturing process and their service life.

Although the multiple advantages of FBGs are widely known at industrial level, their use is restricted to laboratory applications under controlled conditions, as a consequence of their low survival rate. Several solutions have been developed, allowing the elaboration of robust and simple procedures for the integration of fiber optic sensors in real structures under operational conditions.

The improvements and tools developed within the different lines have been applied to representative demonstrators of the civil and aerospace industries, relevant areas for the technology of Bragg sensors, where whose implementation could significantly improve the current processes of the structural monitoring and maintenance.

Finally, a new method for the integration of Bragg sensors at metallic components has been proposed, which enables to create structures with embedded sensors at the regions of interest. This procedure is feasible thanks to the use of additive manufacturing technologies.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Figuras	xix
1 Introducción	1
2. Estado del Arte	9
2.1. <i>Monitorización de la salud estructural</i>	9
2.2. <i>Sensores de Bragg</i>	15
2.2.1. Fibra óptica y tipos de sensores	15
2.2.2. Redes de Bragg	17
2.2.3. Aplicaciones de las redes de Bragg	28
2.3. <i>Medida de deformación</i>	32
2.3.1. Medida de deformación con redes de Bragg	36
2.4. <i>Medida de temperatura</i>	39
2.4.1. Medida de temperatura con redes de Bragg	40
2.5. <i>Monitorización del curado</i>	44
2.5.1. Métodos experimentales para la determinación de las tensiones residuales	45
2.5.2. Técnicas convencionales para monitorización del curado	46
2.5.3. Monitorización del curado de laminados de material compuesto mediante sensores de Bragg	47
2.6. <i>Métodos de integración de fibra óptica embebida en estructuras de material compuesto</i>	53
2.6.1. Conexionado de fibra óptica con salida por el borde	55
2.6.2. Conexionado de fibra óptica con salida por superficie	58

3. Compensación y medida de temperatura	63
3.1. <i>Materiales y métodos experimentales</i>	63
3.1.1. Materiales	63
3.1.2. Equipamiento	64
3.2. <i>Medida de temperatura</i>	66
3.2.1. Resultados	69
3.3. <i>Compensación de temperatura</i>	72
3.3.1. Resultados	74
3.4. <i>Ciclado térmico</i>	81
3.4.1. Resultados	82
3.5. <i>Discusión</i>	89
4. Manipulación de fibra óptica e integración en material compuesto	93
4.1. <i>Materiales y métodos experimentales</i>	94
4.1.1. Materiales	94
4.1.2. Equipamiento	95
4.2. <i>Fibra óptica embebida</i>	97
4.2.1. Manufactura de paneles usando conectores comerciales	98
4.2.2. Diseño y desarrollo de conectores y adaptadores	110
4.3. <i>Fibra óptica encolada</i>	118
4.3.1. Herramienta de posicionado de fibra óptica	119
4.3.2. Protector de conector	123
4.4. <i>Fibra óptica pseudoencolada o curada en superficie</i>	125
4.5. <i>Discusión</i>	127
5. Monitorización del curado	133
5.1. <i>Materiales y métodos experimentales</i>	133
5.1.1. Materiales	134
5.1.2. Equipamiento	135
5.2. <i>Resultados de ensayos con material MTM57/T700S</i>	136
5.2.1. Primer proceso de manufactura y curado de paneles	137
5.2.2. Segundo proceso de manufactura y curado de paneles	142
5.3. <i>Resultados de ensayos con material Z19.732</i>	146
5.4. <i>Discusión</i>	151
6. Implementación de la tecnología FBG en ensayos estructurales	155
6.1. <i>Monitorización estructural de cabina CFRP</i>	155

6.1.1.	Plan de sensorización e implementación del ensayo	156
6.1.2.	Resultados	159
6.2.	<i>Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono</i>	163
6.2.1.	Plan de sensorización e implementación del ensayo	164
6.2.2.	Resultados	168
6.3.	<i>Monitorización estructural de panel demostrador rigidizado CFRP</i>	183
6.3.1.	Proceso de fabricación, plan de sensorización e implementación del ensayo	184
6.3.2.	Resultados	186
6.4.	<i>Discusión</i>	192
7.	SHALM: Aplicación de SHM a componentes metálicos fabricados por AM197	
7.1.	<i>Materiales y métodos experimentales</i>	198
7.1.1.	Materiales	198
7.1.2.	Equipamiento	198
7.2.	<i>Estudio de geometrías</i>	200
7.3.	<i>Ensayos mecánicos</i>	204
7.4.	<i>Caso de estudio: Optimización topológica y sensorización de componente de vehículo lanzador</i>	207
7.4.1.	Introducción al proceso de optimización topológica	207
7.4.2.	Optimización topológica de soporte para conector	208
7.4.3.	Fabricación y sensorización	210
7.4.4.	Ensayos mecánicos	212
7.4.5.	Análisis de elementos finitos	216
7.5.	<i>Discusión</i>	219
8.	Conclusiones	223
	Referencias	227
	Anexo A: Compensación y medida de temperatura	245
	<i>Medida de temperatura</i>	245
	<i>Compensación de temperatura</i>	250
	<i>Ciclado térmico</i>	260
	Anexo B: Monitorización del curado	265
	<i>Resultados de ensayos con material MTM57/T700S</i>	265
	<i>Resultados de ensayos con material Z19.732</i>	272

Anexo C: Implementación de la tecnología FBG en ensayos estructurales	275
<i>Monitorización estructural de cabina CFRP</i>	<i>275</i>
<i>Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono</i>	<i>278</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de empleo de material compuesto en las aeronaves Airbus [HEL 2014].	1
Figura 2. Distribución de costes de aerolíneas en 2014 [LAN 2016].	3
Figura 3. Defectos y daños a detectar mediante SHM [ROA 2011].	14
Figura 4. Áreas de interés para la aplicación de SHM [ROA 2011].	14
Figura 5. Esquema de la estructura de la fibra óptica.	16
Figura 6. Esquema de las longitudes de onda características para la fibra distribuida.	17
Figura 7. Esquema de funcionamiento de la red de Bragg.	18
Figura 8. Variación del índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica [WER 2013].	19
Figura 9. Relación entre la dirección de polarización y la longitud de onda reflejada [EMM 2009].	22
Figura 10. Espectro reflejado por un sensor de Bragg previamente (línea de puntos) y tras (línea continua) aplicar carga lateral [GAF 2000].	22
Figura 11. Marcado de la fibra empleando una máscaras de fase [WER 2013].	26
Figura 12. Ejemplos de distintos tipos de redes de Bragg [MEG 2007].	27
Figura 13. Elementos que constituyen un sistema de monitorización óptico basado en FBGs [BAR 2007].	28
Figura 14. (a) Esquema del sistema desarrollado por ECN para monitorización de aerogeneradores [RAD 2012] y (b) fibra óptica en el interior de pala de aerogenerador [IND 2013].	30
Figura 15. Probetas durante el ensayo [CER 2012].	31

Figura 16.Comparativa dimensional entre galgas extensométricas y sensor FBG (ubicado entre las galgas).....	33
Figura 17. Comparación entre (a) galga extensométrica y (b) sensor de fibra óptica para medidas a alta temperatura [RIC 2012]......	33
Figura 18.Comparación de instrumentación de ensayos mecánicos con bandas extensométricas y sensores de fibra óptica [RIC 2012]......	34
Figura 19. (a) Configuración de las probetas y (b) comparación de las deformaciones medidas con FBGs y galgas extensométricas [HON 1998]......	38
Figura 20. (a) Roseta formada por FBGs en parche de material compuesto y (b) comparación de las lecturas durante el ensayo flexión [RAM 2011]......	39
Figura 21. Esquema de sensor de Bragg en el interior de tubo capilar para aislar la deformación mecánica del incremento de temperatura [LUY 2010].	41
Figura 22. Instalación típica para la medida de temperatura y deformación con dispositivos tradicionales y redes de Bragg [RIC 2012].	42
Figura 23. (a) Esquema de fibra óptica sometida a estado multiaxial de cargas y (b) división del pico reflejado por el sensor de Bragg como consecuencia del estado multiaxial de cargas.	48
Figura 24. Esquema del sensor encapsulado [PAR 2010]......	48
Figura 25. Evolución del espectro reflejado por el FBG de compensación durante la etapa de calentamiento [TSA 2009].	49
Figura 26. Desplazamiento de la longitud de onda de los sensores embebidos en la probeta con 12 capas de pre-impregnado [MON 2007]......	50
Figura 27. Representación del cambio de longitud de onda frente al tiempo [MUR 2000]......	51
Figura 28. Esquema de los defectos producidos por la fibra óptica embebida [BAL 2006].	53
Figura 29. Fibra óptica embebida entre capas de pre-impregnado a +45° y -45° [LEV 2008]......	54
Figura 30. Tubo capilar protector de salida de fibra óptica embebida por el borde:	

(a) tubo de teflón [KIN 2014] y (b) tubos capilares termoplásticos de diversos tamaños [GRE 1999].....	56
Figura 31. Probeta con salida de fibra óptica por el borde con protección de caucho [FRO 2006].	57
Figura 32. (a) Conector de borde diseñado por Green y Shafir [GRE 1999] y (b) conector tipo FC integrado en laminado [SJO 2001].	57
Figura 33. Imágenes de (a) protector de salida de fibra óptica en superficie y (b) conectorización de fibra óptica con salida en superficie [KAN 2000].	59
Figura 34. Protección de salida de fibra óptica por superficie [FRO 2006].....	59
Figura 35. (a) Integración de fibra óptica tras la fabricación del laminado y (b) probeta con conector de superficie y bloque auxiliar para el curado [BEU 2012]. ...	60
Figura 36. Proceso de integración de conectores de superficie [KIN 2014].....	61
Figura 37. Conector en superficie [GRE 1999].	61
Figura 38. Interrogador óptico sm130-700.	64
Figura 39. Perfil de temperatura aplicado durante los ensayos.....	66
Figura 40. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 11 T _{máx.} =110°C).	70
Figura 41. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 11 T _{máx.} =110°C).	70
Figura 42. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 11 T _{máx.} =110°C).	71
Figura 43. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 7, Probeta CT-01 (T _{máx.} =110°C).	75
Figura 44. Medida de temperatura en el ensayo N° 7, Probeta CT-01 (T _{máx.} =110°C).	76
Figura 45. Medida de deformación durante el ensayo N° 7, Probeta CT-01 (T _{máx.} =110°C).	77
Figura 46. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 7, Probeta CT-01 (T _{máx.} =110°C).	77

Figura 47. Resultados del ensayo de tracción previo al ciclado térmico de la probeta FT-01.....	83
Figura 48. Medida del incremento de temperatura durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).....	84
Figura 49. Detalle de la medida del incremento de temperatura en el ciclo N°3: (a) alta temperatura y (b) baja temperatura (Probeta FT-01).	84
Figura 50. Medida del incremento temperatura durante la aplicación de los ciclos N° 6-20 (Probeta FT-01).	85
Figura 51. Deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).	86
Figura 52. Detalle de las deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).	86
Figura 53. Deformaciones medidas durante la aplicación de los ciclos N° 6-20 (Probeta FT-01).	87
Figura 54. Resultados del ensayo de tracción tras 20 ciclos térmicos (probeta FT-01).	87
Figura 55. Ciclo de curado del material MTM57/T700S.	95
Figura 56. Esquema de fibra óptica embebida.	102
Figura 57. Paneles (a) N° 2, (b) N° 3 y (c) N° 4 con fibra óptica embebida previamente al curado.	104
Figura 58. Estado tras el curado del panel (a) N° 3 y (b) N° 4.	105
Figura 59. Vista de detalle del adaptador del panel (a) N° 3 y (b) N° 4.	105
Figura 60. (a) Estado tras el curado y (b) vista de detalle del adaptador del panel N° 2.	105
Figura 61. Protector de adaptador.	106
Figura 62. Resultado tras el curado del panel (a) N° 5 y (b) N° 6.	107
Figura 63. Resultado tras el curado del panel (a) N° 7 y (b) N° 8.	109
Figura 64. Vista de detalle del adaptador del panel (a) N° 7 y (b) N° 8.	109

Figura 65. Vista posterior del panel (a) N° 7 y (b) N° 8.	110
Figura 66. Adaptador de acero V1: (a) componentes por separado y (b) montaje del conjunto.	111
Figura 67. Adaptador hembra V1 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.	111
Figura 68. Férula de zirconio para conexión con equipo de medida: (a) modelo CAD y (b) elemento real.	112
Figura 69. Cánula de zirconio: (a) modelo CAD y (b) elemento real.....	112
Figura 70. Adaptador macho V1 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.	112
Figura 71. Detalle de la instalación del adaptador V1.....	113
Figura 72. Adaptador hembra V2 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.	113
Figura 73. Adaptador de acero V2.....	114
Figura 74. Adaptador macho V3 (a) vista de perspectiva, (b) vista frontal y (c) corte longitudinal.....	115
Figura 75. Adaptador V4 (acero AISI 316 L).	115
Figura 76. Adaptador hembra V4 (a) vista frontal, (b) vista en perspectiva superior y (c) corte longitudinal.	116
Figura 77. Adaptador hembra V4 de (a) Ti6Al4V (macizo), (b) poliamida DuraForm PA (macizo) y (c) poliamida DuraForm PA (hueco).	116
Figura 78. Esquema de la configuración de los paneles N° 9, 10 y 11.	117
Figura 79. Paneles (a) N° 9, (b) N° 10 y (b) N° 11 tras el curado.	117
Figura 80. Herramienta de posicionado de fibra óptica.	119
Figura 81. Disco de herramienta de posicionado de fibra óptica (a) perspectiva frontal y (b) perspectiva lateral.	120
Figura 82. Ranuras para amarre de los extremos de la fibra óptica.....	120
Figura 83. (a) Vista superior y (b) lateral del disco.	121

Figura 84. Carrete.	121
Figura 85. Mango de la herramienta de posicionado de fibra óptica.	122
Figura 86. (a) Detalle del freno en modelo CAD y (b) muelle de freno.....	122
Figura 87. Espuma para frenado de disco.....	123
Figura 88. Herramienta de posicionado de fibra óptica.	123
Figura 89. Protector de adaptador V1 (a) modelo CAD y (b) elemento real.....	124
Figura 90. Protector de adaptador V2 (a) modelo CAD y (b) elemento real.....	124
Figura 91. Vista de detalle de la fibra pseudoencolada.....	126
Figura 92. Clasificación de materiales: densidad vs coeficiente de expansión térmica.	131
Figura 93. Ciclo de curado del material Z19.732.	134
Figura 94. Autoclave empleada para el curado del material compuesto Z19.732. .	136
Figura 95. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en los paneles N° (a) 1 y (b) 3, 4 y 5.	137
Figura 96. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en el panel N° 2.....	137
Figura 97. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N° 1.	138
Figura 98. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 1).....	138
Figura 99. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 1).	139
Figura 100. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a	140
Figura 101. Medida de deformaciones en el panel N° 1.	141
Figura 102. Comparación del cambio de longitud de onda de los sensores de deformación en los paneles N° 1 y 2.....	142

Figura 103. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N° 3.....	143
Figura 104. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a	144
Figura 105. Medida de deformaciones en el panel N° 3.	145
Figura 106. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en los paneles N° 6 y N° 7.....	146
Figura 107. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura (panel N° 6).	147
Figura 108. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 6).....	148
Figura 109. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 6).....	149
Figura 110. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 18,5°C).....	149
Figura 111. Medida de deformaciones en el panel N° 6.	150
Figura 112. Incremento de la longitud de onda durante el curado de dos FBGs embebidos (n° 4 y 5) y registro de T^{ra} mediante termopar (n° 1) [SHE 2011].....	152
Figura 113. Superposición de las curvas de cambio de longitud de onda de los FBGs embebidos y del análisis de calorimetría diferencial de barrido [MON 2007].....	154
Figura 114. Modelo CAD de la cabina (a) perfil, (b) alzado y (c) planta; (d) cabina sobre rig de ensayo.	156
Figura 115. Circuitos de fibra óptica (a) línea 1, (b) línea 2, (c) línea 3 y (d) línea 4. Las posiciones de las bandas extensométricas se representan en negro.....	158
Figura 116. Imágenes de detalle de la instalación de fibra óptica en la superficie de la cabina: (a) línea 2, (b) línea 4, (c) línea 2 y (d) línea 1. El recorrido de la fibra óptica ha sido destacado mediante líneas discontinuas.	158
Figura 117. Detalles de la instalación de fibra óptica en la superficie de la cabina:	

dispositivos para fijación de conectores	159
Figura 118. Medida de deformación de sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 1)	160
Figura 119. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 2)	163
Figura 120. Imágenes de los pilares ensayados (a) P1 y (b) P2.....	164
Figura 121. Ensayo de pilar de hormigón armado reforzados con CFRP.	165
Figura 122. Dimensiones del pilar y configuración de sensores	166
Figura 123. Detalle del dispositivo protector de conector de fibra óptica.	166
Figura 124. Detalles de la sensorización de los pilares (a) galgas extensométricas instaladas sobre el recubrimiento de carbono, (b) marcadores para medida con sistema PONTOS, (c) disposición del sistema PONTOS durante la medida y (d) detalles de los sensores de fibra óptica y las bandas extensométricas.....	167
Figura 125. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo I: precarga.	169
Figura 126. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo II: rotura.	171
Figura 127. Campos de desplazamientos (major displacement) en cuatro instantes del periodo de rotura: (a) 0 kN, (b) 659 kN, (c) 337 kN y (d) 999,4 kN.....	173
Figura 128. Imágenes del pilar P1 tras la rotura.	174
Figura 129. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo I: precarga.	175
Figura 130. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.....	177
Figura 131. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo III: ciclado a alto nivel de carga.....	179
Figura 132. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo IV: rotura.....	181
Figura 133. Campos de desplazamientos (major displacement) en cuatro instantes	

del periodo de rotura: (a) 107 kN, (b) 917 kN, (c) 929 kN y (d) 933 kN.....	183
Figura 134. (a) Esquema y (b) panel rigidizado.....	184
Figura 135. Esquema de los rigidizadores en forma de L.....	185
Figura 136. Esquema de la ubicación de los sensores: redes de Bragg (amarillo) y galgas extensométricas (verde).	186
Figura 137. Resultados del ensayo de tracción del panel rigidizado (27 kN).	187
Figura 138. Esquema de la situación del eje neutro.....	188
Figura 139. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador duro-duro (2.200 N).	189
Figura 140. Pandeo del rigidizador duro-duro durante el ensayo de flexión hasta 2.200 N.	190
Figura 141. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador duro-blando (2.200 N).	191
Figura 142. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador blando-blando (2.200 N).	192
Figura 143. Esquema general de un proceso de inspección mediante XCT.....	199
Figura 144. Equipo de Tomografía Computarizada.	200
Figura 145. Plano acotado de la configuración de la placa.	201
Figura 146. Esquema de los conductos tipo 1.	202
Figura 147. Radiografía de la placa (conductos tipo 1 y 2).....	202
Figura 148. Esquema de los conductos tipo 3.	203
Figura 149. Radiografía de la placa (conductos tipo 3 y 4).....	203
Figura 150. Esquema de los conductos tipo 4.	204
Figura 151. Esquema de introducción de fibras con soldaduras.....	204
Figura 152. Plano acotado de la probeta PR05.....	205
Figura 153. Probeta PR05.....	205

Figura 154. Fuerza vs deformación en el ensayo III (hasta 12.000N).	206
Figura 155. (a) Lanzador Vega en la plataforma de lanzamiento previo al despegue [ESA 2016] y (b) Etapas estructurales del Lanzador Vega [LAG 2013].	208
Figura 156. (a) ACU Vega 937 en configuración estándar y (b) diseño original del soporte para conector [LAG 2013].	209
Figura 157. Vista (a) frontal y (b) posterior del soporte conector optimizado.	209
Figura 158. (a) Geometría optimizada con rejilla y (b) pieza con soportes para su fabricación mediante AM.	210
Figura 159. Soporte original y optimizado fabricado mediante AM en AISI 316 L (a) adheridos a la placa de fabricación y (b) extraídos de la placa.	210
Figura 160. Radiografía del soporte para conector optimizado, con canales internos para la integración de fibra óptica.	211
Figura 161. Imágenes del soporte para conector tras la instalación de las redes de Bragg.	212
Figura 162. Modelo del (a) utillaje y (b) set-up para el ensayo del soporte para conector.	212
Figura 163. Set-up de ensayo del soporte para conector.	213
Figura 164. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 1.500 N.	214
Figura 165. Representación (a) 3D y (b) plana de la longitud de onda reflejada por el sensor de la base (FBG 1) durante el ensayo hasta 1.500 N.	216
Figura 166. Representación (a) 3D y (b) plana de la longitud de onda reflejada por el sensor de la torreta (FBG 2) durante el ensayo hasta 1.500 N.	216
Figura 167. (a) Perspectiva y (b) vista superior del mallado del soporte para conector optimizado con conductos para alojar los sensores de fibra óptica.	217
Figura 168. Distribución de deformaciones en el soporte para conector: perspectiva (a) frontal y (b) posterior.	218
Figura 169. Distribución de deformaciones en la sección del soporte para conector que contiene (a) el sensor FBG-1 y (b) el sensor FBG-2.	219

Figura 171. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 1 $T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).....	245
Figura 172. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 1 $T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).	245
Figura 173. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 1 $T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).....	246
Figura 174. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 6 $T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).....	247
Figura 175. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 6 $T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).	247
Figura 176. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 6 $T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).....	248
Figura 177. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 1, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).	250
Figura 178. Medida de temperatura en el ensayo N° 1 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).	250
Figura 179. Medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).....	251
Figura 180. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).	251
Figura 181. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 4, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).	252
Figura 182. Medida de temperatura en el ensayo N° 4 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).	252
Figura 183. Medida de deformación durante el ensayo N° 4, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).....	253
Figura 184. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 4, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).	253
Figura 185. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 1, Probeta CT-02 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).	254
Figura 186. Medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-02	

(T _{máx.} =100°C).....	254
Figura 187. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N ^o 1, Probeta CT-02 (T _{máx.} =100°C).....	255
Figura 188. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N ^o 4, Probeta CT-02 (T _{máx.} =105°C).....	256
Figura 189. Medida de deformación durante el ensayo N ^o 4, Probeta CT-02 (T _{máx.} =105°C).....	256
Figura 190. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N ^o 4, Probeta CT-02 (T _{máx.} =105°C).....	257
Figura 191. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N ^o 7, Probeta CT-02 (T _{máx.} =110°C).....	258
Figura 192. Medida de deformación durante el ensayo N ^o 7, Probeta CT-02 (T _{máx.} =110°C).....	258
Figura 193. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N ^o 7, Probeta CT-02 (T _{máx.} =110°C).....	259
Figura 194. Resultados del ensayo de tracción previo al ciclado térmico de la probeta FT-02.....	260
Figura 195. Medida del incremento de temperatura durante los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).....	260
Figura 196. Detalle de la medida del incremento de temperatura en el ciclo N ^o 3: (a) alta temperatura y (b) baja temperatura (Probeta FT-02).....	261
Figura 197. Medida del incremento temperatura durante la aplicación de los ciclos N ^o 6-20 (Probeta FT-02).....	261
Figura 198. Deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).....	262
Figura 199. Detalle de las deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).....	262
Figura 200. Deformaciones medidas durante la aplicación de los ciclos N ^o 6-20 (Probeta FT-02).....	263

Figura 201. Resultados del ensayo de tracción tras la aplicación de 20 ciclos térmicos (probeta FT-02).....	263
Figura 202. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación (panel N° 2) y temperatura (panel N° 1).....	265
Figura 203. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 2).....	266
Figura 204. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 2).....	266
Figura 205. Medida de deformaciones en el panel N° 2.	267
Figura 206. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N° 4.....	267
Figura 207. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 4).....	268
Figura 208. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 4).....	268
Figura 209. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a	269
Figura 210. Medida de deformaciones en el panel N°4.	269
Figura 211. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N° 5.....	270
Figura 212. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 5).....	270
Figura 213. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 5).....	271
Figura 214. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a	271
Figura 215. Medida de deformaciones en el panel N° 5.	272

Figura 216. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura (panel N° 7).	272
Figura 217. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 7).	273
Figura 218. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 7).	273
Figura 219. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 18,5°C).	274
Figura 220. Medida de deformaciones en el panel N° 7.	274
Figura 221. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 2).	275
Figura 222. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 3).	276
Figura 223. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 4).	276
Figura 224. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 3).	277
Figura 225. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 4).	277
Figura 226. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo I: precarga.	278
Figura 227. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo I: precarga.	278
Figura 228. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo II: rotura.	279
Figura 229. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo II: rotura.	279
Figura 230. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo I: precarga.	280

Figura 231. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo I: precarga.	280
Figura 232. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.	281
Figura 233. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.	281
Figura 234. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo III: ciclado a bajo nivel de carga.	282
Figura 235. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo III: ciclado a alto nivel de carga.	282
Figura 236. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo IV: rotura.	283
Figura 237. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo IV: rotura.	283

1 INTRODUCCIÓN

EL empleo de materiales compuestos ha experimentado un aumento significativo en los nuevos diseños de aeronaves, gracias a sus excelentes propiedades mecánicas. En aeronaves modernas, como el Boeing B787 o el Airbus A350 (Figura 1), el porcentaje volumétrico de material compuesto asciende al 80%, lo cual supone un 50% del peso de la estructura.

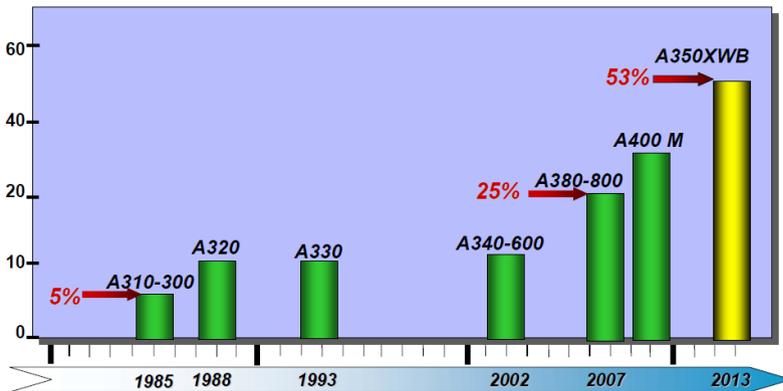


Figura 1. Porcentaje de empleo de material compuesto en las aeronaves Airbus [HEL 2014].

Se estima que la demanda de estructuras de fibra de carbono en 2020 se incrementará un 275% respecto a la de 2010, no solo en el ámbito aeroespacial

(220%), sino también otros sectores como el energético, con la industria eólica (700%) o el de almacenamiento de gasóleos (410%) [BLA 2011].

Debido al extendido uso de los materiales compuestos, es necesario tener un completo conocimiento de su comportamiento en todas las situaciones a las que se enfrentará en su vida útil, para garantizar que la estructura cumple los requisitos de seguridad establecidos. Un aspecto importante es el desarrollo de técnicas de detección de daños en el componente antes de que se produzca el fallo. Existen numerosas técnicas no destructivas que permiten detectar la presencia de daños sin deteriorar la estructura. Entre estas cabe destacar la inspección visual, radiografía, ultrasonidos, líquidos penetrantes, video correlación o laser sheroigraphy, las cuales se encuentran en constante desarrollo. Cada una presenta una serie de ventajas sobre las otras, sin embargo, todas requieren inmovilizar la estructura para realizar la inspección, siendo a menudo difíciles de aplicar a grandes componentes y pudiendo transcurrir grandes periodos de tiempo desde la aparición de daño hasta su detección. Esto supone un riesgo de seguridad, el cual se intenta reducir aumentando el número de operaciones de mantenimiento.

SHM (*Structural Health Monitoring*) es un conjunto de técnicas que se dedican a monitorizar la salud de estructuras durante su vida útil. Dicha monitorización consiste en detectar cambios en el material o en las condiciones geométricas del sistema que puedan afectar negativamente a sus propiedades [FAR 2006]. De esta forma, es posible minimizar las operaciones de mantenimiento a aquellos instantes en los que se haya detectado algún cambio en la configuración o estado del componente.

El desarrollo de las técnicas de SHM no sólo está vinculado al crecimiento del empleo de los materiales compuestos. La mayoría de empresas, tanto públicas como privadas, están interesadas en detectar el daño en sus productos e infraestructuras tan pronto como sea posible, con objeto de mejorar la seguridad y reducir el impacto económico de un potencial fallo. A modo de ejemplo, en la actualidad no existen métodos fiables para determinar si los edificios son seguros para ser ocupados tras un terremoto de alta intensidad. Las técnicas de SHM pueden proporcionar la tecnología para minimizar la incertidumbre asociada a la valoración de los daños ocasionados. El rápido realojo de edificios, en particular, aquellos relacionados con la fabricación de productos, puede mitigar significativamente las pérdidas económicas producidas por seísmos. Asimismo, numerosas infraestructuras técnicas se encuentran próximas o exceden su vida

inicial de diseño. Como resultado de problemas económicos, dichas estructuras (tanto civiles como mecánicas y aeroespaciales) están siendo usadas más allá de la previsión de años inicial y con la acumulación de daños asociados, motivo por el que la monitorización de la salud de las estructuras es cada vez más importante.

Las técnicas de SHM requieren de la observación continua de sistema mediante una red de sensores distribuidos sobre el mismo. Los sensores, conectados con un sistema central, proporcionan información a tiempo real sobre su estado. Esto permite cambiar la filosofía de mantenimiento, actualmente en base a periodos de tiempo, por una metodología basada en la condición (Figura 2). La operación segura y los beneficios económicos que dicha filosofía conlleva solo podrán ser llevados a la práctica si el sistema de monitorización proporciona alertas con la suficiente antelación para tomar acciones correctivas antes de que el daño evolucione hasta el nivel de fallo de la estructura.

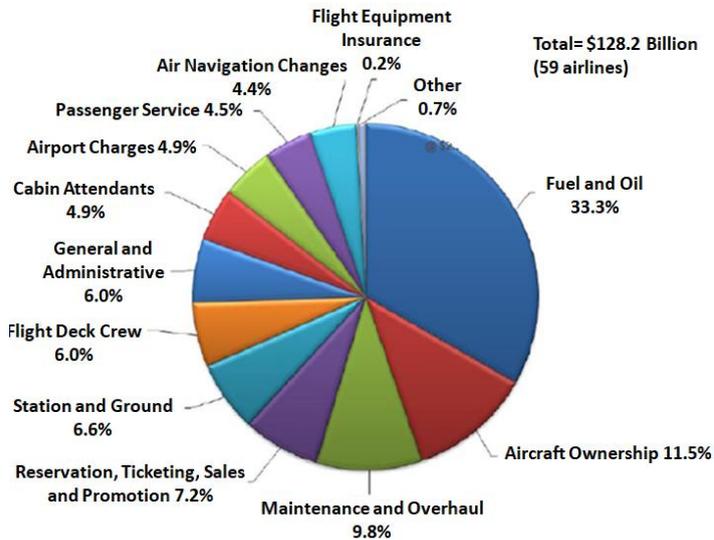


Figura 2. Distribución de costes de aerolíneas en 2014 [LAN 2016].

Históricamente, la monitorización de estructuras se ha efectuado a través de un número limitado de bandas extensométricas y acelerómetros [LEV 2008]. En los últimos 20 años, el campo de la condición estructural y la monitorización de la salud han experimentado numerosas contribuciones, desarrollándose diversas técnicas. Varias de dichas técnicas se fundamentan en la tecnología de fibra óptica,

en especial en las redes de Bragg, al tratarse de una técnica prometedora no solo para mejorar la operación diaria de las estructuras (mediante la monitorización de temperatura, deformación y la detección de daños), sino también su proceso de fabricación (en el caso de material compuesto).

Aunque esta tecnología presenta un alto nivel de desarrollo en el ámbito de laboratorio, aún existen numerosas barreras tecnológicas que impiden su aceptación en la comunidad industrial, y en particular, en el sector aeroespacial. Esta aceptación es especialmente compleja debido a los estrictos requisitos de operación, así como a la falta de comprensión del comportamiento de los sensores de fibra óptica embebidos en estructuras de gran tamaño. La incertidumbre debe reducirse validando el empleo de la tecnología en demostradores reales, para conseguir la completa aceptación de la comunidad ingenieril. Para ello, es necesaria la aplicación de estándares industriales universalmente aceptados, que incluyan diversas líneas de desarrollo de los sensores de fibra óptica:

- Estructura o vehículo sensorizado: La estructura o vehículo sensorizado debe presentar una extensa red de sensores, análoga a un sistema nervioso. Dichos sensores deben ser adheridos a la superficie y embebidos en el interior del material. De esta forma, se podrá obtener un conocimiento exhaustivo del comportamiento en servicio de las estructuras y vehículos, pudiéndose retroalimentar los modelos, los sistemas de control y actualizar las simulaciones. La densidad de sensores debe ser elevada, similar a los grados de libertad presentes en un modelo de elementos finitos, siendo mayor en regiones más solicitadas para poder extraer información completa del estado de la estructura. De esta forma, los modelos de elementos finitos podrían ser mejorados, pudiéndose comparar de forma explícita los resultados reales con los de la simulación.
- Fabricación e instalación de sensores: Se debe desarrollar un proceso de instalación de sensores rápido y robusto, que garantice su supervivencia en un entorno industrial.
- Ensayos: Es necesario reducir los plazos de desarrollo de estructuras y vehículos. El empleo de sensores de fibra óptica permitirá acortar el tiempo de instalación de la instrumentación, aportando mayor información.

El objetivo de esta tesis doctoral es desarrollar soluciones que favorezcan la industrialización de los sensores de Bragg y su aceptación por la comunidad ingenieril, resolviendo las barreras tecnológicas anteriormente indicadas que dificultan su aplicación en estructuras reales en servicio. De esta forma se pretende

aumentar el TRL (*Technology Readiness Level*) de la tecnología, pasando de un nivel 4 (prototipo de pequeña escala) a los niveles 5 o 6 (prototipos de gran escala y sistema prototipo integrado en entorno industrial, respectivamente).

La relevancia y actualidad de esta temática y de los aspectos analizados queda patente en los múltiples *Call for Proposals* presentes en las convocatorias europeas *Clean Sky 2* (CS2) de 2015 y 2016 referentes a la monitorización de la salud estructural, sensores de fibra óptica y redes de Bragg. Dentro de la guía de tecnologías del programa, una de las líneas de desarrollo es la monitorización de la salud estructural. En especial, se destaca la integración de las tecnologías de SHM en elementos de material compuesto, que permitan reducir los costes de mantenimiento y el riesgo de fallos de estructuras muy solicitadas. En el paquete de trabajo *Advanced Technologies for Multi-Purpose Testing* se propone el desarrollo de un nuevo conjunto de tecnologías para ser maduras durante su integración en demostradores de gran tamaño. Una de las tecnologías consideradas son los sensores de fibra óptica para la medida de temperatura y deformación. Esta tecnología proporcionaría información del campo semi-completo con gran precisión, pudiendo ser los sensores integrados directamente en la aerestructura para la monitorización durante el vuelo. Otra aplicación de dichos sensores sería la monitorización de temperaturas a lo largo de tuberías, cables y sistemas instalados en el vehículo aéreo.

Algunos de los *calls* de esta convocatoria se numeran a continuación:

- JTI-CS2-2016-CFRP03-FRC-02-15 *Advanced Health Monitoring System for Next Generation Materials*

Este proyecto, que cuenta con un presupuesto de 500.000 €, tiene como objetivo definir un sistema avanzado de monitorización de la salud estructural de los componentes rotatorios de las cajas de cambio de rotores de aeronaves. Este sistema deberá monitorizar el desgaste y los fallos del componente, logrando un alto nivel de seguridad y fiabilidad y optimizando los costes de mantenimiento.

- JTI-CS2-2016-CFP03-SYS-02-15 *Smart Oil Pressure Sensors for Oil Cooled Starter/Generator*

Se trata de desarrollar y ensayar un sensor de presión de aceite inteligente que opere en ambientes duros (temperatura, presión, vibración, etc.). El sensor integrará un sistema de monitorización capaz de detectar fallos y predecirlos. Para este desarrollo se dispone de un presupuesto de 600.000 €.

- JTI-CS2-2016-CFP03-FRC-01-08 *High Speed HVDC Generator/Motor*

Con un presupuesto de 1.000.000 €, este proyecto pretende diseñar, desarrollar, ensayar y cualificar en vuelo un sistema generador de alta velocidad y alto voltaje para ser instalado en la próxima generación de *Civil Tilt Rotor*. El diseño final incluye un sistema de monitorización del equipo.

Estos nuevos desarrollos se fundamentan en los avances y logros alcanzados en proyectos europeos previamente realizados:

- FOS3D (*Fiber Optic System for Deflection and Damage Detection*): proyecto perteneciente al séptimo Programa Marco (7th FP) finalizado en 2014, en el cual se trabajó en el desarrollo de una tecnología basada en fibra óptica que ayudara simultáneamente a controlar la deflexión y monitorizar la integridad estructural de alas con geometría variable.

- FOSAS (*Fiber Optic Sensors Applications for Structural Health Monitoring*): este proyecto, que se finalizó en 2015, estaba dirigido a la explotación de los sensores de fibra óptica para la monitorización de la salud de estructuras y materiales aeronáuticos. Se organizó en tres tareas: (i) empleo de FBG para la evaluación de deformaciones durante ensayos de fatiga de componentes metálicos en ambientes corrosivos, (ii) desarrollo y ensayo de un nuevo interrogador de FBG y (iii) empleo de fibra óptica estándar para el desarrollo de sensores distribuidos de deformación y temperatura (Raman, Brillouin y Rayleigh).

- SMASH (*Smart Methodologies and Multilevel/Multiscale Analysis of Composite Stiffened Panel for Structural Health Monitoring*): se instrumentaron estructuras con el propósito de detectar daños, reducir el número de operaciones de mantenimiento e incrementar la seguridad en las aeronaves. Se implementaron diferentes métodos de SHM con sensores piezoeléctricos y de fibra óptica. Este proyecto concluyó en 2012.

- STRAINMON (*Strain Monitoring in Composite Stiffened Panels using Sensors*): la misión del proyecto (2012) era desarrollar y establecer una tecnología para monitorizar las deformaciones en paneles de material compuesto rigidizados, típicos del fuselaje de las aeronaves, mediante el empleo de redes de Bragg encoladas y/o embebidas y galgas extensométricas.

- MONICO (*Fiber Optic Based Intelligence Monitoring and Assessment System for Proactive Maintenance and Seismic Disaster Prevention in Reinforced Concrete Tunnels Lining*): este proyecto, terminado en 2013, proponía la aplicación de la tecnología de fibra óptica a estructuras civiles. En el mismo, se instalaron sensores de fibra óptica

en túneles de hormigón armado para la medida de deformaciones durante su vida, tanto ocasionadas por el funcionamiento normal del mismo como por eventos puntuales (p.e. sismos). Se empleó una fibra con redes de Bragg y una fibra distribuida de tipo Brillouin. De esta forma, fue posible evaluar las ventajas y desventajas de cada tipología.

La presente tesis doctoral se organiza en ocho capítulos que abarcan las principales líneas de desarrollo relativas a las redes de Bragg y la monitorización de la salud estructural.

En primer lugar se realiza una revisión bibliográfica sobre el estado del arte de la monitorización estructural (SHM), particularizada para los sensores de Bragg (**Capítulo 2**). Se estudian y analizan los fundamentos y avances realizados en medidas de deformación y temperatura, monitorización del curado y estimación de deformaciones residuales y los diversos métodos de integración de sensores de fibra óptica en estructuras de material compuesto, tanto encolados como embebidos.

En el **Capítulo 3** se realiza el estudio de la medida y compensación de temperatura mediante redes de Bragg. Para ello, se ha caracterizado la respuesta de las redes de Bragg ante diversos incrementos de temperatura, evaluando la lectura del sensor y comparándola con la de un termopar. Tras determinar el factor que relaciona el cambio de temperatura con el desplazamiento inducido de la longitud de onda de la red de Bragg, se evalúan diferentes métodos para realizar la compensación de temperatura. Los resultados obtenidos de estos análisis se aplican a ensayos de ciclado térmico.

La industrialización de las redes de Bragg pasa por el desarrollo de soluciones robustas que faciliten la instalación de la fibra y la protejan frente a sollicitaciones externas que puedan dañarlas. En el **Capítulo 4** se analizan tres metodologías de integración de fibra óptica en estructuras de material compuesto: los dos procedimientos tradicionales, esto es, encolado y embebido y una solución novedosa intermedia entre las dos anteriores, denominada fibra pseudo-encolada. Para la instalación de líneas de fibra óptica de gran longitud se propone una herramienta que simplifica el proceso, minimizando las probabilidades de rotura. Asimismo, se desarrollan diversos conectores de fibra óptica, tanto para salida de la fibra por el lateral como por la superficie.

El proceso de curado en estructuras de material compuesto origina estados de

deformación y tensión residual que pueden dificultar el posterior ensamblaje de las estructuras y disminuir sus propiedades mecánicas. Mediante la monitorización del proceso de curado es posible conocer el estado tensional resultante de la estructura fabricada, con el fin de evaluar su origen y contrarrestarlas. Entre las técnicas de SHM que permiten registrar las variables necesarias para la monitorización del curado se encuentran las redes de Bragg, las cuales presentan características que los hacen óptimos para esta aplicación. En el **Capítulo 5** se estudia la monitorización del curado de dos laminados de fibra de carbono y resina epoxy diferentes, que presentan distintas condiciones de curado.

En el **Capítulo 6** se demuestra la viabilidad del empleo de las redes de Bragg para monitorizar ensayos estructurales *full scale*. En estos ensayos se aplican las mejoras desarrolladas en los capítulos previos, relativas tanto al registro y compensación de temperatura como a las técnicas de integración de sensores de fibra óptica en estructuras de gran tamaño en un entorno industrial. Los ensayos monitorizados incluyen diversos campos de interés para la tecnología de las redes de Bragg: (i) ensayos de presurización de una cabina de aeronave de material compuesto a escala 1:1, (ii) ensayos de compresión de pilares de hormigón armado e (iii) integración de sensores en panel rigidizado de fibra de carbono y seguimiento de ensayos de tracción y flexión.

El **Capítulo 7** explora una nueva línea de desarrollo de los sensores de Bragg, consistente en su integración en estructuras metálicas. La fabricación de componentes metálicos a través de la tecnología de fabricación aditiva permite obtener estructuras de geometría compleja, las cuales no son viables mediante las técnicas convencionales. Fusionando la fabricación aditiva con la monitorización de la salud estructural, es posible crear geometrías metálicas complejas y sensorizadas. Dado que los sensores se pueden ubicar en las regiones de mayor sollicitación de la estructura, estas geometrías pueden ser optimizadas reduciendo su masa sin alterar sus prestaciones mecánicas y sin poner en riesgo su seguridad.

Finalmente, en el **Capítulo 8** se detallan los resultados y conclusiones extraídos de los capítulos anteriores, destacando los avances realizados en cada una de las líneas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Monitorización de la salud estructural

LA monitorización de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*, SHM) consiste en la implementación de estrategias para la identificación de daños en infraestructuras o componentes [FAR 2006]. Dentro de SHM se incluye un amplio conjunto de técnicas como el análisis modal, el análisis termo-elástico de tensiones (*Thermoelastic Stress Analysis*, TSA), las emisiones acústicas o el seguimiento de las deformaciones, entre otras. Estas técnicas se fundamentan en la observación de la estructura durante un determinado periodo de tiempo mediante sensores distribuidos en la misma. Estos sensores efectúan medidas periódicas de las que se extrae información acerca de la integridad del componente. La aplicación durante largos periodos de tiempo de las técnicas de SHM permite evaluar la viabilidad de una estructura para continuar en servicio, considerando la presencia de daños y su progresivo envejecimiento. Adicionalmente, bajo un evento extremo es posible realizar un análisis rápido y en tiempo real del estado de la pieza [WOR 2004].

Farrar y Worden, en [FAR 2013], definen el daño como los cambios experimentados por el material o las propiedades geométricas de un sistema, incluyendo variaciones en las condiciones de contorno y/o en la conectividad de mismo, que pueden afectar negativamente a su funcionamiento actual o futuro. La

condición de daño carece de sentido sin una comparación entre dos estados diferentes del sistema, una dañada y otra inicial o de referencia.

Todos los materiales presentan de forma inherente defectos o fallos, que bajo determinadas condiciones de carga pueden coalescer originando daños a nivel de componente. La aparición de un daño no implica necesariamente la pérdida total de funcionalidad del sistema, sino que este no operará de forma óptima. A medida que el daño se propaga, alcanzará un punto en el que la operación del sistema no es viable o aceptable. Este punto se denomina fallo del sistema [FAR 2006, FAR 2013].

Los procesos de SHM constan de cuatro etapas [FAR 2001]:

- Evaluación de la operación

En esta etapa se definen las variables a monitorizar y el procedimiento para realizar dicha monitorización. Durante la evaluación se adapta la identificación de daños a aquellas características que son únicas en el sistema en seguimiento.

- Adquisición de datos

La adquisición de datos incluye seleccionar el método de excitación, tipo, número y localización de sensores, tiempo de medida y el *hardware* necesario para la adquisición, almacenamiento y transmisión de los datos. Las técnicas de SHM se aplican sobre estructuras inteligentes o *Smart Structures*, definidas como aquellas que presentan una red de sensores distribuidos a lo largo de su extensión. Estos sensores permiten monitorizar su estado en tiempo real y garantizan su integridad con la mínima participación humana [ROA 2011].

Dentro de esta etapa se toman las acciones necesarias para poder discriminar en la lectura de los sensores el efecto producido por la aparición de un daño del efecto ocasionado por un cambio de las condiciones ambientales o de operación. Cuando las condiciones ambientales o de operación sean el objetivo de la monitorización, es necesario comparar la lectura con condiciones análogas a las analizadas.

- Selección de características y condensación de la información

Consiste en la identificación de datos característicos que permitan diferenciar entre una situación dañada y no dañada. Estos datos característicos dependen de cada aplicación de forma particular.

Puesto que los datos son extraídos de una estructura completa durante un amplio periodo de tiempo, se debe disponer de una técnica robusta para su reducción y condensación que permita retener únicamente aquella información que resulte de

interés para la característica analizada (en presencia de la variabilidad operacional y medioambiental).

- Desarrollo del modelo estadístico para la detección de eventos

Finalmente, el desarrollo de un modelo estadístico consiste en la implementación de algoritmos que a partir de los datos adquiridos, cuantifiquen el nivel de daño de la estructura. El análisis de la condición de daño se realiza a través de un proceso de cinco fases [RYT 1993]:

- Determinación de la presencia de daños.
- Localización del daño.
- Identificación del tipo de daño.
- Cuantificación del daño.
- Predicción de la vida futura de la estructura.

Se debe diferenciar entre monitorización de la salud estructural e inspección de una estructura mediante técnicas no destructivas [ROA 2011, GIU 2014].

La inspección mediante técnicas no destructivas (*Non Destructive Techniques*, NDT) consiste en el examen de un material para determinar su geometría, la presencia de daños o su composición, a través de una tecnología que no afectará a su funcionamiento futuro. Estas técnicas requieren de un alto grado de participación humana. La inspección se efectúa de forma localizada y requiere de acceso al área de interés en cada momento que se vaya a realizar la inspección.

En cambio, la monitorización de la salud estructural consiste en un proceso de adquisición y análisis de datos procedentes de sensores a bordo, para evaluar la integridad de una estructura de forma continuada en el tiempo. Se emplean los principios de las técnicas no destructivas junto con estructuras inteligentes para una valoración rápida, remota y en tiempo real del estado del componente. El objetivo es reducir costes y aumentar su vida útil minimizando la interacción humana.

Las actuales técnicas no destructivas no pueden ser empleadas para la monitorización continua de estructuras debido a sus limitaciones. En general, su aplicación requiere detener la operación de la estructura y desmontar algunos subcomponentes para una inspección completa. Tras esto, se deben situar los sensores para el escaneo de la pieza. Este proceso resulta complejo y costoso, tanto

en tiempo como económicamente. En las técnicas de SHM, los sensores se encuentran siempre integrados en el componente, incluso en regiones de difícil acceso, pudiendo efectuar medidas siempre que sea necesario. Así se dispone de un extenso histórico de datos, obtenidos en todas las ocasiones con los mismos sensores y en las mismas localizaciones.

Dentro de la monitorización de la salud estructural existe una amplia variedad de técnicas. Las investigaciones sobre las técnicas de SHM han experimentado un fuerte crecimiento recientemente, debido a su alto potencial en temas de seguridad y beneficios económicos. Estos beneficios afectan a numerosos campos de la industria, como el sector aeroespacial, obra civil e ingeniería mecánica en general. Muchas estructuras civiles y aeroespaciales continúan en servicio tras sobrepasar su vida útil de diseño [GIU 2014]. Además, se prevé que continúen aún en servicio durante un periodo extenso de tiempo. El incremento de edad de las infraestructuras aumenta los costes asociados a las operaciones de mantenimiento y reparación. Dichos costes pueden reducirse mediante la aplicación de las técnicas de SHM, reemplazando el esquema de mantenimiento basado en operaciones periódicas en el tiempo por operaciones en aquellos momentos en los que sean necesarias. Estas operaciones de mantenimiento se basan en el estado de las estructuras y permiten la extensión de su vida útil.

En la industria aeronáutica [IHN 2016], los costes derivados de las operaciones de mantenimiento de las aeronaves supone un porcentaje muy significativo de su presupuesto. Por ejemplo, el departamento de defensa de los Estados Unidos dedica el 14% de su presupuesto al mantenimiento de sus aeronaves. Además, estas operaciones conllevan largos periodos de inutilización de las aeronaves (a modo de ejemplo, un F-16 requiere 25 horas de mantenimiento por cada hora de vuelo). Los beneficios de la monitorización de estructuras aeronáuticas pueden clasificarse en corto y largo plazo [ROA 2011]:

- Corto plazo:
 - * Eliminación de los costes y daños potenciales asociados al montaje y desmontaje de estructuras.
 - * Reducción de las operaciones de mantenimientos y sus costes.
 - * Detección de eventos de impacto en el momento en el que se producen.

- * Reducción de los tiempos de inspección.
 - * Eliminación de los problemas de acceso.
 - * Detección temprana de defectos para garantizar la seguridad y minimizar los costes de reparación.
 - * Minimización de la intervención humana.
 - * Aumento de la vigilancia.
- Largo - medio plazo:
 - * Optimización de la eficiencia estructural.
 - * Nueva filosofía de diseño con criterios menos conservativos.
 - * Reducción de peso.
 - * Sustitución del mantenimiento basado en la condición por el mantenimiento basado en el estado en tiempo real.

No obstante, los beneficios económicos y relativos a la seguridad sólo serán apreciables si el sistema proporciona la alerta con suficiente tiempo para tomar las medidas correctivas antes de que el daño o la degradación se encuentren en un nivel crítico [FAR 2013].

En una encuesta realizada por la FAA (*Federal Aviation Administration*) a aerolíneas, operadores de aeronaves, fabricantes, asociaciones reguladoras e instituciones de mantenimiento de aeronaves se demostró el interés de estos organismos en el desarrollo de las técnicas de SHM [ROA 2011]. Además, se identificaron cuáles son los principales defectos que desean detectar (Figura 3) así como las áreas de aplicación de estas técnicas (Figura 4).

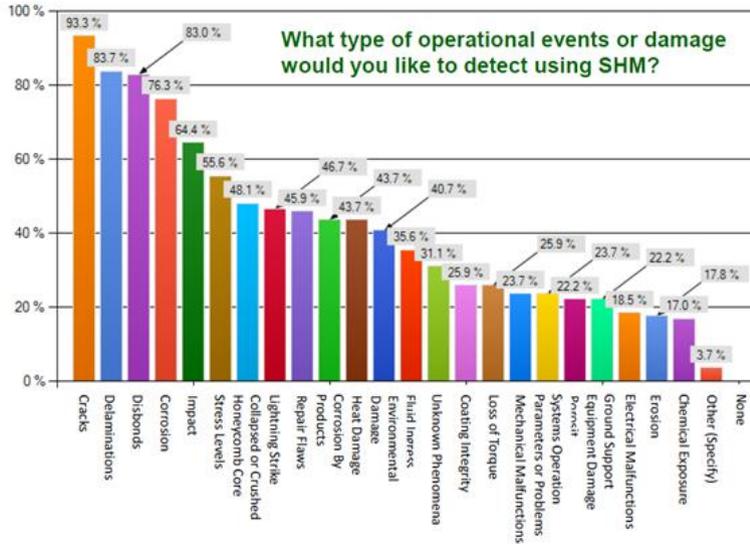


Figura 3. Defectos y daños a detectar mediante SHM [ROA 2011].

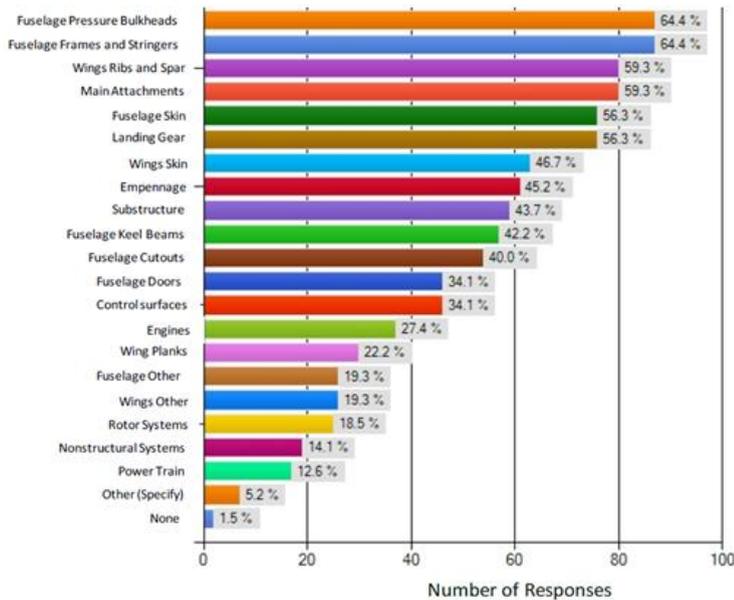


Figura 4. Áreas de interés para la aplicación de SHM [ROA 2011].

Según la tipología de sensores empleados, la monitorización estructural puede realizarse de forma pasiva o activa [GIU 2014]. Las técnicas de SHM pasivas miden los valores de parámetros operacionales, a partir de los cuales se infiere el estado de la estructura. Por ejemplo, en el caso de una aeronave es posible medir la velocidad del aire, turbulencias, niveles de vibración, aceleraciones, etc., e introducir estos valores en algoritmos que determinen el estado de la estructura y proporcionen una estimación de su vida restante. Sin embargo, estas técnicas no examinan directamente el componente para evaluar si se ha producido un daño o no. Los procedimientos de SHM activos consisten en medir valores directamente de la estructura para evaluar la presencia y extensión de daños.

La variedad de sensores disponibles y por tanto, de técnicas de SHM es muy extensa, destacando acelerómetros, galgas extensométricas, sensores de fibra óptica, sensores piezoeléctricos, etc. De forma general, estas tecnologías se encuentran en un TRL 5, aunque algunas de ellas han alcanzado el TRL 7, con prototipos de sistemas diseñados para su uso en aeronaves.

2.2. Sensores de Bragg

2.2.1. Fibra óptica y tipos de sensores

En 1.969 la primera fibra óptica fue fabricada en cooperación por *Nippon Sheet Glass Co.* y *Nippon Electric Co.* para aplicaciones de telecomunicaciones, con pérdidas de 100 dB/km a causa de las impurezas del cristal [KRE 2007]. La primera fibra con pérdidas por debajo de los 20 dB/km fue desarrollada por la compañía *Corning Glass Works* en 1.970 [WER 2013]. Las fibras ópticas son elementos fabricados en material dieléctrico y empleados para guiar o propagar ondas (también conocidos como guías de onda) [IHN 2016]. Se componen de un núcleo de vidrio con pequeñas cantidades de dopantes (óxido de silicio y germanio), de entre 10 y 100 μm de diámetro (en el caso de fibra monomodo o multimodo, respectivamente) y con un alto índice de refracción. Alrededor del núcleo se encuentra la corteza, compuesta de un material similar pero con un índice de refracción ligeramente inferior, para satisfacer la ley de Snell y limitar la propagación de la luz únicamente al núcleo. Su diámetro es de unos 125 μm . La última capa consiste en un recubrimiento exterior que aporta resistencia mecánica y protege a la fibra de la

humedad. Este recubrimiento puede ser plástico (acrilato, poliimida u ORMOCER) o metálico (cobre u oro), según del material en el que se vaya a integrar la fibra y su temperatura de uso. El diámetro total de la fibra asciende hasta los 250 μm [TOR 2009]. Un esquema se presenta en la Figura 5.

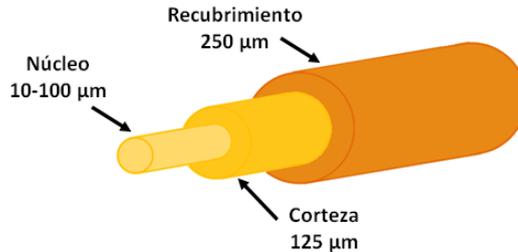


Figura 5. Esquema de la estructura de la fibra óptica.

La tecnología de sensores de fibra óptica apareció en 1.980, gracias a los avances en miniaturización de sensores y actuadores [RIC 2012]. Existen numerosos tipos de sensores de fibra óptica, los cuales pueden clasificarse atendiendo a diferentes tipologías [VAL 2011, TOR 2009]: según la naturaleza del transductor (extrínsecos e intrínsecos), según el parámetro a medir (moduladores de intensidad, sensores interferométricos o espectrométricos) o según la distribución espacial de la medida. Esta última es la forma más habitual de clasificarlos, organizándose en:

Puntual: La medida se efectúa en un único punto de la fibra. En general, el sensor se sitúa en un extremo de la fibra. El ejemplo más importante de esta tipología son los interferómetros de Fabry-Perot [BLA 2011, LEV 2008, YE 2014].

Integrado: La medida es el resultado de la integración de todas las variaciones producidas en un determinado tramo de la fibra óptica. Los sensores de corriente por efecto Faraday son un ejemplo de esto.

Cuasi-distribuido: Se trata de sensores puntuales multiplexados en una misma fibra óptica. El sistema tiene la capacidad de medir diferentes valores de la variable en puntos discretos a lo largo de la fibra. Dentro de esta sección destacan las redes de Bragg.

Distribuido: Es posible cuantificar la variable a medir a lo largo de toda la fibra óptica. Se denomina resolución espacial a la mínima distancia con la que se pueden diferenciar dos eventos. A través de un OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometry*) se obtiene una lectura continua de la medida en función de la posición del sensor.

Sus principales ventajas son que con un solo cable de fibra óptica se pueden medir en múltiples puntos, además de necesitar únicamente una fuente de luz y un sistema de procesado. Sin embargo, su precisión y sensibilidad son menores que la de los localizados. Los sensores más ampliamente utilizados, dentro de esta categoría [GUE 2013] son los que funcionan por *scattering* de Raman, Rayleigh o Brillouin (Figura 6).

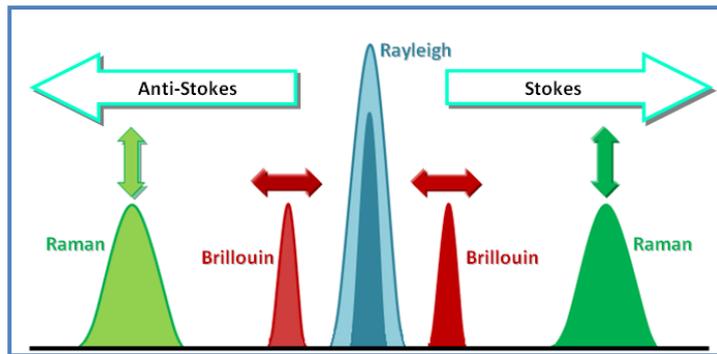


Figura 6. Esquema de las longitudes de onda características para la fibra distribuida.

2.2.2. Redes de Bragg

Una red o sensor de Bragg (FBG: *Fiber Bragg Grating Sensor*) es un pequeño segmento de fibra óptica en cuyo núcleo se ha introducido una serie de franjas (red de Bragg) que provocan que el índice de refracción del núcleo no sea constante, sino que cambie de forma periódica en la dirección longitudinal. Este cambio periódico causa la reflexión de una determinada longitud de onda de la luz que se propaga en su interior, mientras que el resto del espectro óptico se transmite a través de la fibra sin apenas pérdidas [RIC 2012, BLA 2011]. Un esquema del sensor de Bragg y de su funcionamiento se muestra en la Figura 7.

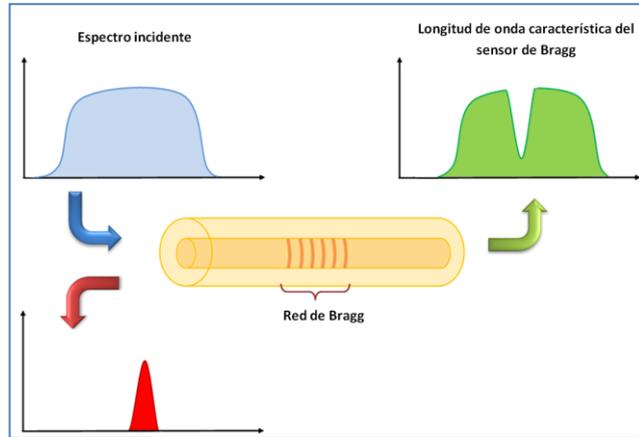


Figura 7. Esquema de funcionamiento de la red de Bragg.

Esta longitud de onda característica se denomina longitud de onda de Bragg y viene determinada por la expresión [BAR 2008, SIN 2005, MEG 2007]:

$$\lambda_B = 2n_0\Lambda \quad (2.1)$$

Donde

λ_B : Longitud de onda característica del sensor de Bragg [nm].

n_0 : Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica.

Λ : Distancia existente entre las franjas que forman la red de Bragg o pitch [μm]. Este parámetro se encuentra comprendido en el rango $0,5 \leq \Lambda \leq 100 \mu\text{m}$.

El nombre de los sensores procede de la ley de Bragg. Sir William Lawrence Bragg, nacido en 1.890, fue un físico británico que en 1.912 descubrió la ley de difracción de los rayos X, la cual es conocida como ley de Bragg. Por este motivo ganó el premio Nobel de Física en 1.915 [WER 2013].

Posteriormente, en 1.978 Ken O. Hill descubrió el efecto de la foto-sensibilidad en fibras dopadas con Germanio. La exposición de estas fibras a la luz ultravioleta induce un cambio permanente en el índice de refracción. Esto fue empleado para grabar en la fibra una red de Bragg, de forma que refleje una determinada longitud de onda. La primera red de Bragg comercial fue fabricada por 3M y Photonetics en 1.995 [KRE 2007]. Desde el año 2.000, existen más de 20 compañías que ofrecen este tipo de sensores.

La red de Bragg está formada por varios miles de franjas. Cada franja individual refleja una pequeña porción de la longitud de onda que llega. El factor de reflexión por franja está en el rango de 0,001% hasta 0,1%, dependiendo de la energía empleada para el marcado de la fibra y del porcentaje de Germanio presente en el dopado del núcleo [KRE 2007]. La irradiación ultravioleta ocasiona un incremento del índice de refracción en la región de la fibra afectada por dicha irradiación. El cambio producido a lo largo del sensor de Bragg se representa en la Figura 8 (para los parámetros más frecuentes). El índice de refracción efectivo es la media del valor de la región irradiada [WER 2013].

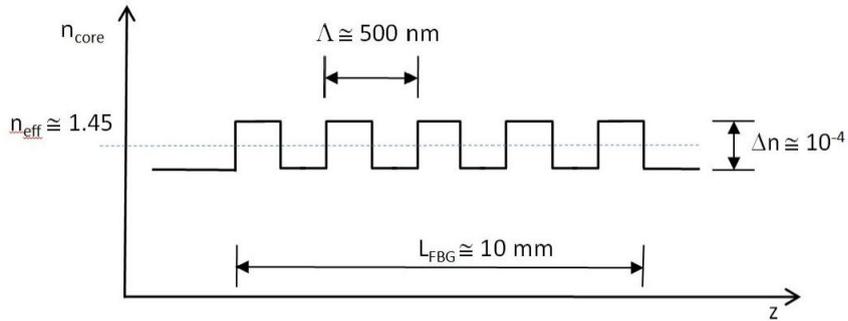


Figura 8. Variación del índice de refracción en el núcleo de la fibra óptica [WER 2013].

2.2.2.1. Fundamentos de medida

La longitud de onda característica de la red de Bragg se ve alterada tanto por cargas térmicas como mecánicas, puesto que los dos parámetros presentes en la ecuación (2. 1) son sensible a ambas sollicitaciones. La sensibilidad del sensor frente a la temperatura y deformación se obtiene efectuando las derivadas parciales correspondientes [WER 2013, BAR 2008]:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\Delta\lambda_B}{\partial\varepsilon}\varepsilon + \frac{\partial\Delta\lambda_B}{\partial T}\Delta T \quad (2.2)$$

Donde sustituyendo (2. 1) se tiene:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\left(\frac{\partial n_0}{\partial\varepsilon}\Lambda + n_0 \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} \right) \varepsilon + \left(\frac{\partial n_0}{\partial T}\Lambda + n_0 \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \right] \quad (2.3)$$

Volviendo a introducir dos veces la ecuación (2. 1) en la expresión (2. 3) se llega a la siguiente ecuación:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial\varepsilon} \right) \Delta\varepsilon + \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2. 4)$$

En dicha expresión se identifican dos sumandos, correspondientes con los efectos de deformación mecánica y cambio de temperatura. Analizando cada uno de los términos para un caso de carga uniaxial según la dirección de la fibra, es posible obtener una ecuación más simplificada.

Dentro del primer sumando, el primer término representa la deformación debida a la extensión de la fibra. Asumiendo que la fibra tiene una longitud L_f , con un sensor FBG inscrito en ella, al aplicar una tensión a la fibra de ΔL , esta experimentará una deformación $\varepsilon = \Delta L_f / L_f$. Asimismo, si el sensor presenta una longitud L_{FBG} , se encontrará sometido a una deformación $\varepsilon_{FBG} = \Delta L_{FBG} / L_{FBG}$. Puesto que el sensor está en la fibra $\varepsilon = \varepsilon_{FBG}$, de forma que el primer término es la unidad.

El segundo término de este sumando es el coeficiente foto-elástico (p), que representa la variación del índice de refracción con la deformación. Se obtiene a partir del tensor de deformación-óptico, asumiendo que la fibra es ópticamente isótropa [FER 2005, RIC 2012].

$$p = \left(\frac{n_0^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2. 5)$$

Con n_0 el índice de refracción de la fibra, p_{11} y p_{12} los coeficientes termo-ópticos y ν el coeficiente de Poisson.

En algunos sólidos, dependiendo del coeficiente de Poisson del material, este efecto es negativo. Esto quiere decir que cuando un medio transparente se expande (como la fibra óptica), el índice de refracción disminuye debido a la reducción de la densidad del material.

Al aplicar una extensión en la fibra, aparecen dos efectos opuestos, por un lado se aumenta la distancia entre las franjas del sensor, lo cual aumenta la longitud de onda reflejada, y por otro, se disminuye el índice de refracción, reduciendo dicha longitud de onda.

Los términos que componen el segundo sumando representan la expansión

térmica o coeficiente de dilatación de la fibra óptica (α_{glass}) y la dependencia con la temperatura del índice de refracción (α_{δ}), respectivamente.

Sustituyendo todo en (2. 4) se obtiene la ecuación:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p)\Delta\varepsilon + (\alpha_{\text{glass}} + \alpha_{\delta})\Delta T \quad (2. 6)$$

Esta ecuación puede expresarse mediante el empleo de factores de sensibilidad, uno para la deformación mecánica y otro para la debida al cambio de temperatura:

$$\Delta\lambda_B = K_{\varepsilon}\Delta\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2. 7)$$

En situaciones en las que la red de Bragg se encuentre sometida a cargas tridimensionales con presencia de esfuerzos laterales, aparece el fenómeno de la birrefringencia en el núcleo de la fibra [VAL 2011]. Este fenómeno consiste en una doble refracción, un desdoblamiento del rayo de luz en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí. Esto está ocasionado por la diferencia en los índices de refracción entre los ejes correspondientes a la dirección de aplicación del esfuerzo y la dirección perpendicular. Al aplicar la carga lateral, la sección circular de la fibra adquiere una forma elíptica. El eje sobre el que se aplica la presión se comprime, expandiéndose la dirección ortogonal. En la dirección comprimida aumenta el índice de refracción, mientras que en la dirección de expansión disminuye (Figura 9).

Esto origina un desplazamiento de la longitud de onda reflejada diferente para cada dirección, produciendo la división de dicho pico, como se aprecia en la Figura 10. La separación (en longitud de onda) de ambas reflexiones es proporcional al esfuerzo aplicado.

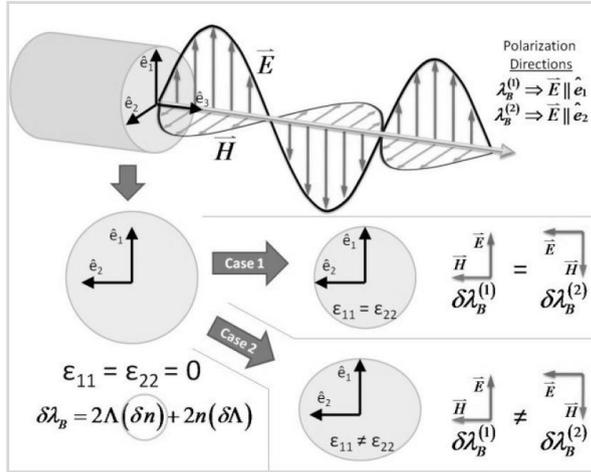


Figura 9. Relación entre la dirección de polarización y la longitud de onda reflejada [EMM 2009].

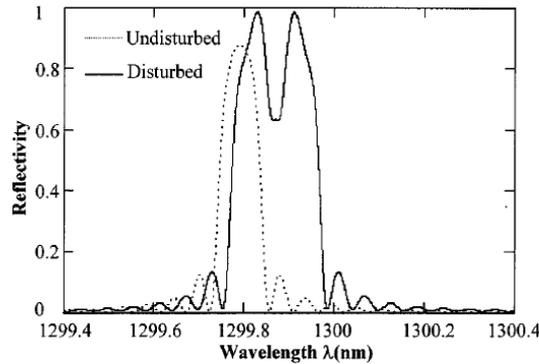


Figura 10. Espectro reflejado por un sensor de Bragg previamente (línea de puntos) y tras (línea continua) aplicar carga lateral [GAF 2000].

Considerando un sistema de ejes como el mostrado en la Figura 9, la expresión que relaciona la deformación del material con el índice de refracción es [EMM 2009]:

$$\delta \left\{ \frac{1}{n_i^2} \right\} = \left\{ -2 \left(\frac{\delta n}{n^3} \right) \right\} = [p_{ij}] \{ \epsilon_j \} \quad i, j = 1, 2, \dots 6 \quad (2.8)$$

Siendo los términos p_{ij} los coeficientes termo-ópticos. El tensor de deformación-óptico es un tensor de cuarto orden, reducido a una matriz 6x6 (2. 9) para un material ópticamente anisótropo tras aplicar simetrías. Debido a la estructura amorfa de la sílice fundida, la fibra óptica es ópticamente isótropa y sólo dos términos son requeridos p_{11} y p_{12} .

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix} \quad (2. 9)$$

Con $p_{44} = (p_{11} - p_{12})/2$.

Las componentes nulas de la matriz anterior junto con la ausencia de deformaciones tangenciales en la fibra permiten ignorar las componentes 4, 5 y 6 de la ecuación (2. 8). Además, la onda electromagnética propagada en la dirección 3 tiene campos eléctricos y magnéticos despreciables en la dirección de propagación, pudiéndose ignorar la tercera fila de la matriz. La simplificación final se deriva de la suposición de $n_1, n_2 \gg \delta n_1, \delta n_2$, por tanto, asumir que $n_1 = n_2 = n$ no representa un error significativo. Aplicando las ecuaciones constitutivas para un sólido lineal e isótropo, se obtienen las ecuaciones (2. 10) y (2. 11) que determinan el cambio de longitud de onda de cada uno de los picos reflejados por el sensor [VOE 2010, LUY 2010].

$$\frac{\Delta\lambda_{B,1}}{\lambda_{B,1}} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n_0^2 [p_{11} \varepsilon_1 + p_{12} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)] + (\alpha_{glass} + \alpha_\delta) \Delta T \quad (2. 10)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B,2}}{\lambda_{B,2}} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n_0^2 [p_{11} \varepsilon_2 + p_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)] + (\alpha_{glass} + \alpha_\delta) \Delta T \quad (2. 11)$$

Siendo $\varepsilon_3 > 0$ y $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu \varepsilon_3$ y ν el coeficiente de Poisson.

2.2.2.2. Características de las redes de Bragg: ventajas e inconvenientes

El desarrollo de las redes de Bragg ha experimentado un importante crecimiento en la última década [LEV 2008, PER 2013], gracias a las características que presentan que favorecen su empleo frente a los dispositivos tradicionales de medida de

deformación o temperatura [TOR 2009, UDD 1995]:

- Componente pasivo, con una vida útil superior a 20 años, estable con el tiempo y que no requiere calibración. Todo esto repercute en una mayor fiabilidad.
- Capacidad para medir distintos parámetros. Los FBGs son sensores de deformación y temperatura, pero diseñando de forma correcta la interfase, pueden emplearse como transductores de muchas otras variables, como tensión, presión, vibración, desplazamiento, etc. [WER 2013]. Únicamente es necesario producir una perturbación en la red de Bragg que resulte en un cambio de su longitud de onda característica.
- Reducido peso y dimensiones (diámetro inferior a 250 μm), siendo el cable de fibra óptica el sensor. Esto es especialmente importante en la industria aeroespacial, donde el peso es un aspecto crucial [RIC 2012]. Asimismo, la flexibilidad de la fibra óptica permite su instalación en superficies complejas.
- Posibilidad de multiplexación: se pueden situar varios sensores en una misma línea de fibra óptica, empleando un único equipo interrogador.
- Sensores auto-calibrados, puesto que las mediciones se codifican en cambios de longitud de onda, el cual es un parámetro absoluto. Al no derivarse la lectura del sensor de la intensidad, estos sensores se ven poco afectados por las pérdidas de acoplamiento de la fibra.
- Excelente sensibilidad.
- Alta resistencia a la fatiga y a la corrosión.
- Medidas en grandes distancias (>20 Km) sin apenas sufrir pérdidas (inferiores a los 0,2 dB/km). Sólo se aprecian pérdidas importantes cuando la fibra está flexionada con radios pequeños (menores a 17 mm) o cuando se somete a fuerzas transversales significativas [FRO 2006].
- Al tratarse de medidas basadas en luz, son inmunes a los campos electromagnéticos y a descargas eléctricas. Además, no se ven afectados por el calentamiento debido al efecto Joule.
- Inertes químicamente, pudiendo emplearse en ambientes hostiles, atmósferas corrosivas o ricas en hidrógeno, como en gaseoductos y oleoductos [VAL 2011].
- Seguridad intrínseca al no haber señales eléctricas. Permite su empleo en ambientes peligrosos donde el uso de sensores eléctricos no es seguro [LEV 2008].

- Bajo consumo.
- Fácil integración y alta capacidad para ser embebidos: las reducidas dimensiones de la fibra óptica favorecen la posibilidad de situar los sensores entre capas consecutivas del laminado de material compuesto. De esta forma, se permite monitorizar tanto las deformaciones durante la vida útil de la estructura como durante su proceso de fabricación y curado. No obstante, el proceso de embeber sensores en estructuras de material compuesto resulta complejo, debido a los puntos de acceso y salida de la fibra óptica del material.
- Posibilidad de monitorizar en tiempo real.
- Capacidad de utilización en aplicaciones criogénicas [KRE 2007].
- Comportamiento lineal y sin histéresis con la deformación mecánica y la temperatura [KIN 2014].

No obstante, también presentan una serie de inconvenientes:

- Necesidad de un sistema optoelectrónico para la medida y el análisis.
- Fragilidad de la fibra óptica: la fibra muestra gran resistencia ante cargas aplicadas en dirección longitudinal, pero se rompe con facilidad ante esfuerzos cortantes. Es muy importante extremar las precauciones durante la instalación para evitar roturas.
- Elevado coste económico comparado con los sistemas tradicionales de medida de deformaciones, como bandas extensométricas. El coste por sensor es del orden de 100 dólares, aunque el coste por canal es competitivo [IHN 2016].
- En fibra óptica embebida, las propiedades mecánicas del material huésped pueden verse afectadas, a consecuencia de la perturbación producida por la misma (diámetro de la fibra óptica 10 veces superior al de las fibras de refuerzo) o producir un concentrador de tensiones [EAT 1992].
- En caso de roturas en sensores embebidos, es imposible su reparación, quedando inutilizados todos los sensores multiplexados en la misma fibra [TOR 2009].
- Se deben evitar flexiones muy pronunciadas de la fibra óptica, que impiden la transferencia de la luz y evita la detección del sensor [GER 2005].

2.2.2.3. Fabricación de redes de Bragg

Actualmente, la técnica más usada consiste en el empleo de máscaras para el marcado, el cual es un elemento óptico de difracción que modula espacialmente el haz ultravioleta con un periodo Λ_{pm} [WER 2013]. Las máscaras de fase se fabrican en un sustrato de sílice mediante técnicas holográficas.

Cuando un haz láser incide sobre la máscara de fase, se produce una difracción y el haz se divide en varios órdenes de difracción. El orden cero es suprimido pero los órdenes +1 y -1 prevalecen con la mayor parte de la energía. Estos dos órdenes parten del mismo punto en la entrada de la máscara, pero salen de forma divergente.

Si la fibra óptica se sitúa en contacto con la máscara (o muy cerca de esta), se marca con el patrón de interferencia (Figura 11). Para incrementar la densidad de potencia, pueden emplearse lentes cilíndricas antes de la máscara.

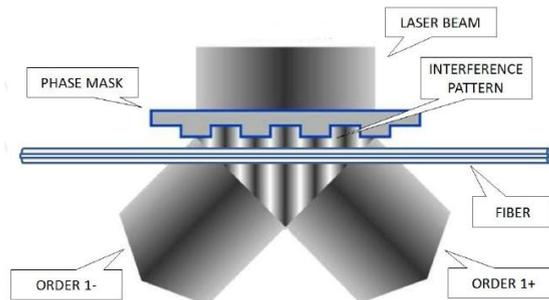


Figura 11. Marcado de la fibra empleando una máscaras de fase [WER 2013].

Se trata de un procedimiento sencillo, aunque la máscara de fase es un elemento óptico muy frágil, donde la proximidad de la fibra puede arañar su superficie. Además, el periodo del sensor de Bragg queda fijado por el de la máscara, no pudiendo modificarse y cualquier defecto presente en la misma queda reproducido en la red.

Para efectuar el marcado de la fibra es necesario retirar el recubrimiento protector, el cual se vuelve a situar tras inscribir la red de Bragg. El proceso de retirar el recubrimiento puede realizarse de forma mecánica (caso del recubrimiento de acrilato) o químicamente (caso de poliimida, con ácido sulfúrico caliente). Aquellas fibras en las que el recubrimiento fue retirado por medios mecánicos presentan una resistencia muy baja [LEV 2008].

El haz ultravioleta puede ser diseñado a medida para proporcionar una variación específica en el índice de refracción. De esta forma, es posible fabricar una gran cantidad de redes con distintas características, algunas de las cuales se muestran en la Figura 12.

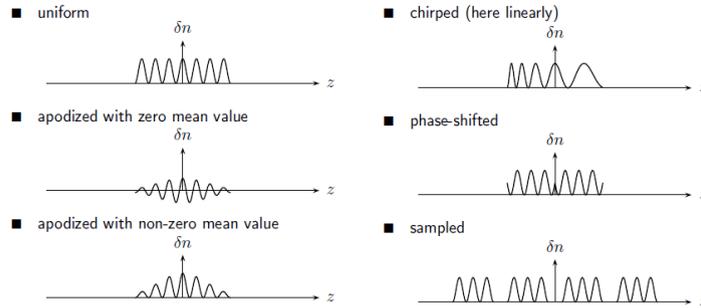


Figura 12. Ejemplos de distintos tipos de redes de Bragg [MEG 2007].

2.2.2.4. Sistemas de monitorización óptica

Un sistema de monitorización óptica está constituido por los siguientes elementos fundamentales [TOR 2009]:

- Sensor de Bragg o conjunto de redes encargados de medir los parámetros relevantes.
- Sistema de procesamiento de datos, que suele ser un ordenador.
- Fuente óptica, encargada de transmitir las ondas de luz. Según el sistema sensitivo, como fuente óptica se empleará un láser (ondas de banda estrecha para fibras que sólo propagan un modo de onda, fibras monomodo) o LED (*Light Emitting Diode*, banda ancha para fibras multimodo que propagan varios modos de onda).
- Circulador, permite el paso de luz en un sentido, desde la fuente óptica hacia las estrellas pasivas. Impide que el espectro reflejado vuelva a la fuente óptica y se dirige hacia el analizador de espectros ópticos (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*).
- Analizador de espectros ópticos, encargado de la obtención del espectro de luz y sus variaciones en el tiempo.

Actualmente, la fuente óptica, el circulador y el analizador de espectros se engloban en un mismo elemento denominado interrogador (Figura 13).

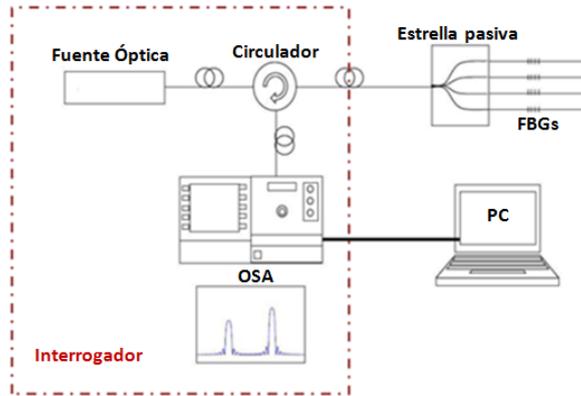


Figura 13. Elementos que constituyen un sistema de monitorización óptica basado en FBGs [BAR 2007].

2.2.3. Aplicaciones de las redes de Bragg

Aunque la introducción de redes de Bragg no se haya incorporado a la producción en serie ni la tecnología se encuentre certificada, existe un gran número de ejemplos y demostradores en la bibliografía que comprenden múltiples campos. A continuación se muestran algunos ejemplos representativos:

Transporte

- Sistema de monitorización con fibra óptica para el sector marino: dentro del proyecto europeo "MOSES", un sistema de monitorización formado por más de 100 sensores fue distribuido entre los tanques de lastre, la cubierta y las bodegas de carga de un barco, para medir las tensiones sufridas por la estructura durante las operaciones de carga y descarga, la navegación en condiciones de mal tiempo y los ciclos de fatiga [FBG 2015].
- Desarrollo de almohadillas para vías de ferrocarriles: La Universidad de Graz ha desarrollado unas nuevas almohadillas para vías de ferrocarril en regiones alpinas, con un mejor comportamiento ante las cargas aplicadas [WOS 2011]. En estos elementos se han incorporado sensores FBG, debidos a sus reducidas dimensiones y la capacidad para medir grandes deformaciones ($>6.000 \mu\epsilon$).
- Medida de deformaciones en alas de aeronaves: Dentro de la industria

aeroespacial, los sensores de Bragg han sido ampliamente usados por sus altas prestaciones térmicas y mecánicas. Un ejemplo de aplicación es su empleo en un ala adaptativa [BET 2000]. El objetivo del desarrollo de esta ala es encontrar una solución dinámica-estructural que mejore sus características aerodinámicas, aumentando la sustentación y reduciendo la resistencia. Esto implicaría un mejor rendimiento, ahorro de combustible, aumento de la carga útil y costes de operación más bajos. Dos aspectos analizados en los estudios con FBGs han sido la fiabilidad a largo plazo de estos sensores y el impacto sobre la medida de los distintos tipos de recubrimiento.

El primer caso detectado de aplicación de FBGs para la monitorización de vehículos aeronáuticos es la aeronave Airbus A340-600 [MAR 2011]. Esta dispone de varios FBGs para medir deformación y temperatura, en una estructura de material compuesto del fuselaje posterior, aunque su aplicabilidad es solo a nivel de ensayos en vuelo. Los resultados extraídos fueron comparados con galgas extensométricas, mostrando una excelente consistencia.

- Monitorización de ensayo mecánico en estructura aeroespacial: Entre 2.009-2.010, en el NASA *Engineering Safety Center* se efectuó el ensayo a escala real de un *Composite Crew Module* (CCM). La deformación del componente durante los ensayos se registró mediante sensores de fibra óptica distribuidos por toda la estructura. Cada fibra óptica contenía cientos de sensores de deformación, con una resolución espacial de 0,5 pulgadas y una frecuencia de adquisición de 20 Hz [RIC 2012].
- Aplicación en UAV: Aproximadamente 3.000 redes de Bragg se instalaron en las alas del UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) Predator-B de la NASA. Estos sensores fueron empleados para monitorizar la forma y el nivel de tensión de las alas en tiempo real durante la misión.

Energía

- Monitorización de cargas sobre álabes de aerogeneradores: El centro de investigación y desarrollo ECN ha desarrollado un sistema denominado FOBM (*Fiber Optic Blade Load Monitoring*) para el mantenimiento de aerogeneradores. Dado que la mayoría de las cargas se introducen a través de las palas del rotor, este desarrollo se ha centrado en un método basado en los momentos de flexión en la raíz de la pala. Los datos obtenidos son empleados por los operadores de las

turbinas para decidir cuando es necesario realizar una acción de mantenimiento. Un esquema del sistema se muestra en la Figura 14 a [RAD 2012].

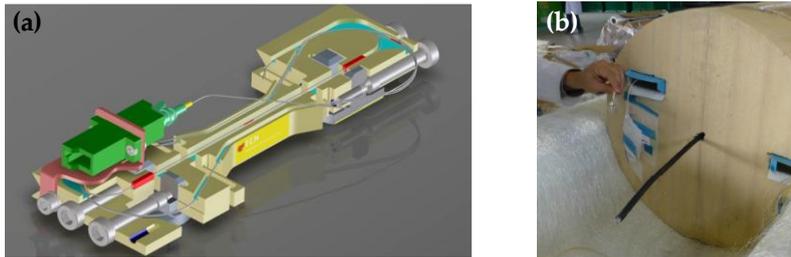


Figura 14. (a) Esquema del sistema desarrollado por ECN para monitorización de aerogeneradores [RAD 2012] y (b) fibra óptica en el interior de pala de aerogenerador [IND 2013].

Otra aplicación en el campo de los aerogeneradores ha sido realizada por Indra [IND 2013]. Esta compañía ha desarrollado un sistema para monitorizar las palas basado en FBGs. Este consiste en un módulo de adquisición, un módulo de análisis y otro de presentación de los resultados. El módulo de adquisición monitoriza la lectura de dos FBGs situados a lo largo de las palas. Las fibras pueden ser embebidas o pegadas directamente en la superficie, ubicadas en las regiones sometidas a mayores cargas de fatiga. En la Figura 14 b se muestran las fibras salientes del interior de una pala.

Estructuras de material compuesto

- Monitorización de recipientes presurizados: Com&Sens (Composites & Sensing) es una Spin off de la Universidad de Ghent especializada en monitorizar estructuras de material compuesto con sensores de fibra óptica. Una de las aplicaciones realizadas por esta empresa ha sido la monitorización de recipientes presurizados [FBG 2015 (2)], permitiendo conocer completamente el comportamiento de estos depósitos durante toda su vida y mejorar sus prestaciones. Otros ejemplos de aplicación a depósitos presurizados se observan en [BLA 2010, DEG 2001, FOE 1999, FRI 2010, GLI 2004, HER 2009, KAN 2006, SUL 2010].
- Sensores de fibra óptica para monitorizar deformaciones de estructuras de material compuesto: Los socios del proyecto Eureka 1841 Eurobiege emplean sensores FBG para monitorizar el estado de deformación de este tipo de componentes. Las piezas fabricadas en el proyecto fueron vigas (Figura 15), que se

sometieron a cargas de flexión en tres puntos hasta alcanzar los 160 kN y un 1,5% de deformación. A través de los resultados obtenidos se comprobó que las distintas etapas del proceso de fabricación (moldeo, curado o post-curado) no afectaban a las propiedades de la fibra óptica, ni tampoco se veían alteradas las propiedades mecánicas de las vigas. Adicionalmente, se observó una buena correlación entre las medidas proporcionadas por los sistemas tradicionales de medida y por los sensores de fibra óptica [CER 2012].



Figura 15. Probetas durante el ensayo [CER 2012].

La detección de daños y delaminaciones es otra importante vía de desarrollo de los sensores FBG [SOR 2006, PAL 2008].

Ingeniería civil

- Monitorización de puentes: Los sensores de Bragg se han integrado en estructuras de hormigón y de acero, destacando el caso de puentes. Existen numerosos casos de aplicación de sistemas ópticos para monitorización en puentes [GLI 2007, GRO 2000, SMA 2015]. Un ejemplo es el puente de Waterbury en Vermont, Estados Unidos [FUH 1998]. En este se situaron 16 sensores FBG en las barras de refuerzo, con objeto de registrar y supervisar las variaciones de deformación experimentadas. En Hong Kong, en el puente en suspensión Tsing Ma, 40 FBGs fueron instalados para evaluar su salud estructural [GRA 2010].
- Monitorización de la corrosión de armaduras mediante sensores ópticos: Se ha investigado el desarrollo de un sensor FBG que sea capaz de medir este efecto, basado en detectar el aumento de diámetro que sufren las barras de acero cuando se ven afectadas por la corrosión. La fibra óptica se coloca de modo perimetral a la armadura y perpendicular al eje principal de la barra [PER 2001].
- Monitorización de edificios: En diciembre de 2.001, 30 sensores FBG se multiplexaron en 6 fibras ópticas para monitorizar pilares marinos de material

compuesto. De estos, se emplearon 24 sensores para el registro de deformaciones y 6 para la medida de temperatura. Los pilares ensayados tenían una longitud de 18,3 m y un ancho de 0,61 m. Estos se sometieron a flexión en tres puntos, comprobándose la supervivencia de todos los sensores y el correcto aislamiento de los de temperatura ante sollicitaciones mecánicas.

Otro ejemplo es el caso de un edificio en Japón, en el cual 64 FBGs se embebieron en el marco de acero de un edificio de 12 plantas, que fue construido con una nueva técnica de tolerancia al daño [ANN 2008].

- Control de la circulación del tráfico mediante sensores ópticos: Consiste en embeber sensores bajo la capa de rodadura de la carretera. El paso de vehículos produce fluctuaciones que se registran por los equipos de medida [SCH 2002]. Este procedimiento no induce ningún tipo de interacción con la circulación, puesto que se encuentran enterrados, siendo posible detectar la velocidad de circulación de los vehículos.

2.3. Medida de deformación

Aunque las redes de Bragg permiten monitorizar una amplia variedad de magnitudes físicas, su empleo para la medida de deformaciones es la aplicación más extendida. No obstante, los sistemas estándar para la determinación del estado de tensión de una estructura, calcular si dicha estructura ha excedido los límites de carga o evaluar su vida restante a fatiga son las bandas extensométricas.

Las bandas extensométricas se fundamentan en la medida del cambio de resistencia eléctrica y longitud de un hilo conductor adherido al componente a estudio, al ser sometido a una tensión o deformación [NI 2011]. Al igual que los sensores de Bragg, la medida se realiza de forma puntual, en aquellas ubicaciones donde se sitúe el sensor, determinándose las variaciones de deformación desde el instante en el que se inicie la medida.

Los sistemas basados en bandas extensométricas son exactos, fiables, económicos, fáciles de usar, lineales y con alta repetibilidad. Sin embargo, realizando un análisis comparativo con las redes de Bragg se identifican una serie de desventajas, destacando:

- Peso

Una de las principales ventajas de los FBGs son su reducido peso y dimensiones. En la Figura 16 se muestra una comparativa entre dos galgas y un sensor de fibra óptica. Adicionalmente, las galgas requieren de dos o tres cables de cobre para su alimentación y conexión con el equipo de adquisición.



Figura 16. Comparativa dimensional entre galgas extensométricas y sensor FBG (ubicado entre las galgas).

A este respecto, los beneficios aportados por la fibra óptica son más evidentes al comparar con bandas extensométricas para alta temperatura, como se aprecia en la Figura 17 [RIC 2012].

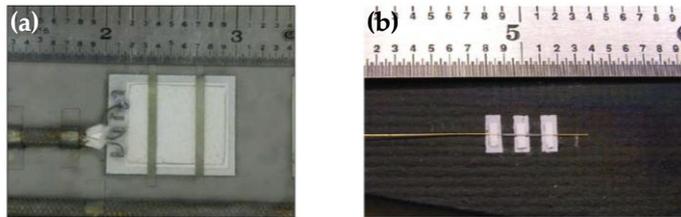


Figura 17. Comparación entre (a) galga extensométrica y (b) sensor de fibra óptica para medidas a alta temperatura [RIC 2012].

- Multiplexación

Otra de las ventajas de las redes de Bragg es la posibilidad de multiplexación, pudiendo situar en una única fibra numerosos sensores. De esta forma, es posible también reducir la cantidad de cables necesarios, disminuyendo la complejidad de la instalación y de su integración en grandes componentes. En la Figura 18 se muestra una comparación entre una instalación con fibra óptica y con galgas extensométricas, para un ensayo en tierra en las instalaciones de *NASA Dryden Flight Research Center*. En esta se comparan los cables necesarios para 32 galgas con las cinco fibras ópticas que presentan el mismo número de sensores.

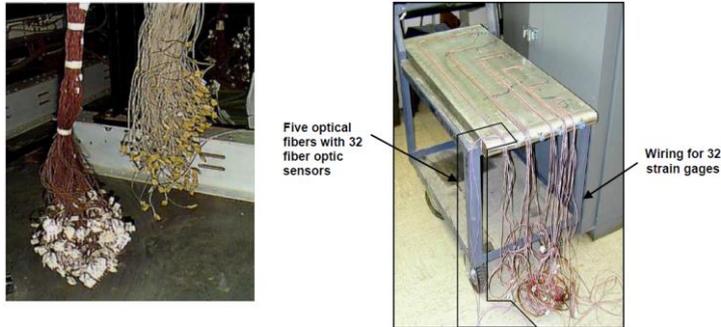


Figura 18. Comparación de instrumentación de ensayos mecánicos con bandas extensométricas y sensores de fibra óptica [RIC 2012].

La aplicación de bandas extensométricas a regiones de gran área puede resultar compleja, debido al mantenimiento de los cables eléctricos necesarios para cada galga. Además, en situaciones en las que la longitud de los cables sea elevada, la caída de voltaje puede estar ocasionada por la propia resistencia del cable, imposibilitando la sensorización con galgas.

- Vida útil

Las redes de Bragg son dispositivos autoreferenciados, con una vida útil superior a los 20 años. En el caso de las galgas, la vida no suele ser muy prolongada, requiriendo el cambio de los sensores en ensayos de larga duración y aplicaciones de monitorización [NI 2011]. Además, deben ser calibrados previamente a cada aplicación.

- Aplicación en ambientes extremos

Dado que los sensores de Bragg funcionan con luz, son elementos intrínsecamente seguros y no afectados por interferencias electromagnéticas. Esto permite su aplicación en ambientes incontrolados o extremos. Dichas situaciones pueden hacer inviable la instalación de bandas extensométricas. Los cambios de voltaje de una galga típicamente resultan en diferencias del orden de mV, siendo los sensores y cables altamente vulnerables a interferencias electromagnéticas. La reducción de la longitud de los cables permite minimizar el impacto del ruido exterior.

A modo de resumen, en la Tabla 1 se muestra una comparación entre las prestaciones proporcionadas por las bandas extensométricas y las redes de Bragg:

Tabla 1. Comparativa de características entre sensores FBG y galgas extensométricas [ZSE 2016].

Característica	Fibra Óptica	Galga
Radiación EM	Inmune	Sensible
Descarga eléctrica	A prueba de descargas eléctricas	Puede dañarse o incluso suponer el fallo total
Conductividad eléctrica	No conduce electricidad- no son necesarias precauciones adicionales para usos en exteriores o bajo agua	Todos los cables necesitan ser sellados herméticamente para su uso en exteriores o bajo agua
Seguridad ante explosiones	Sin chispas y seguro en atmósferas explosivas	Peligroso en atmósferas explosivas
Distancia de medida	Hasta decenas de km	Rango limitado
Multiplexado	Sí	No
Peso	Fibras ligeras	Pesado a consecuencia de los cables de cobre necesarios para la alimentación y medida
Recubrimiento protector	No es necesario para su operación	Requerido para evitar corrosión, conductividad eléctrica, etc.
Resistencia a fatiga	Excelente. Efectos despreciables para menos de 2 millones de ciclos	No es posible alcanzar la respuesta de las galgas
Sensibilidad transversal	Despreciable. Miden en la dirección longitudinal de la fibra	Debe ser cuantificado en numerosas ocasiones
Precio (sensor + dispositivo de medida)	Elevado. Resulta más económico al aumentar el número de sensores por línea	Bajo. Aumenta linealmente con el número de sensores, puesto que cada dispositivo necesita un canal de medida independiente

Característica	Fibra Óptica	Galga
Sensibilidad a temperatura	Relativamente alta. Necesaria compensación	Relativamente baja. Necesaria compensación
Otros efectos de temperatura inducidos	Ninguno	Generación de calor por efecto Joule. Puede ocasionar errores de medida

2.3.1. Medida de deformación con redes de Bragg

El cambio de longitud de onda de un sensor de Bragg está determinado por la ecuación:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon\Delta\varepsilon + K_T\Delta T \quad (2.12)$$

Suponiendo que durante la medida la temperatura se mantiene constante, la ecuación se reduce a:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon\Delta\varepsilon \quad (2.13)$$

El empleo de un FBG como sensor de deformación requiere determinar el factor de sensibilidad en dicha ecuación. El fabricante del sensor suele proporcionar el valor de dicha constante en las especificaciones del dispositivo. No obstante, numerosos autores realizan ajustes experimentales para determinar de forma precisa este factor de conversión [LUY 2010], comparando la lectura de los sensores ópticos con bandas extensométricas. Pereira et al. [PER 2013] efectúa un ajuste de segundo orden en el que calcula el polinomio que mejor se adapta a cinco especímenes de fibra de carbono unidireccional, en los que se han embebidos redes de Bragg. Los autores Schluter et al., en [SCH 2010], tienen como objetivo obtener el factor de conversión de sensores FBG embebidos en parches comerciales. Para ello, la medida de los sensores de fibra óptica se compara con la de galgas extensométricas adheridas a los componentes estudiados. Durante estos ensayos, se aprecian diferencias significativas entre el factor de sensibilidad aportado por el fabricante y el calculado experimentalmente.

La sensibilidad de las redes de Bragg ante deformación es del orden de 1 μm

[COR 2010]. La veracidad de la lectura está fuertemente condicionada por la calidad de la transferencia de deformación desde el componente medido hasta el sensor. Un aspecto fundamental en este punto es el recubrimiento de la fibra. Generalmente, en las fibras comerciales el recubrimiento suele ser de acrilato, poliimida u ORMOCER (este último menos frecuente). Las características de los dos primeros tipos se presentan en la Tabla 2 [COL 2006, RIV 2005].

Tabla 2. Comparativa de características entre recubrimientos.

Propiedad	Acrilato	Poliimida
Retirada	Medios mecánicos o químicos	Medios químicos
Transmisión de deformación a través de recubrimiento	Bueno para cortos periodos de tiempo, bajas tensiones y temperaturas inferiores a 35°C	Excelente
Protección mecánica	Muy leve	Muy leve
Protección química	Moderada	Moderada
Coefficiente de expansión térmica	Muy bajo $0,5 \cdot 10^{-6}$	Muy bajo $0,5 \cdot 10^{-6}$
Coste	Bajo	Alto
Temperatura máxima uso	Temperatura ambiente	De forma puntual resiste hasta ~400°C, de forma continuada hasta ~200°C

Los autores Riveira et al., en [RIV 2005], realizan un estudio comparativo entre galgas extensométricas y sensores de Bragg, tanto con recubrimiento de acrilato como de poliimida. En estos ensayos se sitúan sensores de ambas tipologías sobre la superficie de probetas de tracción (una galga, un FBG con recubrimiento de acrilato y otro con recubrimiento de poliimida). La carga se eleva en escalones de 40 μm hasta llegar a las 200 μm . Para ambos tipos de recubrimientos se obtuvo un buen ajuste con la medida de la galga considerada como referencia ($\pm 5 \mu\text{m}$).

Múltiples autores han analizado la correcta medida de las redes de Bragg en diversos componentes y ante diferentes condiciones de carga. Frovel et al. [FRO 2009, FRO 2006] evalúan la respuesta de FBGs (tanto embebidos como encolados a la superficie) durante ensayos de tracción y compresión en probetas de fibra de carbono y resina epoxy (unidireccional y multidireccional). Estos ensayos

se ejecutan a diferentes temperaturas (comprendidas entre -150°C y 120°C) y en condiciones de humedad y ambiente seco. Los datos se comparan con la medida de la extensometría tradicional adherida a la superficie. Se demuestra una muy buena correlación de los resultados obtenidos con los dos dispositivos (desviaciones en torno al 2% para rangos de deformación comprendidos entre 2.500 y $5.500\ \mu\text{m}$). Resultados similares concluyen Kuang et al. en [KUA 2001], en los que se evalúa el efecto de embeber sensores en laminados con distinta secuencias de apilado. Tras el curado, el espectro reflejado por el sensor se ve modificado. Mediante ensayos de tracción se analiza la influencia de la forma de dicho espectro sobre el resultado de la medida. Excelentes ajustes entre las bandas y los FBGs se obtienen en estas pruebas. En el caso de Moloney et al. [MOL 2005], una probeta de fibra de carbono y resina epoxy se somete a flexión. Se detectan diferencias entre los valores de deformación proporcionados por las bandas adheridas a la superficie y un FBG embebido, cuyo origen radica en la diferente ubicación de los sensores. Otro ejemplo lo presentan Hong et al. en [HON 1998], donde se ensayan paneles de material compuesto (carbono/epoxy) a pando. La distribución de sensores se muestra en la Figura 19 a.

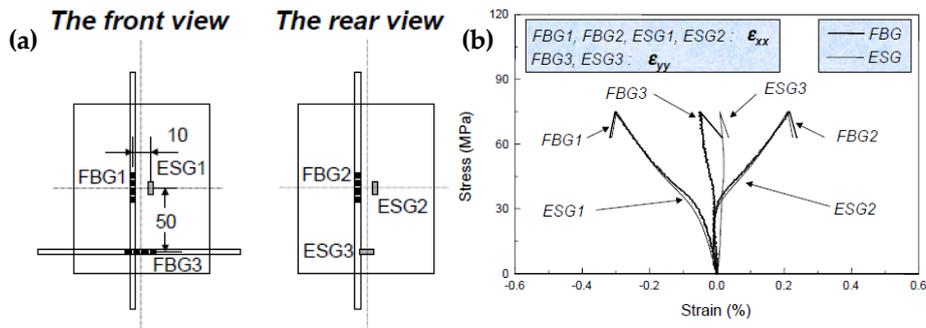


Figura 19. (a) Configuración de las probetas y (b) comparación de las deformaciones medidas con FBGs y galgas extensométricas [HON 1998].

La Figura 19 b presenta los resultados obtenidos. Se aprecia un buen ajuste en el par de sensores identificados con el número 2. Previamente al pando, en los sensores número 1 se registran diferencias ocasionadas por imperfecciones en su alineación. Por último, los dispositivos con el número 3 están fijados en la dirección transversal de la carga y en superficies opuestas, por lo cual se encuentran sometidas a distintas situaciones de carga.

Además de ensayos sobre elementos de material compuesto, se encuentran

estudios sobre probetas de hormigón [TOR 2009] caracterizadas a compresión, comparando galgas con FBGs. Los resultados extraídos son muy satisfactorios. Las leves diferencias registradas son debidas a descentramientos de la carga ocasionados por un refrentado no uniforme de la base de la probeta o a pequeñas desviaciones en la alineación del sensor con la dirección de la carga. Este es un aspecto crítico en el empleo de las redes de Bragg.

Por último, aunque la medida con FBGs se realiza según la dirección longitudinal de la fibra óptica, es posible fabricar rosetas con tres redes de Bragg para la medida de deformación y otro sensor para la compensación en temperatura [BET 2006, HAR 1998, IST 2015]. Para mantener las posiciones relativas entre los sensores, estos se emben en parches de diferentes materiales (p.e. poliimida). Ramos et al. en [RAM 2011], diseñan y fabrican una roseta embebida en un parche de pre-impregnado de material compuesto (Figura 20 a). La roseta se adhiere a una placa de aluminio ensayada a tracción. Los datos extraídos durante los ensayos se verifican con los medidos con una roseta basada en galgas extensométricas. La medida más precisa se realiza en la dirección a 0° , mientras que las mayores discrepancias aparecen en la de 45° . Resultados análogos se obtuvieron en las pruebas de flexión (Figura 20 b).

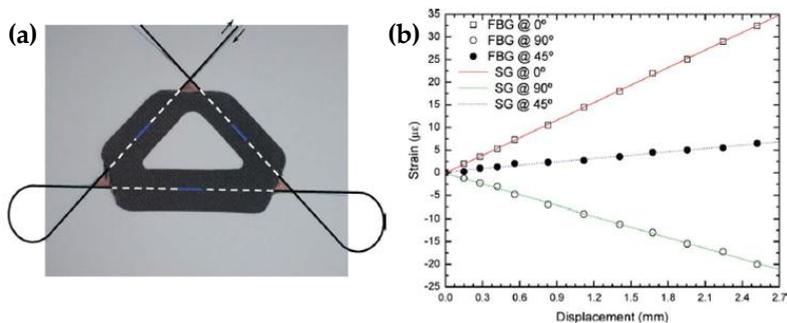


Figura 20. (a) Roseta formada por FBGs en parche de material compuesto y (b) comparación de las lecturas durante el ensayo flexión [RAM 2011].

2.4. Medida de temperatura

El método más extendido para la medida y monitorización de temperatura es el empleo de termopares. Un termopar es un sensor de temperatura consistente en

dos hilos metálicos de materiales diferentes unidos en el extremo.

Los sensores de Bragg suponen una importante competencia para los termopares, que presentan la desventaja de ser eléctricamente activos, y por ello inadecuados para aplicaciones en las que el uso de energía eléctrica supone un riesgo de incendio o explosión, así como ambientes corrosivos donde los sensores metálicos se degradan rápidamente. Los dispositivos tradicionales pueden verse afectados por perturbaciones en los campos magnéticos incidentes y producir puntos calientes localizados en zonas donde existan campos magnéticos o eléctricos intensos. Los FBGs son inmunes a las interferencias electromagnéticas, no viéndose afectados por estos problemas. Además, presentan una alta sensibilidad a temperatura, del orden de $0,1^{\circ}\text{C}$, con amplios rangos de temperaturas de uso. Esto último se encuentra limitado por el material empleado en el recubrimiento de la fibra [COR 2010], siendo para el caso del acrilato entre -20 y 150°C , mientras que con poliimida es posible alcanzar los 400°C de forma puntual. La viabilidad del empleo de FBGs para temperaturas criogénicas ha sido demostrada por Yamada et al. en [YAM 2011], donde se evalúa el comportamiento de estos sensores para diferentes recubrimientos.

2.4.1. Medida de temperatura con redes de Bragg

El registro de la temperatura es la segunda aplicación más extendida de las redes de Bragg. Partiendo de su ecuación de funcionamiento y asumiendo que la deformación es nula, esta expresión se simplifica como:

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T \quad (2.14)$$

De forma análoga a la medida de deformación, es necesario determinar el factor de conversión que relaciona el cambio de temperatura con el desplazamiento de la longitud de onda. Aunque el fabricante del sensor aporta un valor para esta constante, son numerosos los autores que lo calculan experimentalmente mediante ajustes lineales o de mayor orden, obteniendo mejores resultados que con los datos teóricos [WER 2013]. Con este fin, el FBG es sometido a incrementos de temperatura controlados en los que se evalúa su respuesta en función del cambio de temperatura. Barrera, en [BAR 2008], emplea una cámara climática para aplicar ciclos térmicos entre -20 y 120°C , calculando el factor de sensibilidad del sensor mediante una aproximación lineal. Los autores Luyckx et al. y Sorensen, en

[LUY 2010] y [SOR 2006] respectivamente, emplean una expresión cuadrática para relacionar el cambio de longitud de onda con el incremento de temperatura.

En general, las redes de Bragg integradas en componentes, se encuentran afectadas tanto por cambios de temperatura como de deformación. Para poder determinar de forma simultánea ambos efectos es necesario desacoplar la influencia de cada componente. Existen múltiples soluciones para conseguir este efecto, siendo la más sencilla y extendida el empleo de dos sensores de Bragg: uno afectado por deformación y temperatura y otro únicamente sensible a los cambios térmicos. Esto se consigue introduciendo el sensor en un pequeño tubo capilar (metálico, de vidrio, poliimida, etc.). Este tubo permite transmitir correctamente la temperatura al sensor que se aloja en su interior, siempre que su diámetro sea pequeño y que la temperatura sea uniforme [RIC 2012, MUL 2007]. Dentro de este, el sensor se expande libremente. Un esquema se muestra en la Figura 21.

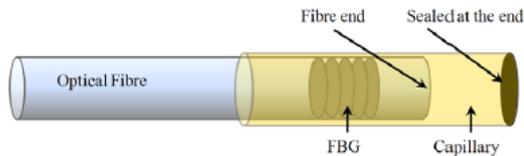


Figura 21. Esquema de sensor de Bragg en el interior de tubo capilar para aislar la deformación mecánica del incremento de temperatura [LUY 2010].

Una instalación típica para la monitorización de una estructura se presenta en la Figura 22, en los que se comparan los dispositivos tradicionales de medida (galga y termopar) con una instalación basada en redes de Bragg. Además de las ventajas propias de los FBGs (peso, inmunidad EMI, etc.) la sensorización con los sensores de fibra óptica permite emplear un único dispositivo de adquisición y procesamiento de datos para el registro de ambas magnitudes.

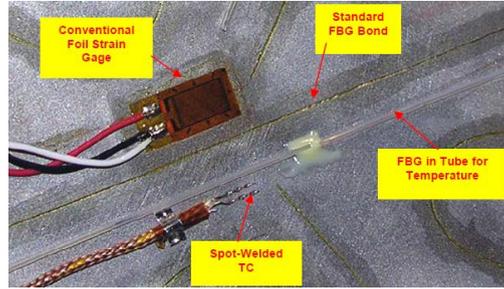


Figura 22. Instalación típica para la medida de temperatura y deformación con dispositivos tradicionales y redes de Bragg [RIC 2012].

La respuesta del sensor situado en el interior del capilar es consecuencia únicamente del cambio de temperatura. Sin embargo, el sensor fijado al componente, está afectado tanto por la deformación mecánica como por el cambio de temperatura. Para poder determinar la componente asociada a la deformación es necesario efectuar la compensación en temperatura [WER 2013]. Para el sensor en contacto con el componente se tiene:

$$\Delta\lambda_{B1} = K_{\varepsilon1}\Delta\varepsilon + K_{T1}\Delta T \quad (2.15)$$

Mientras que en el sensor encapsulado $\Delta\varepsilon=0$, por tanto:

$$\Delta\lambda_{B2} = K_{T2}\Delta T \quad (2.16)$$

Escribiendo ambas expresiones de forma matricial (2. 17), es posible despejar las dos componentes:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

En el caso de Ferguson et al. [FER 2005], en lugar de encapsular el sensor de temperatura, este se adhiere a un trozo de material únicamente afectado por el cambio de temperatura, obteniéndose también el sistema de ecuaciones anterior. Esta solución solo es válida en aquellas situaciones en las que se disponga de material adicional libre de cargas mecánicas.

Otros autores proponen soluciones que tampoco requieren el empleo del tubo capilar. Luyckx et al., en [LUY 2010] plantean la opción de usar un sensor de temperatura tradicional (termopar) para aislar este efecto, mientras que Kinet et al.

[KIN 2014], consideran la instalación de dos tipos diferentes de FBGs, con distintos anchos de bandas. Estas dos alternativas tienen un problema en común: la necesidad de dos equipos diferentes de medida.

Yang et al., en [YAN 2011], desarrollan un nuevo método para la medida simultánea de deformación y temperatura con un único FBG. Esto consiste en el encapsulado parcial del sensor, lo cual provoca la división del pico reflejado en dos. Ambos picos se comportan de forma independiente, pudiendo aislar los dos efectos. Este método proporciona buenos resultados, aunque resulta muy complejo su proceso de implementación y de interpretación de los resultados. Fernández-Valdivielso et al. [FER 2002] diseñan un nuevo concepto de sensor, consistente en un FBG (para evaluar la deformación) con un material termocrómico en el extremo de la fibra (para la medida de temperatura). De esta forma, se producen diferentes reflexiones en la longitud de onda, pudiendo identificar las dos componentes.

Song et al., en [SON 1997], vuelven al empleo de dos redes de Bragg grabadas en la misma fibra para la medida simultánea de deformación y temperatura. En este caso, ambos sensores se introducen en un capilar de vidrio. Los extremos del primer FBG se adhieren al interior de capilar. Al estar fijado, su longitud de onda no puede modificarse por deformación mecánica, pero sí por causas térmicas. El segundo sensor está afectado por las dos sollicitaciones. La principal desventaja de este procedimiento es la dificultad del pegado del sensor en el interior del capilar.

La propuesta de Tanaka et al. [TAN 2003] para efectuar la compensación de temperatura se basa en el diseño de un sensor híbrido. Este sensor se compone de dos FBGs embebidos en un parche fabricado a partir de dos materiales compuestos diferentes (CFRP y GFRP) conectados en serie. Puesto que los dos sensores se encuentran embebidos en materiales diferentes, cada uno está sometido a un coeficiente de expansión térmica distinto, pudiéndose separar los efectos del cambio de temperatura y de deformación en la estructura a la que se encuentren fijado. La viabilidad del sensor se demuestra mediante ensayos de tracción a distinta temperatura, en los que se compara su lectura con la de una banda extensométrica. Se aprecia una excelente correlación entre los registros de los dos tipos de dispositivos. Esta técnica requiere el trabajo previo de embeber los sensores en un parche de material adicional (no perteneciente a la estructura), lo cual supone un aporte de peso extra. Además, la calidad de la lectura del sensor híbrido queda limitada por la calidad de la transferencia de las deformaciones desde la pieza real al parche.

2.5. Monitorización del curado

El proceso de curado de los materiales compuestos con matriz termoplástica ocasiona tensiones y deformaciones residuales debido a la naturaleza anisótropa y no homogénea de estos materiales. Las tensiones residuales se definen como aquellas que persisten en un material libre de sollicitaciones externas, tanto cargas mecánicas como gradientes de temperatura [CAL 1994]. Estas tensiones influyen de forma negativa en las propiedades mecánicas, reduciéndolas como en el caso de la resistencia a fatiga y las propiedades de tracción y flexión [FAV 1988, ADA 1991, UNG 1998]. Además, pueden ocasionar distorsiones geométricas de diversa tipología, como ondulación de las fibras, alabeo del laminado, grietas transversales, micro-grietas entre fibra y matriz y delaminaciones, cuyos efectos contribuyen a disminuir aun más las propiedades mecánicas del compuesto. Dos de las consecuencias más significativas de las tensiones residuales a nivel de estructura son la inestabilidad dimensional y el *spring-back*. Asimismo, el mecanizado de componentes de material compuesto resulta un proceso muy complejo, debido a la deformación que se produce en la pieza derivada de la relajación de tensiones durante el mismo.

El origen de las tensiones residuales radica en las diferencias existentes entre los coeficientes de expansión térmica de la fibra de refuerzo y la matriz, que provoca distintas contracciones en ambos componentes durante la fase del enfriamiento. Estas deformaciones aparecen a nivel microscópico (entre la fibra y la resina), macroscópico (entre capas del laminado con distintas orientaciones) y global. El estado resultante de tensiones residuales es dependiente de cuatro parámetros fundamentalmente [FAV 1988]: incremento de temperatura, diferencias en los coeficientes de expansión térmica durante el enfriamiento (tanto entre los constituyentes del material compuesto como entre las capas del laminado), módulos de elasticidad de los constituyentes [WHI 2000] y fracción volumétrica de fibra [KIM 1998]. Estos parámetros están fuertemente vinculados a otras características del material compuesto, como la morfología de la matriz termoplástica (amorfa o semi-cristalina) [BAR 1994, NAI 1985(1), NAI 1985(2)], tipo de fibras [BAR 1994], propiedades de la interface fibra-matriz y nivel de adhesión [HAR 1999, KIM 1998], morfología de la fibra (tejido o pre-impregnado unidireccional), número de capas del laminado y características de la secuencia de apilado [MAN 1992, NIE 1998], así como a las condiciones de procesado, esto es, gradiente térmico aplicado durante el enfriamiento, velocidad de enfriamiento

[DES 1996, GUI 2002, KIM 1989] y material del molde [KUG 2002, LAN 1990], entre otros [PAR 2005, PAR 2007].

La falta de homogeneidad en las propiedades de los materiales compuestos y los numerosos factores que intervienen en la aparición de las tensiones térmicas dificultan la obtención de un modelo analítico que simule el estado resultante de tensiones tras el curado. En la bibliografía pueden encontrarse diversas aproximaciones matemáticas empleadas para modelar la distribución de tensiones residuales en componentes de material compuesto. Todas ellas implican realizar múltiples simplificaciones, pudiendo obtenerse una expresión analítica únicamente en casos ideales, como en los casos propuestos por los modelos de Mikata y Taya [MIK 1985], donde se evalúa el campo de tensiones residuales obtenido en un material compuesto formado por una sola fibra embebida en una matriz de dimensiones infinitas, o el modelo de Quek [QUE 2004], que analiza las tensiones de origen térmico en una sola fibra de longitud finita.

2.5.1. Métodos experimentales para la determinación de las tensiones residuales

La determinación experimental de las tensiones residuales producidas durante el curado puede efectuarse por diversas técnicas, clasificadas según su principio de funcionamiento en: técnicas basadas en las propiedades intrínsecas de los materiales constituyentes del compuesto (foto-elasticidad [DAM 1993, OGA 1991, ZHA 2005], espectrometría de Micro-Raman [BAR 1994, COW 1997] y medida de la conductividad eléctrica de la fibra de carbono [JON 2003]), técnicas basadas en la deformación de la pieza, tanto dentro como fuera del plano (métodos basados en interferometría [SJO 1999] y medida del alabeo de laminados no simétricos [BHA 1996, CIG 1999, KIM 1998, KUG 2002, RAO 1997]), técnicas destructivas (mediante la eliminación de una capa de material en laminados simétricos [AKS 2003] y la técnica del agujero ciego [HSI 1990, LI 2000, ROC 2004]) y técnicas que emplean sensores embebidos. Dentro de esta sección, destaca la utilización de sensores de fibra óptica, que pueden ser embebidos en cualquier tipo de material y geometría, registrando las deformaciones residuales de origen térmico incluso durante el proceso de curado de termoplásticos a alta temperatura. Existen distintos tipos de sensores de fibra óptica, siendo los que mejores prestaciones muestran para su aplicación a la medida de deformaciones residuales los de Fabry-

Perot y las redes de Bragg.

* Sensores de Fabry-Perot (EFPI): miden la deformación a través de la modificación de longitud de su cavidad interna, lo cual se relaciona con el cambio de fase entre las señales de entrada y salida y la reflexión de la fibra óptica [GAT 1999]. El gran diámetro del sensor puede producir una concentración de tensiones en el componente.

* Redes de Bragg: la deformación ocasionada en el componente se determina a través del cambio en la longitud de onda característica del sensor. El empleo de estos dispositivos presenta múltiples ventajas, como son la mínima alteración geométrica producida en el componente, la opción de multiplexar varios sensores en una misma fibra óptica y la posibilidad de registrar deformación en el espesor del laminado, situando sensores en distintos niveles. Las medidas se efectúan durante todo el proceso de curado.

Entre todas las opciones planteadas, la integración de sensores de Bragg resulta la técnica más prometedora para la determinación del estado de deformación residual. Este procedimiento es el que aporta mayor información, pudiendo emplearse con cualquier tipo de material compuesto y siendo su única desventaja el requisito de integrar un elemento ajeno al compuesto en su interior. Además, no solo permite conocer el estado residual de deformación, sino que permite evaluar su proceso de formación durante todo el curado, verificando la correcta evolución de la fabricación del compuesto.

2.5.2. Técnicas convencionales para monitorización del curado

Las propiedades finales del material compuesto están fuertemente vinculadas al proceso de curado de la resina. El nivel de curado depende del tiempo, la temperatura del proceso y la presión aplicada, además del tipo de agente de curado y de la realización o no de operaciones de post-curado. Por este motivo, resulta de interés analizar el comportamiento del material compuesto durante el curado y evaluar la influencia sobre sus propiedades de una variación en los parámetros de fabricación.

Existen diversos procedimientos para monitorizar y estudiar el grado de curado de los materiales compuestos [JAR 2004], los cuales se suelen dividir en métodos directos e indirectos. Entre los métodos directos destacan la cromatografía tipo gel

(GPC), la resonancia magnética nuclear (RMN) [NEA 2016], la espectroscopía de Raman o de Micro Raman (MRS) y la espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier [JAR 2004]. Dentro de los métodos indirectos, los procedimientos más extendidos son la calorimetría diferencial de barrido (DSC) [HAR 2012, SUR 1992], el análisis mecánico dinámico (DMA) [TAI 2016] y el análisis dieléctrico (DEA) [HAR 2012].

De todas las técnicas empleadas tradicionalmente para el estudio del curado, ninguna de ellas es válida para la medida *in situ* de las deformaciones o tensiones originadas durante el proceso. El empleo de redes de Bragg embebidas en el compuesto permite la caracterización de los campos de deformación aparecidos en el componente durante la etapa del curado.

2.5.3. Monitorización del curado de laminados de material compuesto mediante sensores de Bragg

Para producir materiales compuesto con alta densidad, bajo volumen de poros y altas prestaciones mecánicas, es necesario caracterizar el proceso de curado. De esta forma, es posible conocer la evolución de las propiedades mecánicas y químicas durante el mismo y determinar cuándo se ha alcanzado el fin del curado.

El desarrollo de sensores de fibra óptica, y en especial, los sensores de Bragg, han permitido la evaluación *on line* del curado de estructuras de material compuesto, así como la evaluación de las tensiones residuales al final del mismo.

El uso de este tipo de sensores para monitorizar el curado comenzó en 1.990, cuando Dunphy et al. utilizaron FBGs embebidos en materiales compuestos para analizar la vitrificación [DUN 1990]. Estos estudios han experimentado un crecimiento significativo recientemente, debido al aumento del empleo de los materiales compuestos.

Cuando una red de Bragg es embebida en un laminado de material compuesto, el sensor sufre una sollicitación mecánica en las tres direcciones del espacio. Esto produce cambios tanto en el periodo del FBG (al modificarse su longitud) como en el índice de refracción del mismo, el cual cambia de forma diferente en los ejes x e y (Figura 23 a). Como consecuencia, la longitud de onda reflejada se divide en dos, debido a la aparición del efecto de birrefringencia (Figura 23 b).

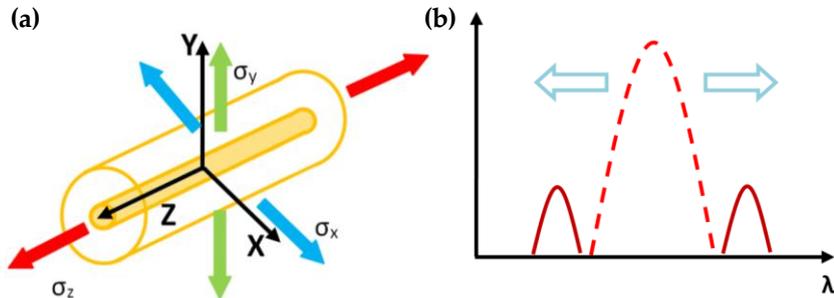


Figura 23. (a) Esquema de fibra óptica sometida a estado multiaxial de cargas y (b) división del pico reflejado por el sensor de Bragg como consecuencia del estado multiaxial de cargas.

El estudio del curado mediante FBGs requiere disponer como mínimo de dos sensores independientes, uno para efectuar la compensación en temperatura y otro para registrar las deformaciones mecánicas. El sensor de temperatura debe ser aislado de las sollicitaciones mecánicas, permitiendo su libre expansión por cambios térmicos. Con este objetivo, Parlevliet et al. [PAR 2010] proponen encapsular el sensor de Bragg en un capilar de acero inoxidable (AISI 304). Dicho capilar tiene una longitud de 40 mm, con un diámetro interior de 0,6 mm y exterior de 1 mm. El sensor queda conectado con el resto de la fibra óptica únicamente a través de uno de sus extremos (por el que entra en el capilar), quedando el otro en el interior de la capsula para su libre expansión. Ambos lados del capilar son sellados con un adhesivo epoxy resistente a alta temperatura, evitando la entrada de la resina del material compuesto en el capilar durante la fase de fluencia (Figura 24).

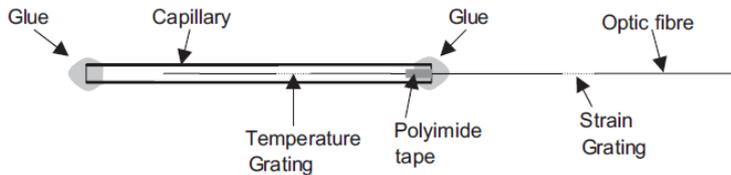


Figura 24. Esquema del sensor encapsulado [PAR 2010].

Esta solución es también utilizada por otros autores como Collombet [COL 2007], Sun [SUN 2011] y Montanini [MON 2007]. En todos los casos se vuelve a usar un capilar de acero de pequeño diámetro. El extremo libre del capilar se sella con una resina epoxy resistente a alta temperatura. Para corroborar la correcta medida del sensor de compensación, suelen utilizarse termopares embebidos en el laminado y

situados próximos a estos sensores.

La necesidad del empleo de un sensor de compensación embebido se debe a la reacción exotérmica de la resina que tiene lugar durante este proceso, la cual induce diferencias significativas entre la temperatura en el interior y el exterior del laminado.

El análisis del curado y de las tensiones residuales con sensores de Bragg se realiza a través del desplazamiento de la longitud de onda de los FBGs integrados y del estudio del cambio de forma del espectro reflejado. Tsai et al., en [TSA 2009], muestran la evolución del pico reflejado por el sensor de compensación embebido durante la fase de calentamiento del curado de un laminado de fibra de carbono y resina epoxy (Figura 25). Se aprecia que al comienzo del curado la amplitud de la señal reflejada es pequeña, debido a la presión aplicada. A medida que aumenta la temperatura, se produce un incremento de la intensidad de esta señal. La transición vítrea de la resina se manifiesta mediante un cambio en la pendiente de la secuencia de espectros. El análisis de la lectura de los sensores al final del proceso permite determinar las tensiones residuales en la lámina central, las cuales se encuentran en torno a 63,6 MPa.

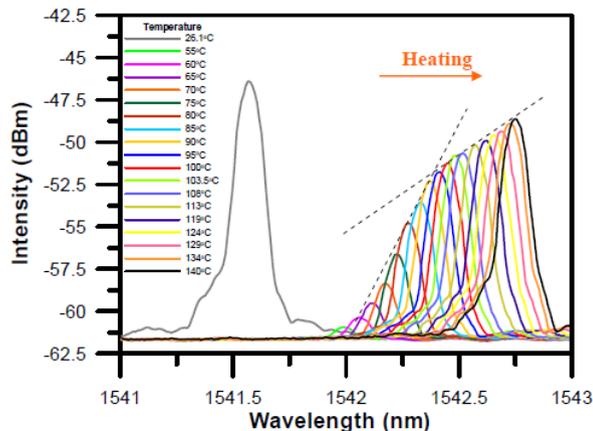


Figura 25. Evolución del espectro reflejado por el FBG de compensación durante la etapa de calentamiento [TSA 2009].

Otro estudio sobre la monitorización del curado es realizado por Montanini et al. en [MON 2007]. En este se analiza la influencia del distinto número de capas del laminado sobre las deformaciones residuales. Tres laminados de GFRP se

fabricaron, presentando 12, 18 y 24 capas, respectivamente, y situando en todos los casos los sensores entre la tercera y la cuarta lámina.

El cambio de longitud de onda de los sensores integrados en la primera probeta se presenta en la Figura 26, así como la diferencia entre ambas medidas. Se comprueba que el sensor de deformación registra un pico durante de incremento de temperatura, a consecuencia de la fluencia de la resina del material compuesto. Este pico también puede observarse en el sensor de temperatura, debido a la reacción exotérmica que tiene lugar.

En el periodo de estabilización a alta temperatura, la diferencia entre ambos sensores permanece prácticamente constante, incrementándose en la fase de enfriamiento. Al final del curado se verifica que el sensor de temperatura regresa a cero, mientras que el de deformación registra un valor remanente, apareciendo deformaciones residuales negativas.

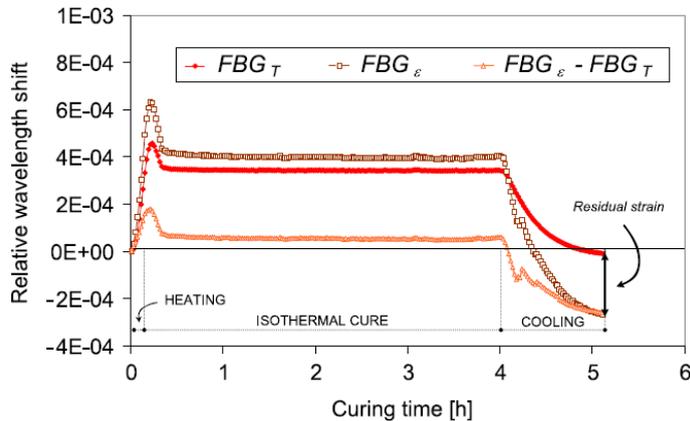


Figura 26. Desplazamiento de la longitud de onda de los sensores embebidos en la probeta con 12 capas de pre-impregnado [MON 2007].

El empleo de sensores de Bragg para la monitorización del curado permite conocer la distribución de tensiones a través del espesor. Shen [SHE 2011] analiza la distribución de tensiones en el espesor en nueve laminados unidireccionales de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*). Cada probeta consta de 28 capas, situándose los sensores en diferentes ubicaciones para cada una (capa 0, capa 5, capa 10 y capa 13). Los resultados muestran que las deformaciones inducidas por el curado en las diferentes láminas a través del espesor son menores a $1.000 \mu\epsilon$. Además, se

comprueba que dichas deformaciones se producen durante la etapa de enfriamiento.

En este estudio se detectaron problemas de pérdida de amplitud de la señal, a consecuencia de la presión aplicada y la curvatura de la fibra óptica, no siendo posible monitorizar el curado con todos los sensores integrados. Aunque se trata de laminados planos, el recorrido seguido por la fibra óptica en el interior del laminado presenta curvas para situar los sensores en las ubicaciones deseadas. El radio de curvatura de las fibras ópticas debe ser mayor a un determinado valor especificado por el fabricante (alrededor de 17-20 mm). En el caso de radios menores se producen atenuaciones significativas de la intensidad de la señal, debido a la fuga de modos del interior del núcleo, que impiden detectar la señal reflejada por el sensor.

El efecto de delaminaciones presentes en laminados durante el curado fue evaluado por Murukeshan en [MUR 2000]. En este estudio se fabricaron probetas con 10 láminas de pre-impregnado cada una, en CFRP y GFRP, introduciendo defectos artificiales (delaminaciones) en la mitad de ellas. La aparición de deformaciones residuales tras el curado se muestra en la Figura 27, donde se representa el cambio de longitud de onda frente al tiempo para una probeta de cada tipo.

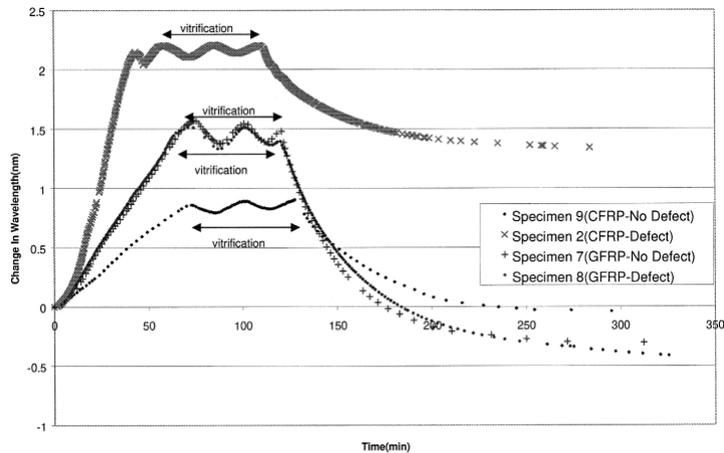


Figura 27. Representación del cambio de longitud de onda frente al tiempo [MUR 2000].

C. C. Chiang estudia la monitorización del curado de laminados de CFRP en [CHI 2011 a] y [CHI 2011 b]. En estos estudios se evalúan diversos aspectos, como la evolución de las tensiones en el espesor, para lo cual se fabrican laminados con sensores de fibra óptica integrados en distintas capas del laminado, o el efecto del proceso de fabricación *Modified diaphragm* sobre dichas tensiones residuales. En ambos casos se observan comportamientos análogos durante las etapas del curado. En la fase de calentamiento, la temperatura se eleva alcanzando la transición vítrea de la resina. En este periodo, se registran cambios en las propiedades físicas del material compuesto, como la viscosidad del epoxy cuyo comportamiento es inversamente proporcional al de la temperatura. Esto queda reflejado en la lectura del sensor de Bragg, detectándose un aumento de la amplitud del pico así como un cambio en la pendiente de la línea de tendencia. En la etapa de enfriamiento, la señal reflejada tiende a separarse en dos picos, al traspasar una determinada temperatura (95°C en este caso). Esto es debido a que cuando la temperatura disminuye por debajo de la de transición vítrea la matriz epoxy comienza a contraerse, causando tensiones no-uniaxiales. La división del espectro durante la etapa de enfriamiento es recogida por numerosos autores como Tsai [TSA 2009] y Sorensen [SOR 2005].

La monitorización del curado con sensores de Bragg ha sido aplicada tanto a procesos de fabricación mediante autoclave para CFRP ó GFRP (como son los casos anteriores), como a otros métodos de manufactura de materiales compuestos, destacando *Resin Transfer Molding* (RTM) estudiado por los autores Collombet [COL 2007] y Jung [JUN 2007], *Liquid Resin Infusion* (LRI) evaluado por Parlevliet [PAR 2010], *Composite Compression Molding Process* de Zhao en [ZHA 2007] ó *filament winding* también analizado por Collombet en [COL 2007]. En todos los casos fue posible analizar la evolución de las deformaciones durante el curado, determinando el estado de tensiones residuales resultante del mismo.

Por último, los autores H. K. Kang, D. H. Kang y C. S. Hong en sus estudios de monitorización del curado realizados en [KAN 2002] y [KAN 2003], proponen el empleo de sensores híbridos FBG/EFPI para la medida simultánea de temperatura y deformación, evitando así el uso de un sensor de compensación. En el caso de Leng et al. [LEN 2002], se efectúa la monitorización del curado de un laminado de CFRP empleando dos tipos de sensores de fibra óptica distintos: sensores de Fabry-Perot (EFPI) y sensores de Bragg. Una excelente correlación entre ambos tipos de sensores se obtuvo, detectándose la fase de vitrificación en los dos casos.

2.6. Métodos de integración de fibra óptica embebida en estructuras de material compuesto

El principal problema que presentan los FBGs es la fragilidad de la fibra ante esfuerzos cortantes. La fibra óptica muestra una alta resistencia ante esfuerzos aplicados en dirección longitudinal (en torno a $5.000-10.000 \mu\epsilon$, según el tipo de fibra óptica y su recubrimiento). Sin embargo, bajo esfuerzos cortantes o al someterla a radios de acuerdo acusados ($\sim 17 \text{ mm}$) la fibra se rompe con facilidad. Esto supone una importante limitación, pues tras su integración en la estructura es imposible su reparación, pudiendo quedar inutilizados todos los sensores situados en la misma.

La técnica de embebido permite proteger la fibra óptica de golpes y agentes externos. En este caso, la fibra se sitúa directamente entre dos capas consecutivas del laminado o se entrelaza con las fibras de refuerzo en los tejidos [BLA 2011]. Según el método de fabricación del material compuesto, se impregna con la resina durante el proceso de fabricación (e.g. pultrusión) o durante la aplicación de vacío.

La integración de la fibra óptica mediante el procedimiento de embebido presenta algunos aspectos negativos. Uno de los problemas es debido al tamaño de la fibra. Aunque sus dimensiones son reducidas (en torno a $125 \mu\text{m}$, lo cual favorece este método de integración), esta magnitud es bastante considerable comparada con el diámetro de las fibras de refuerzo del material compuesto (alrededor de $16 \mu\text{m}$ en fibra de vidrio y $8 \mu\text{m}$ en la de carbono) y con el espesor de capa de pre-impregnado. Por ello, al introducir una fibra entre dos capas del laminado se producen discontinuidades que se llenan de resina (Figura 28) y adquiere forma de ojo. Estas discontinuidades pueden inducir delaminaciones [BAL 2006, UDD 2005].

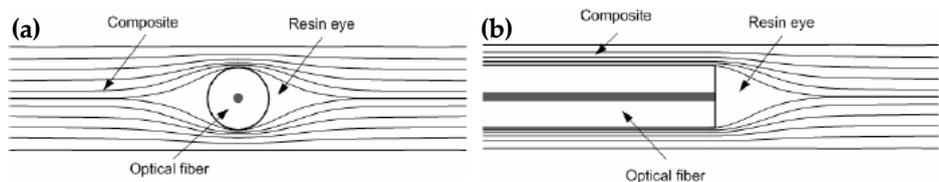


Figura 28. Esquema de los defectos producidos por la fibra óptica embebida [BAL 2006].

La forma y tamaño de estas acumulaciones de resina dependen de la orientación de la fibra óptica respecto de las fibras de refuerzo del material compuesto. Las

propiedades mecánicas del laminado se ven más afectadas si la fibra óptica se sitúa en dirección perpendicular a las fibras de refuerzo del compuesto. Si el sensor se sitúa paralelo a estas y con los dos extremos fuera del laminado, el tamaño de los defectos introducidos es prácticamente nulo [BAL 2006, LUY 2010]. Estas acumulaciones se presentan en la Figura 29, en la que la fibra se ha situado entre capas de pre-impregnado a $+45^\circ$ y -45° .

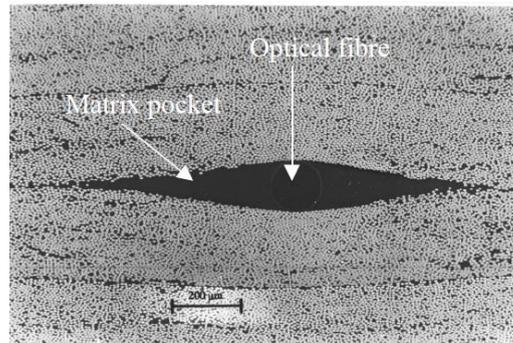


Figura 29. Fibra óptica embebida entre capas de pre-impregnado a $+45^\circ$ y -45° [LEV 2008].

La influencia de dichas concentraciones de resina en las propiedades mecánicas del laminado no se conoce completamente. Múltiples estudios han demostrado que la resistencia y la vida a fatiga de laminados de material compuesto no se ven afectados por la presencia de una fibra óptica alineada con las fibras de refuerzo [GUE 1996, JEN 1992, JEN 1992 (2), JEN 1995, SAT 2001, SHI 2004, SKO 1999, SKO 2000, SUS 1994]. En el caso de fibra no alineada con el refuerzo del material compuesto, la bibliografía muestra resultados contradictorios [PAL 2008]. Por un lado, M. Frovel [FRO 2006] indica que las propiedades mecánicas de los laminados no se ven reducidas por la fibra óptica. Por su parte, Song et al. [SON 2011] tras analizar el efecto de integrar fibra óptica a distintas profundidades del laminado concluye que la resistencia disminuye un 4,7% respecto a la de componentes sin fibra óptica. Este efecto es menor al colocar la fibra próxima a la mitad del laminado.

Otro aspecto a considerar son los problemas asociados a la fabricación de componentes con sensores embebidos. La introducción de estos sensores en los actuales procesos de fabricación de materiales compuestos supone un desafío tecnológico, dado que los métodos de fabricación son incompatibles con la

fragilidad de la fibra óptica. La acción de embeber la fibra óptica en laminados de material compuesto lleva asociado un importante incremento del coste y tiempo de fabricación. El punto de salida de la fibra óptica del material compuesto es una parte fundamental y crítica del proceso de manufactura [LUY 2010]. Dicha salida puede realizarse tanto por el lateral del laminado como por la superficie.

El éxito de embeber la fibra óptica en estructuras ingenieriles requiere resolver algunos puntos clave [EAT 1992] como la elaboración de procedimientos robustos para su manipulación y el desarrollo de métodos fiables para la protección de la salida de la fibra y su conexionado con el equipo de adquisición. Dichos métodos y procedimientos de conectorización deben satisfacer los siguientes requisitos para su empleo en estructuras de material compuesto [EAT 1992, GRE 1999]:

- Capacidad de mantener la fibra óptica y el conector con pocas pérdidas.
- Aptos para el proceso de curado del material compuesto, resistiendo las condiciones de temperatura, presión y vacío aplicadas durante el mismo.
- Alta precisión para mayor rendimiento de los circuitos opto-electrónicos.
- Robusto ante condiciones ambientales y de servicio de la estructura, como vibraciones, fluctuaciones de temperatura o humedad.
- Deben permitir el mecanizado de los bordes de la estructura y la unión de varias partes.
- Compatibilidad con los sistemas estándar de la industria óptica para aprovechar sus continuas mejoras.
- Simpleza y robustez para conectar y desconectar en entornos industriales.
- Bajo coste.

Este asunto es objeto de continuos trabajos de investigación y desarrollo.

2.6.1. Conexionado de fibra óptica con salida por el borde

La salida de la fibra óptica por el borde del laminado facilita el proceso de integración de fibra embebida. Todas las operaciones sobre el sensor se realizan en una misma capa. Una vez terminada, se puede proseguir con el proceso de laminación de forma habitual. Son numerosos los autores que plantean soluciones para proteger la salida de la fibra óptica por el borde del laminado.

Eaton et al. [EAT 1992] proponen introducir la fibra óptica en una capa adicional de pre-impregnado la cual se lamina con el resto de capas durante el proceso de

fabricación. Esta capa presenta la misma resina que el material compuesto de la estructura, permitiendo su completa adherencia. Se trata de un procedimiento robusto para la manipulación de la fibra, que queda protegida y que permite verificar el correcto funcionamiento del sensor embebido antes de su introducción en la estructura. Además, es un método adecuado para procesos automatizados. No obstante, la necesidad de una capa extra de laminado supone un incremento de peso a la estructura, aspecto crítico en la industria aeronáutica.

Otra solución ampliamente empleada es el uso de tubos capilares para proteger la salida de la fibra óptica. Este método resuelve algunos de los problemas derivados del proceso de curado. Durante la fase de calentamiento, la temperatura del compuesto es elevada traspasando el valor de transición vítrea de la resina y ocasionando su fluencia. En el caso de fibras embebidas con salida por el borde, la resina fluye a lo largo de la misma. En la etapa de enfriamiento la resina alrededor de la fibra se solidifica, ocasionando que aumente la fragilidad y dificultando el desmoldeo del laminado sin la rotura de la fibra [GRE 1999].

El uso de tubos capilares protege la fibra del flujo de resina y reduce el aumento de la fragilidad. Estos tubos pueden ser de polímeros como Teflón o PVDF [BEU 2012] o de metal como acero inoxidable. Su principal característica es sus reducidas dimensiones, alrededor de 200 μm de diámetro interior y 400 μm de diámetro exterior, lo cual minimiza la distorsión producida en la estructura de material compuesto. En la Figura 30 se muestran ejemplos de este procedimiento:

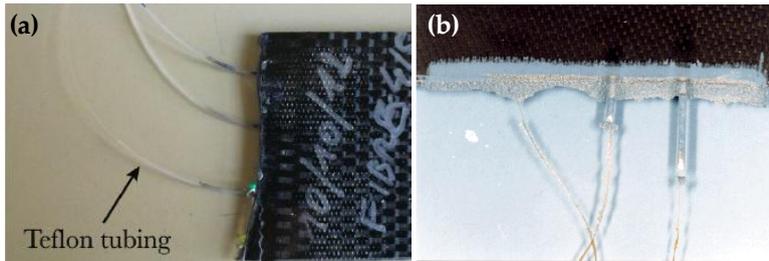


Figura 30. Tubo capilar protector de salida de fibra óptica embebida por el borde: (a) tubo de teflón [KIN 2014] y (b) tubos capilares termoplásticos de diversos tamaños [GRE 1999].

Malte Frovel [FRO 2006] diseña una técnica alternativa al uso de tubos capilares. En este caso, la salida de la fibra se protege con un bloque de caucho acrílico. Para el curado, de forma adicional se emplea un molde que evita radios de giro acusados

de la fibra y deformaciones del caucho (a causa del vacío y la presión aplicados). El resultado final se presenta en la Figura 31.



Figura 31. Probeta con salida de fibra óptica por el borde con protección de caucho [FRO 2006].

Los métodos anteriores resultan útiles en aplicaciones de laboratorio, pero son inaceptables para aplicaciones reales, pues impiden el mecanizado del borde del material, así como la conexión de la pieza fabricada con el resto de la estructura.

Para mejorar los problemas de mecanizado y robustez, se desarrollan soluciones basadas en conectores de borde. Green y Shafir [GRE 1999] proponen un conector formado únicamente por una férula de zirconio con la estructura necesaria para su adaptación con otro conector tipo FC-PC. Se trata de un conector robusto, con pérdidas en torno a 3-4 dB. No obstante, impide la unión con el resto del componente y produce distorsiones geométricas significativas en el laminado (Figura 32 a). No es posible su aplicación en cualquier tipo de laminado, siendo necesario un espesor mínimo.

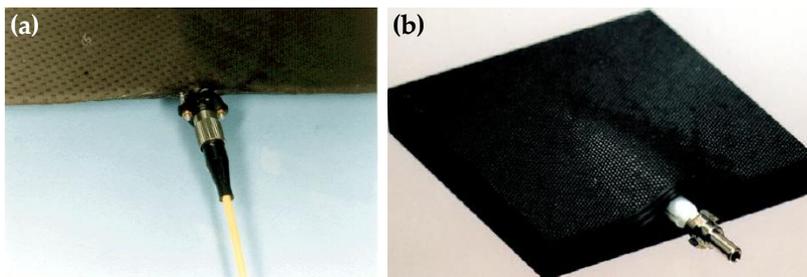


Figura 32. (a) Conector de borde diseñado por Green y Shafir [GRE 1999] y (b) conector tipo FC integrado en laminado [SJO 2001].

Otro ejemplo de conector de borde lo muestra Kinet en [KIN 2014], en el que se ha optado por miniaturizar un conector comercial de telecomunicaciones. A. Sjogren [SJO 2000, SJO 2001] ha desarrollado conectores de borde que permiten el completo

mecanizado del perímetro de la pieza. La estructura de estos dispositivos es análoga a la de los anteriores, estando constituidos por férulas de zirconio con monturas estándar tipo MT y FC. Para poder mecanizar por completo el borde del laminado es necesario que el conector no quede a ras de la superficie tras el curado, sino unos milímetros en su interior. Para ello, durante la fabricación se emplean *dummies* de PTFE. Estos elementos son ligeramente mayores en ancho y espesor que las férulas embebidas, permitiendo su inspección, limpieza y posterior conexionado.

Las monturas FC o MT se embeben en el interior del laminado, bien entre capas completas del laminado (lo cual produce una gran distorsión) o adaptando la geometría de las capas para crear un hueco en el que acomodar el conector (con menor deformación). El empleo de este tipo de conectores es válido en laminados con espesores anchos (Figura 32 b).

La inclusión de los conectores en la estructura del material compuesto produce una reducción de su resistencia mecánica, tanto en tracción (del orden del 50%) como en compresión (superior al 50%). Este efecto deber ser considerado en el diseño del laminado, debiendo ser ubicados en regiones poco solicitadas.

2.6.2. Conexionado de fibra óptica con salida por superficie

En aplicaciones industriales la salida de la fibra óptica embebida por el borde del laminado no es una solución factible pues, en general, es necesario unir varias estructuras de material compuesto a través de sus bordes. La salida de la fibra óptica por superficie se convierte en la única opción viable. Este hecho aumenta la dificultad del proceso de integración de fibra óptica, siendo necesario que esta atraviese todas las capas que quedan por encima de su ubicación. Asimismo, el ángulo de salida debe ser tal que se evite dañar la fibra óptica. El punto de salida de la fibra continúa siendo una región crítica, cuya supervivencia debe ser garantizada. Las soluciones propuestas para la protección de esta zona son análogas a las planteadas en el caso de salida por el lateral.

Para preservar el punto de salida de la fibra óptica en superficie, Kang et al. [KAN 2000] diseñan un protector de aluminio. Consiste en un bloque de aluminio constituido por dos partes para facilitar su instalación (Figura 33 a). La fijación a la estructura se realiza mediante un adhesivo y a través de la propia resina del

compuesto durante el curado. La geometría de estos protectores se adapta a la del componente en el que se instale. Durante el curado, sobre el laminado se sitúan placas metálicas para impedir la aparición de marcas de impresión de la fibra óptica.

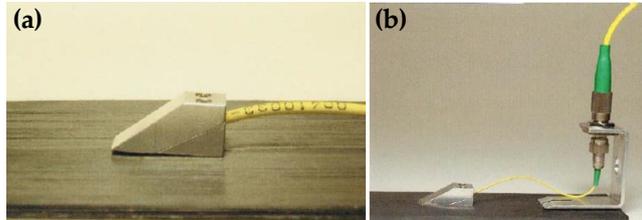


Figura 33. Imágenes de (a) protector de salida de fibra óptica en superficie y (b) conectorización de fibra óptica con salida en superficie [KAN 2000].

Estos autores desarrollan adicionalmente elementos de fijación entre conectores, para evitar la presencia de cables de fibra óptica de gran longitud sin fijar a la estructura. Se trata de adaptadores de aluminio que se adhieren a la superficie del laminado pudiéndose adoptar diversas configuraciones, una de las cuales se muestra en la Figura 33 b. De esta forma, se reduce el riesgo de rotura de la fibra durante la manipulación del componente.

Frovel [FRO 2006], vuelve al empleo de bloques de caucho acrílico para proteger la salida de la fibra óptica. El caucho tiene la ventaja de ser un material blando, que permite acomodar la fibra durante el curado y evita presiones puntuales o cortes de cizalladura. Tras estudiar distintas configuraciones y analizar su durabilidad mediante de ensayos de fatiga, Frovel alcanza la configuración presentada en la Figura 34. En color gris se representan los anillos de caucho que protegen la fibra (en color azul). Alrededor de la fibra se sitúa en primer lugar un tubo de teflón de 0,9 mm de diámetro, y sobre este un tubo termoretráctil de unos 50 mm de largo. Por último, en torno al anillo de caucho se coloca un anillo de silicona que favorece el desmoldeo.

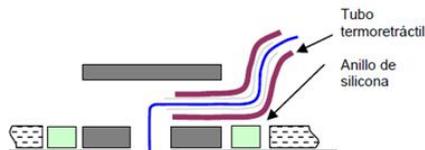


Figura 34. Protección de salida de fibra óptica por superficie [FRO 2006].

El caucho se fija al laminado mediante co-curado. Para mantener la forma del anillo de caucho, y evitar que sea aplastado por la bolsa de vacío, se requiere de un molde. El molde diseñado es de Airpad, que además, impide que los tubos de protección de la fibra se marquen en el laminado. Aunque esta solución proporciona resultados satisfactorios, es un método invasivo que requiere fabricar un molde específico para cada geometría. El tramo de fibra óptica que queda en el exterior se protege mediante un tubo elastomérico combinado con mechas de aramida.

En el proyecto Marco CESAR de la Unión Europea, NLR [BEU 2012] ha elaborado dos técnicas para embeber fibra óptica y eliminar los problemas de salida, tanto durante la fabricación por apilado manual como por la tecnología de *fiber placement*. En el primer caso, la fibra se sitúa tras la fabricación del laminado, evitándose las duras condiciones a las que se somete el material compuesto en el curado. Para ello, se crea en el material compuesto un tubo hueco en cuyo interior se introduce la fibra. Este tubo se rellena con resina tras la introducción de la fibra. Las grandes dimensiones del tubo hueco, comparadas con la fibra óptica, inducen grandes perturbaciones en el laminado (Figura 35 a).

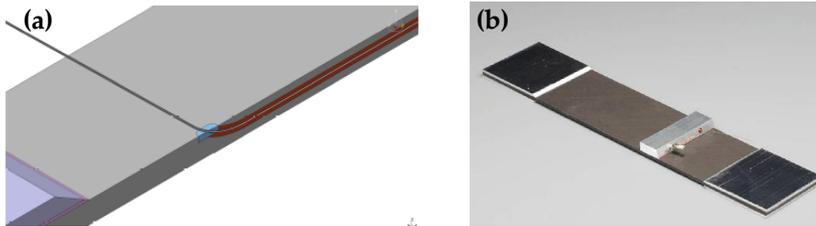


Figura 35. (a) Integración de fibra óptica tras la fabricación del laminado y (b) probeta con conector de superficie y bloque auxiliar para el curado [BEU 2012].

La segunda técnica consiste en el desarrollo de un nuevo concepto de conector, para su adaptación a laminados de material compuesto (Figura 35 b). La fibra permanece completamente embebida, pudiéndose situar el conector en cualquier punto de la superficie. Para evitar deformaciones en el material compuesto, se emplea un útil provisional de curado que sujeta el conector. Este es un bloque de aluminio, el cual es retirado tras la fabricación.

Kinet et al. [KIN 2014] utiliza conectores comerciales para fibra óptica (Figura 36). Esta técnica es robusta y permite el mecanizado del laminado. Sin embargo, su integración es un proceso complejo, en el que se produce una perturbación

significativa en la estructura del compuesto.

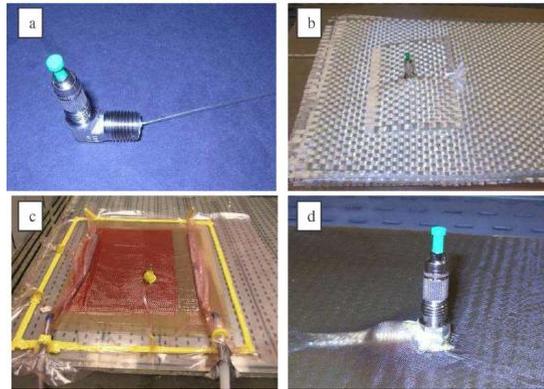


Figura 36. Proceso de integración de conectores de superficie [KIN 2014].

Por último, Green y Shafir [GRE 1999, GRE 2000] también desarrollan un conector para salida por superficie (Figura 37). Para su diseño parten de un conector tipo *backplane*, que proporciona interconexión entre dos tarjetas electrónicas, una situada en el componente y otra en el equipo de medida. La interface empleada es estándar de tipo SC. Los cables de fibra que llegan a la tarjeta situada en la estructura están protegidos por tubos de PTFE. Sobre el conector se sitúa una cubierta de goma para impedir deformaciones del conector durante el curado, así como la entrada de resina en su interior. Además, de esta manera también se minimiza su huella sobre el laminado.

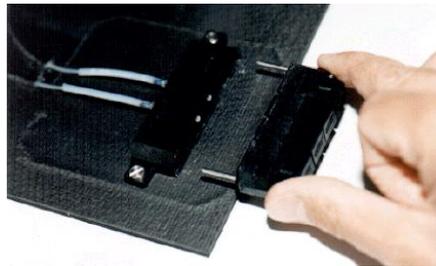


Figura 37. Conector en superficie [GRE 1999].

Aunque son múltiples las soluciones encontradas en la bibliografía, la mayoría de ellas resultan difíciles de incorporar al proceso de fabricación y producen grandes distorsiones geométricas en la estructura de material compuesto, lo cual lleva asociado una reducción de sus prestaciones mecánicas.

3. COMPENSACIÓN Y MEDIDA DE TEMPERATURA

LA longitud de onda característica de los sensores de Bragg se ve afectada tanto por sollicitaciones térmicas como mecánicas. Los estudios de compensación de temperatura tienen como finalidad evaluar las deformaciones de origen térmico, para una correcta medida del estado de deformación del componente en un rango amplio de temperaturas. En esta sección se analiza el comportamiento de las redes de Bragg ante cargas térmicas, clasificándose los estudios realizados en ensayos de medida de temperatura, compensación y ciclado térmico.

3.1. Materiales y métodos experimentales

Previamente a la descripción de los ensayos y resultados se detallan los materiales empleados y el equipamiento necesario.

3.1.1. Materiales

Los ensayos se realizan sobre probetas de material compuesto Z19.732, formado

por fibra de carbono y resina epoxy. La secuencia de apilado es [45,-45,0,90,90,90,90,0,-45,45], presentando cada probeta 10 capas de pre-impregnado unidireccional, con unas dimensiones de 250 x 25 mm².

La integración del sensor de Bragg se efectúa mediante la técnica de encolado, situando el sensor en la parte central de la superficie del espécimen alineado con su dirección longitudinal. Para su fijación a la superficie se emplea el adhesivo Loctite© 401.

3.1.2. Equipamiento

El equipamiento requerido para la ejecución de los ensayos de medida, compensación de temperatura y ciclado térmico se describe a continuación:

- **Interrogador óptico sm130-700**

Para la adquisición y medida con los sensores de Bragg se emplea el interrogador óptico sm130-700 (Figura 38), con el software Micron Optics Enlight Sensing Analysis. Presenta el núcleo interrogador óptico x30 que incorpora un láser de barrido que lo capacita para una amplia adquisición de datos procedentes de múltiples redes de Bragg.



Figura 38. Interrogador óptico sm130-700.

Dispone de cuatro canales ópticos, con un máximo de 80 FBGs por canal. La frecuencia de barrido es de 1 kHz para el rango de longitudes de onda comprendidas entre 1.510 y 1.590 nm.

Los sensores de Bragg utilizados son OS 1100 de Micron Optics, que contienen un único FBG por fibra. Su recubrimiento de poliimida permite un rango de temperaturas de funcionamiento de entre -40 y 120°C. El sensor tiene una longitud de 10 mm, encontrándose su límite de deformación en 5.000 $\mu\epsilon$. El radio de

curvatura mínimo se establece en 17 mm. Los factores de sensibilidad a deformación y temperatura son 1,2 pm/ $\mu\epsilon$ y 9,9 pm/ $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

- **Soldadora de fibra óptica FSM-60S FUJIKURA**

La soldadora de fibra óptica es un dispositivo que permite unir dos cables de fibra óptica independientes, dando como resultado un único cable que posibilita la continuidad de la luz. El equipo empleado es de la marca FUJIKURA modelo FSM-60S. Este realiza una evaluación de las pérdidas debidas a la soldadura e indica el motivo en el caso de no ser posible efectuarla.

Previamente a la soldadura es necesario cortar los extremos de la fibra a soldar. Para ello se utiliza la cortadora de precisión FUJIKURA CT-30A.

- **Horno Protoflow E**

Dicho equipo se ha empleado en los ensayos de medida y compensación de temperatura. Permite introducir perfiles térmicos específicos, con control únicamente sobre las temperaturas y tiempos de estabilización. La temperatura máxima alcanzada es de 320 $^{\circ}\text{C}$, que se puede mantener durante un tiempo de 600 s.

- **Cámara de Ensayos de Vida Acelerada (HALT/HASS)**

Los ensayos de ciclado térmico se han realizado mediante la cámara HALT/HASS, modelo UHS-1400, de Angelantoni. Se trata de un equipo que permite efectuar un control combinado en temperatura, vibración y humedad.

El rango de temperaturas aplicables se encuentra entre -100 y 200 $^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{C}$), con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 60 K/min. El enfriamiento se realiza a través de nitrógeno líquido.

- **Equipo de extensometría**

El registro de temperatura se ha efectuado tanto con redes de Bragg como con termopares, cuya lectura se ha considerado como valor de referencia. El equipo de extensometría MGC Plus es el encargado de recoger y procesar los datos medidos con termopares, así como deformaciones medidas con galgas extensométricas.

3.2. Medida de temperatura

El objetivo de estos ensayos es determinar los factores de conversión que permiten traducir la lectura del sensor de Bragg (es decir, el cambio de longitud de onda reflejada por el sensor) en cambio de temperatura. La medida de temperatura requiere aislar el sensor de las solicitaciones mecánicas, de forma que únicamente se encuentre sometido a cargas térmicas. Para ello debe permitirse la libre dilatación de la fibra óptica, fijándola únicamente por un extremo al componente analizado, tanto en configuración encolada como embebida.

El número total de ensayos ha sido 15. En estos se estabiliza la temperatura al comienzo del ensayo a 50°C, durante un tiempo de 10 minutos. Tras finalizar este periodo, la temperatura se eleva hasta llegar a un determinado valor máximo, en el que mantiene durante otros 10 minutos. Concluida esta fase se permite el enfriamiento hasta los 50°C, donde se inicia una última estabilización también de 10 minutos de duración (Figura 39). De esta forma, se consideran los 50°C como temperatura de referencia para definir los incrementos. Los valores máximos alcanzados son de 100, 105 y 110°C.

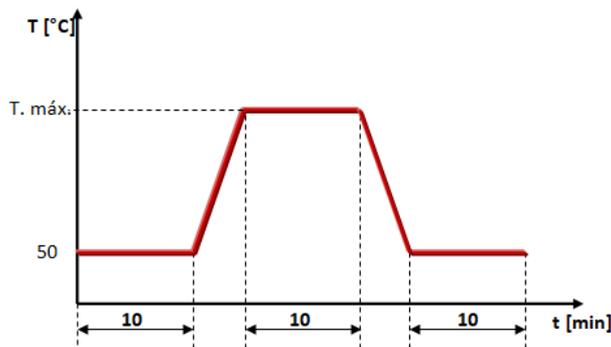


Figura 39. Perfil de temperatura aplicado durante los ensayos de medida de temperatura.

En este proceso, los parámetros controlables son la temperatura y los tiempos de estabilización, no pudiéndose gobernar las rampas de calentamiento o enfriamiento.

Durante los ensayos, el cambio de temperatura se registra tanto por un sensor de Bragg como por un termopar tipo T, cuya medida será considerada como

referencia. Para la realización de las pruebas, ambos elementos de medida se introducen en el horno Protoflow E, lo más próximos entre sí posibles y fijados a la superficie de la probeta solo por uno de sus extremos, de forma que se permita su libre expansión tan solo ocasionada por el cambio térmico.

El cálculo de temperatura puede realizarse por diversos procedimientos:

1.- Método directo: el cambio de longitud de onda medida por el sensor de Bragg se relaciona con el incremento de temperatura a través de la expresión:

$$\Delta\lambda_B = K_T \Delta T \quad (3.1)$$

Donde,

$\Delta\lambda_B$: Variación de la longitud de onda del sensor de Bragg [nm].

K_T : Sensibilidad del FBG frente a la variación de temperatura, dada por el fabricante del sensor en las especificaciones técnicas [nm/°C].

ΔT : Incremento de temperatura del ensayo [°C].

2.- Método indirecto o teórico: el cambio de temperatura se obtiene a través de la ecuación (3. 2), la cual se deduce de la expresión teórica del funcionamiento del sensor de Bragg (ecuación 2.6). En esta, dado que el sensor sólo se encuentra sometido a solicitaciones térmicas ($\Delta\varepsilon=0$) puede despejarse el incremento de temperatura:

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha_{glass} + \alpha_\delta} \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right) \quad (3.2)$$

siendo

ΔT : Incremento de temperatura del ensayo [°C].

$\Delta\lambda_B$: Variación de la longitud de onda del sensor de Bragg [nm].

λ_B : Longitud de onda de referencia del sensor de Bragg [nm].

α_{glass} : Coeficiente de dilatación de la fibra óptica [1/°C].

α_δ : Cambio en el índice de refracción medio (o efectivo) con la temperatura [1/°C].

Adicionalmente a los dos procedimientos anteriores, se proponen otros métodos para el cálculo del cambio de temperatura:

3.- Método de ajuste proporcional experimental: este tercer procedimiento trata de determinar una nueva constante de proporcionalidad que muestre una mejor correlación entre ambos dispositivos de medida de temperatura. La sensibilidad del FBG a temperatura en la ecuación (3. 1) es una aproximación dada por el fabricante del mismo. Para la determinación de la nueva constante, el procedimiento seguido ha sido minimizar el área comprendida entre la respuesta medida por el termopar y el registro del sensor FBG.

$$\text{Área} = \int_{t=0}^{t=t_f} [\Delta T_{\text{termopar}}(t) - \Delta T_{\text{FBG}}(t, \alpha)] dt \quad (3.3)$$

Siendo

$$\Delta T_{\text{FBG}} = \alpha \cdot \Delta \lambda_{\text{FBG}} \quad (3.4)$$

El objetivo es encontrar un valor de α tal que el área existente entre ambas curvas se anule (o minimice). Para la determinación de dicha constante se emplea el método de Newton-Raphson.

4.- Métodos de ajuste lineal experimental: se ajusta la distribución del incremento de temperatura frente al incremento de longitud de onda a través de una recta de la forma:

$$\Delta T = A * \Delta \lambda + B \quad (3.5)$$

Con A y B constantes a determinar experimentalmente. En este método se comparan las medidas del termopar (cambio de temperatura) y del sensor de Bragg (cambio de longitud de onda), realizándose el ajuste lineal entre las dos variables mediante mínimos cuadrados.

5.- Métodos de ajuste experimental de mayor orden: por último, se proponen realizar ajustes de mayor orden (2º, 3º, 4º, etc.) entre las medidas del sensor de Bragg y del termopar de referencia, para determinar cuál de las aproximaciones proporciona un mejor resultado. A modo de ejemplo se muestra la ecuación para el ajuste cuadrático:

$$\Delta T = A * \Delta \lambda_{comp}^2 + B * \Delta \lambda_{comp} + C \quad (3.6)$$

Siendo A, B y C las constantes a determinar.

Para cada método de medida de temperatura se determinará el error relativo medio (3.7) cometido durante el ensayo, comparando la aproximación obtenida con la lectura del termopar. Así se discrimina cuál es el mejor de los métodos aplicados:

$$\bar{e}_R = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{|T_{sensor}(i) - T_{termopar}(i)|}{|T_{termopar}(i)|}}{N} \cdot 100 \quad (3.7)$$

con,

\bar{e}_R : Error relativo medio [%].

N: Número de medidas totales realizadas durante el ensayo.

Además se representa el error absoluto de cada aproximación frente al tiempo, identificando el error de cada fase del ensayo.

3.2.1. Resultados

A modo de ejemplo representativo, se muestran los resultados obtenidos con los distintos procedimientos de estimación de temperatura y su comparación con la medida registrada por el termopar de referencia para uno de los ensayos efectuados a 110°C. Para el resto de casos el comportamiento registrado es análogo (Anexo A "Compensación y Medida de Temperatura: Medida de temperatura").

En la Figura 40 se presentan los resultados de las aproximaciones de temperatura para el ensayo N° 11. Un detalle de la etapa a 110°C se muestra en la Figura 41, que permite distinguir los comportamientos seguidos por los procedimientos lineal, cuadrático, proporcional e indirecto. El análisis de estos resultados demuestra que son los métodos de ajuste proporcional e indirecto los que realizan un mejor seguimiento de la medida del termopar durante las tres fases del ensayo, siendo las dos estimaciones prácticamente coincidentes. El método directo es el que mayores diferencias presenta respecto al termopar, en especial en el periodo a 110°C, donde realiza una sobreestimación de la temperatura aplicada. El comportamiento

registrado por el termopar demuestra que la temperatura alcanzada en el horno no se mantiene constante durante la totalidad de la prueba, sino que oscila alrededor del valor fijado como objetivo ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$). Este comportamiento es seguido por el sensor de Bragg.

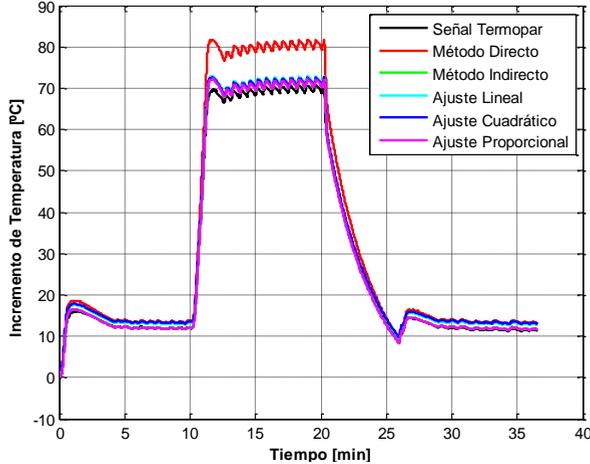


Figura 40. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N^o 11 $T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

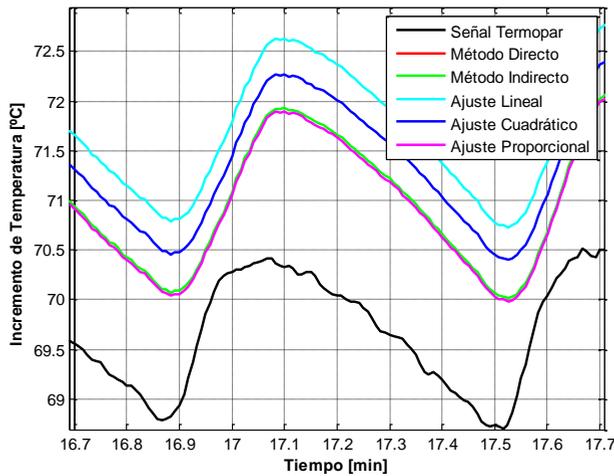


Figura 41. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N^o 11 $T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

El error absoluto cometido por cada aproximación se muestra en la Figura 42. Se comprueba que el ajuste proporcional junto con el método indirecto (cuya representación queda oculta en la por la del ajuste proporcional) son los que menor error presentan en todas las fases del ensayo, siendo la discrepancia máxima con el termopar de 1,5°C en el periodo a 110°C y prácticamente nula en las estabilizaciones a 50°C. Estas diferencias ascienden hasta los 10°C en el método directo. En todos los casos las mayores diferencias se producen en los puntos en los que hay un cambio de tendencia de la temperatura, esto es, en las transiciones entre las fases de estabilización y de aumento o disminución de temperatura. Parte de estos errores puede deberse a la diferencia de inercia térmica entre termopares y los sensores de fibra óptica.

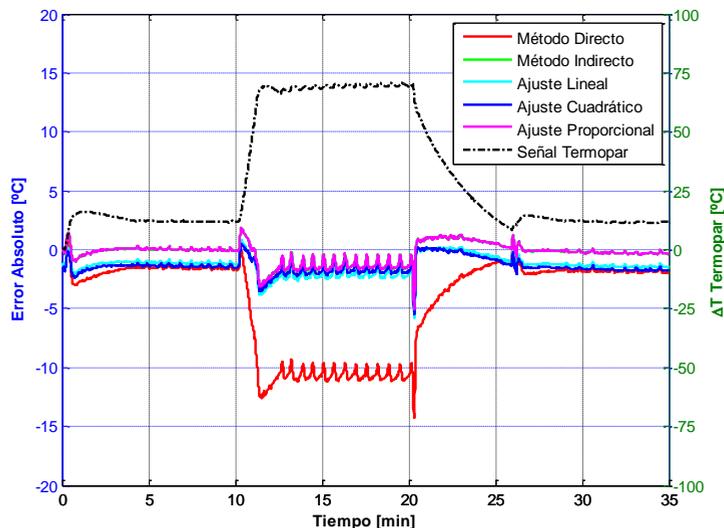


Figura 42. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 11 $T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

Resultados similares a los anteriores se han obtenido en el resto de ensayos efectuados. En el Anexo A "Compensación y Medida de Temperatura: Medida de temperatura" se presentan las Tabla 35- Tabla 37 con los errores relativos medios de cada método en los 15 ensayos realizados, organizados según la temperatura máxima alcanzada. En general, el ajuste proporcional experimental y el método indirecto son los que menores errores cometen (6,7 y 6,8%, respectivamente). En la mayoría de los casos el directo estima una temperatura superior a la real en el tramo a máxima temperatura, mostrando una mejor respuesta en las

estabilizaciones a 50°C. En el caso de los ajustes lineal y cuadrático suele detectarse el comportamiento opuesto (mejor aproximación a alta temperatura y mayor error en los periodos a 50°C).

De los 15 ensayos efectuados, únicamente en uno de los ensayos (Nº5) el método directo, con el factor de sensibilidad aportado por el fabricante del sensor, muestra una mejor respuesta que el resto de los procedimientos.

Para los ajustes de mayor orden no se muestran los resultados obtenidos dado que en ningún caso mejoran las estimaciones calculadas con los métodos anteriores.

A partir de estos datos, se seleccionan el ajuste proporcional experimental y el método indirecto como procedimientos para estimar la temperatura en los ensayos de compensación. Dado que los resultados obtenidos con los dos procedimientos no muestran diferencias entre sí, bastaría con aplicar uno de ellos, siendo indiferente cuál sea el seleccionado. Sin embargo, el método indirecto requiere conocer determinadas características físicas de la fibra óptica, como son el coeficiente de dilatación (α_{glass}) y el cambio del índice de refracción medio con la temperatura (α_δ), valores que no siempre son conocidos. Como alternativa a los casos en los que no se disponga de estas constantes el ajuste proporcional permite el cálculo del ΔT . En este último, el factor de conversión obtenido que transforma el cambio de longitud de onda en incremento de temperatura es $\alpha=89,27^\circ\text{C}/\text{nm}$.

3.3. Compensación de temperatura

La medida simultánea de deformación e incremento de temperatura con FBGs requiere disponer al menos de dos sensores diferentes. Conocido el cambio de temperatura, la deformación experimentada por un componente se obtiene a través de la ecuación 2.6. Despejando $\Delta\varepsilon_{estructura}$ se alcanza la siguiente ecuación:

$$\Delta\varepsilon_{estructura} = \left(\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right) \frac{1}{K_\varepsilon} - \frac{(\alpha_\delta + \alpha_{glass})\Delta T}{K_\varepsilon} \quad (3.8)$$

donde,

$\Delta\varepsilon_{estructura}$: Deformación experimentada por el componente [$\mu\varepsilon$].

$\Delta\lambda_B$: Cambio de longitud de onda del sensor de deformación [nm].

λ_B : Longitud de onda inicial reflejada por el sensor de deformación [nm].

K_ε : Factor de conversión del sensor de Bragg que relaciona el cambio de longitud de onda medido por el sensor con el incremento de deformación experimentado por la estructura [nm/ $\mu\varepsilon$].

α_{glass} : Coeficiente de dilatación de la fibra óptica [1/ $^\circ\text{C}$].

α_s : Cambio en el índice de refracción medio con la temperatura [1/ $^\circ\text{C}$].

ΔT : Incremento de temperatura experimentado por el componente ensayado. Dicho incremento es el registrado por el sensor de compensación y se calcula a través de los procedimientos anteriormente descritos.

Se propone un segundo procedimiento más sencillo para el cálculo de las deformaciones, denominado método simplificado. En este caso, la configuración de sensores es análoga a la anterior, aunque no es necesario conocer el incremento de temperatura aplicado. El cálculo de las deformaciones por este segundo método se efectúa a través de la ecuación:

$$\Delta\varepsilon_{\text{estructura}} = \frac{\Delta\lambda_{Bdef} - \Delta\lambda_{Bcom}}{K_\varepsilon} \quad (3.9)$$

Siendo

$\Delta\varepsilon_{\text{estructura}}$: Deformación experimentada por el componente [$\mu\varepsilon$].

$\Delta\lambda_{Bdef}$: Cambio de longitud de onda del sensor de Bragg destinado a la medida de deformación [nm].

$\Delta\lambda_{Bcom}$: Cambio de longitud de onda del sensor de Bragg destinado a la medida del incremento de temperatura, denominado sensor de compensación [nm].

K_ε : Factor de conversión del sensor de Bragg que relaciona el cambio de longitud de onda medido por el sensor con la deformación experimentada por la estructura [nm/ $\mu\varepsilon$].

Dado que se disponen de dos sensores, uno para el registro de la temperatura (y aislado de deformaciones mecánicas del componente) y otro para la medida de las deformaciones, cada uno presentará un incremento de longitud de onda diferente. Calculando la diferencia entre ambos cambios de longitud de onda y dividiendo

por el factor de conversión del sensor se obtienen las deformaciones experimentadas por el componente analizado.

Los ensayos de compensación se han realizado sobre dos probetas, denominadas CT-01 y CT-02, respectivamente. Las pruebas se efectuaron de forma simultánea sobre ambas, aplicando perfiles térmicos análogos a los considerados en los ensayos de medida de temperatura (Figura 39) con máximos de 100, 105 y 110°C. Cada probeta presenta una red de Bragg encolada, paralela a su dirección longitudinal y centrada en la superficie de la misma. Para la determinación del incremento de temperatura se ha utilizado un único sensor de Bragg adicional para las dos probetas, el cual se situó sobre la superficie del espécimen CT-01, únicamente fijado por uno de sus extremos y permitiendo su libre expansión térmica. Para disponer de un valor de referencia de la temperatura, en paralelo al FBG se colocó un termopar tipo T. Con cada probeta se han realizado un total de nueve ensayos.

3.3.1. Resultados

De forma análoga a los ensayos de medida de temperatura, a modo de ejemplo únicamente se presentan los resultados de la prueba realizada hasta 110°C (incremento de temperatura de 60°C) con la probeta CT-01. El resto de resultados se muestran en tablas resumen y en las figuras incluidas en el Anexo A "Compensación y Medida de Temperatura: Compensación de temperatura".

- **Probeta CT-01**

Los resultados extraídos se muestran en las Figura 43-Figura 46. El cambio de longitud de onda experimentado tanto por el sensor de temperatura (sensor no adherido) como por el sensor de deformación (sensor encolado) se representa en la Figura 43. Se distingue la menor variación registrada en el sensor de compensación, cuyo $\Delta\lambda_{\text{máx}}$ es 0,3 nm inferior al del FBG de deformación durante la etapa a 110°C.

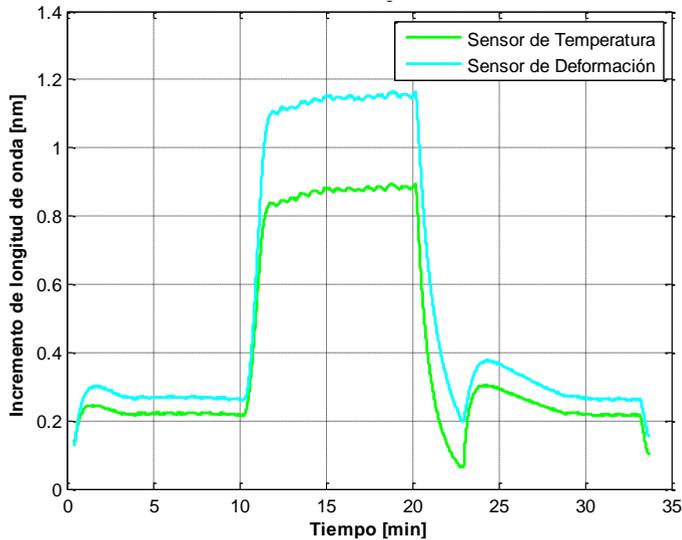


Figura 43. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 7, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

Partiendo de la lectura del sensor de compensación se calcula el incremento de temperatura mediante la aplicación del método indirecto y el ajuste proporcional experimental (Figura 44). Comparando con la medida del termopar, se aprecia una buena correlación en las estabilizaciones a 50°C , incluso en la tercera fase, donde se vuelve a producir un leve incremento térmico, previo a alcanzar la temperatura fijada (dado el acusado descenso de temperatura apreciado al final del enfriamiento, es necesario volver a elevar la temperatura para lograr la estabilización a la temperatura deseada). A través del registro del termopar se verifica que en la etapa a 110°C , la temperatura no se mantiene constante, sino que se va incrementando levemente durante los 10 minutos de duración de dicha fase y oscilando alrededor del valor establecido. En esta (en valor medio) la estimación proporcionada por el FBG es unos $2,8^{\circ}\text{C}$ inferior a la medida de referencia.

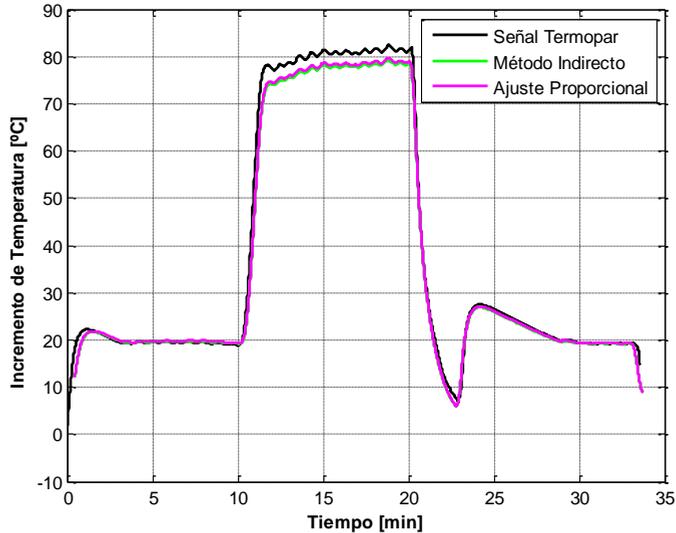


Figura 44. Medida de temperatura en el ensayo N^o 7, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

En la Figura 45 se presentan las deformaciones, medidas tanto por el procedimiento simplificado como por los métodos proporcional e indirecto (en los dos últimos se ha aplicado la ecuación (3. 8) con las estimaciones de temperatura anteriores). Durante las tres fases del ensayo se aprecian resultados análogos independientemente del procedimiento empleado para su cálculo. En la etapa a 110°C el ajuste proporcional aporta una medida ligeramente inferior a las obtenidas mediante los otros dos métodos (Figura 46). Al inicio de la fase de descenso se registra un pico de incremento de deformación, como consecuencia de la lectura del sensor de compensación.

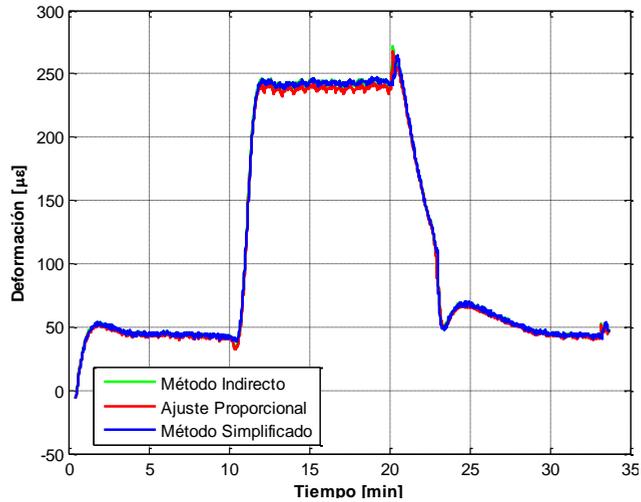


Figura 45. Medida de deformación durante el ensayo N° 7, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

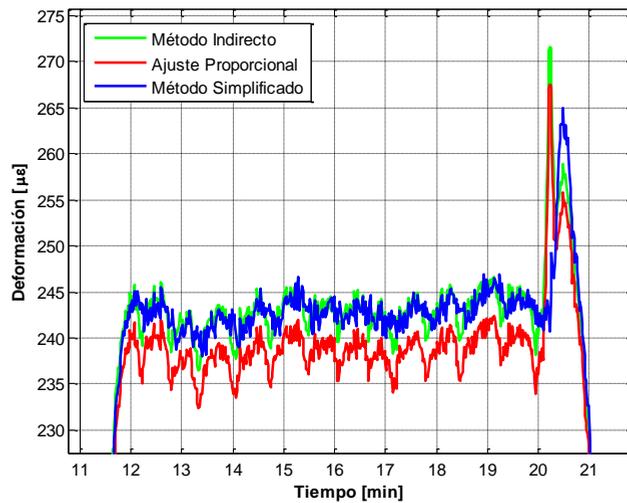


Figura 46. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 7, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

En las Tabla 3 - Tabla 5 se presentan los datos de los nueve ensayos realizados para los tres incrementos de temperatura, organizados según ΔT máximo. El incremento de deformación máxima se determina como la diferencia entre las deformaciones en la estabilización a $T_{\text{máx.}}$ y la primera fase a 50°C . De este modo se logra independizar dicho valor de la temperatura de inicio del ensayo. Además, se calculan las diferencias entre las deformaciones registradas en las dos etapas a 50°C , debiendo ser dicho valor prácticamente nulo, puesto que la temperatura en los dos casos es la misma y no existen solicitaciones externas adicionales sobre las probetas. Las medidas incluidas en las tablas se corresponden con el valor en el que se alcanza la estabilidad de la lectura del sensor, o en el caso que dicha estabilidad no se produzca, con el valor medio de las deformaciones durante ese periodo.

El análisis de los datos muestra valores similares entre los ensayos para los tres procedimientos aplicados (Tabla 3), siendo las diferencias entre las medidas de la primera y tercera estabilización despreciables.

Tabla 3. Resultados de los ensayos N^o 1, 2 y 3, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).

P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 100°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
1	162	165	165	2	2	2
2	150	155	155	0	0	0
3	168	170	170	3	3	3

Evaluando los ensayos efectuados con un $\Delta T=55^{\circ}\text{C}$ se demuestra que la medida calculada con el método proporcional es siempre ligeramente inferior a la del resto de procedimientos. Los máximos de los tres ensayos son similares entre sí, siendo la máxima diferencia entre ellos del 8,3% (entre las pruebas N^o 4 y 5).

Tabla 4. Resultados de los ensayos N° 4, 5 y 6, Probeta CT-01 (T_{máx.}=105°C).
P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 105°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
CT-01	P	I	S	P	I	S
4	181	185	185	13	14	14
5	166	168	168	0	0	0
6	178	180	180	0	0	0

La repetibilidad de los resultados para las pruebas hasta 110°C se verifica mediante el análisis de los datos de la Tabla 5, siendo análogos los valores máximos en los ensayos N° 7, 8 y 9. En los tres casos, las diferencias entre las deformaciones registradas en las dos estabilizaciones a 50°C son despreciables. El método de ajuste proporcional continúa siendo el que estima los menores incrementos de deformación.

Tabla 5. Resultados de los ensayos N° 7, 8 y 9, Probeta CT-01 (T_{máx.}=110°C).
P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 110°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
CT-01	P	I	S	P	I	S
7	195	199	199	0	0	0
8	195	200	200	2	2	2
9	200	205	205	2	2	2

En todos los ensayos se comprueba que las deformaciones medidas por los tres métodos son prácticamente idénticas, siendo iguales los datos obtenidos con el indirecto y el simplificado y ligeramente inferiores con el proporcional. Dicha diferencia no supera el 3,5% en ninguno de los casos.

- **Probeta CT-02**

Los resultados obtenidos con la segunda probeta se presentan en el Anexo A

"Compensación y Medida de Temperatura: Compensación de temperatura" y en la Tabla 6. Su análisis revela el mismo patrón previamente detectado para la probeta CT-01, garantizándose la repetibilidad entre los ensayos.

Tabla 6. Resultados de los ensayos N^o 1, 2 y 3, Probeta CT-02 (T_{máx.}=100°C).
P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 100°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
CT-02						
1	139	142	142	1	1	1
2	134	135	135	1	1	1
3	140	144	144	2	3	3

En la Tabla 7 se presentan los resultados para los ensayos con $\Delta T=55^\circ\text{C}$, donde las discrepancias en las medidas se encuentran en torno al 3% para los tres ensayos.

Tabla 7. Resultados de los ensayos N^o 4, 5 y 6, Probeta CT-02 (T_{máx.}=105°C).
P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 105°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
CT-02						
4	159	164	164	10	11	11
5	150	154	154	1	1	1
6	149	153	153	4	5	5

El resto de ensayos (Tabla 8) muestran resultados análogos, tanto en el incremento de deformación máximo como en las diferencias entre los dos métodos de cálculo aplicados (2,9%).

Tabla 8. Resultados de los ensayos N° 7, 8 y 9, Probeta CT-02 (T_{máx.} =110°C).
P: Proporcional, I: Indirecto, S: Simplificado

Ensayos 110°C	Incremento de deformación máximo [$\mu\epsilon$]			Diferencia de deformación entre la primera y la tercera estabilización [$\mu\epsilon$]		
	P	I	S	P	I	S
CT-02						
7	166	170	170	0	0	0
8	166	170	170	4	4	4
9	166	171	171	1	1	1

3.4. Ciclado térmico

Estos ensayos tienen como objetivo analizar el comportamiento de los sensores de Bragg ante sollicitaciones térmicas dinámicas en un rango amplio de temperaturas. Adicionalmente, dado que la calidad de la medida del sensor FBG depende del estado de la unión adhesiva fibra óptica-probeta, se estudiará el efecto que el ciclado térmico produce sobre la aparición de daños o deterioros en dicha unión.

Los ensayos se realizan sobre dos probetas instrumentadas con un sensor de Bragg encolado en la superficie del elemento en dirección longitudinal. Para el análisis de las deformaciones es necesario realizar la compensación de temperatura de los FBGs. Por ello, se emplearon dos sensores adicionales situados junto a las redes de Bragg encoladas, a los que se les permite su libre expansión térmica.

La carga cíclica se efectúa entre -50 y 160°C ($\pm 4^\circ\text{C}$), con rampas de ascenso y descenso de 15°C/min. Ambos valores exceden el rango de operación en temperatura del sensor, establecido por el fabricante entre -40 y 120°C. El ciclado se divide en dos partes, una en la que se aplican 5 ciclos y otra con 15 ciclos. Para comprobar la medida estimada por los FBG de compensación, durante los primeros 5 ciclos se emplearon termopares tipo T, considerados como referencia.

Previa y posteriormente a la etapa del ciclado térmico se han realizado ensayos de tracción hasta el 25% de la carga de rotura del material, registrándose la medida del FBG (siendo la carga de rotura de 23,7 kN, determinada de forma experimental a través de ensayos de tracción hasta rotura de cinco probetas). Este valor de la carga

ha sido seleccionado para evitar producir daños en la estructura del material compuesto. La carga cíclica aplicada también puede ocasionar deterioros sobre la misma. Los posibles cambios detectados entre los ensayos de tracción pueden estar originados bien por una disminución de las propiedades de la unión adhesiva o en el material compuesto en sí. Para eliminar esta incertidumbre, además de registrar las deformaciones con los FBGs, durante las pruebas de tracción se empleará un extensómetro. De esta forma, aunque haya degradación de las propiedades del material compuesto, si las lecturas de los dos sistemas son análogas no se habrá producido deterioro de la unión encolada.

La carga máxima aplicada es de 6 kN, efectuando el control del ensayo en posición con una velocidad de desplazamiento constante de 0,2 mm/min.

3.4.1. Resultados

Puesto que no se han registrado diferencias entre los comportamientos de ambas probetas, se presentan de forma detallada los resultados de los ensayos sobre el elemento FT-01, mostrándose las respuestas asociadas a FT-02 en el Anexo A "Compensación y Medida de temperatura: Ciclado térmico".

- **Probeta FT-01**

El ensayo de tracción realizado previo al ciclado térmico de la probeta FT-01 se muestra en la Figura 47. Para la máxima carga aplicada, existe una diferencia entre las lecturas de ambos dispositivos de $43 \mu\epsilon$, lo cual supone un valor un 1,4% superior en el caso del extensómetro. Estas diferencias tienen su origen en una ligera falta de alineación entre los dos dispositivos de medida.

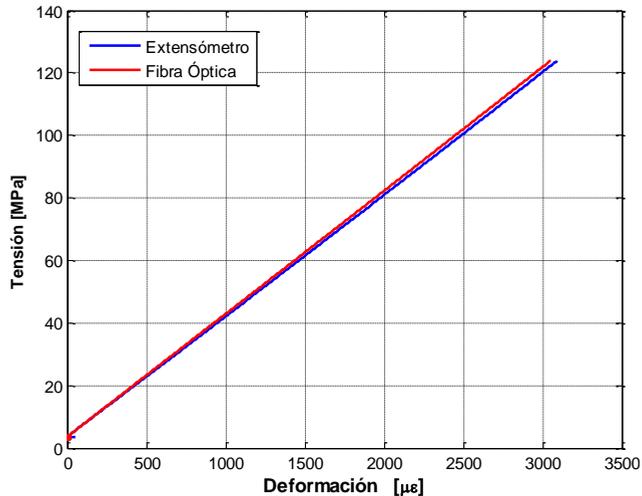


Figura 47. Resultados del ensayo de tracción previo al ciclado térmico de la probeta FT-01.

La medida del incremento de temperatura durante el ciclado térmico se muestra en las Figura 48 y Figura 49. En la primera se presentan los 5 ciclos iniciales, en los cuales junto al FBG de compensación se situó un termopar considerado como referencia. El perfil térmico aplicado puede apreciarse a través de la lectura del termopar, donde se comprueba que el incremento de temperatura registrado en la probeta no alcanza los 210°C establecidos (calculado como la diferencia entre $T_{\text{máx.}}$ - $T_{\text{mín.}}$ del ensayo), quedándose en 160°C (valor obtenido con el termopar), a consecuencia de la ubicación de las probetas en la cámara de ensayos. El incremento de temperatura se ha calculado mediante las redes de Bragg aplicando los procedimientos proporcional e indirecto. Los valores estimados en ambos casos son prácticamente coincidentes, salvo en los extremos donde las medidas del método indirecto son superiores (2,9°C para $\Delta T_{\text{máx.}}$ y 1,57°C para $\Delta T_{\text{mín.}}$, Figura 49). Estas estimaciones presentan un buen ajuste a la lectura del termopar durante las fases de ascenso y descenso y a temperatura máxima (punto en el que se supera el límite superior de operación del sensor). Las mayores diferencias se detectan en el extremo inferior del ciclo, siendo la medida del termopar de -53,4°C y la del sensor de -62°C. Dicha temperatura mínima (-50°C) excede el rango de operación del FBG. Durante el ciclado, la temperatura máxima se alcanza de forma puntual mientras que en el extremo inferior se realiza una estabilización de 15 min, para garantizar que se consigue el valor deseado.

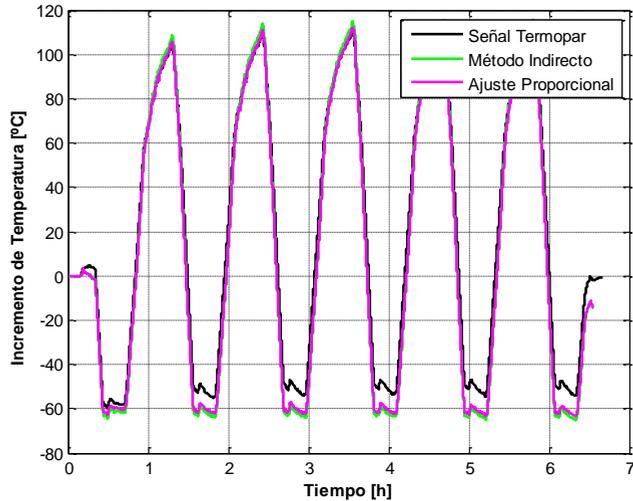


Figura 48. Medida del incremento de temperatura durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).

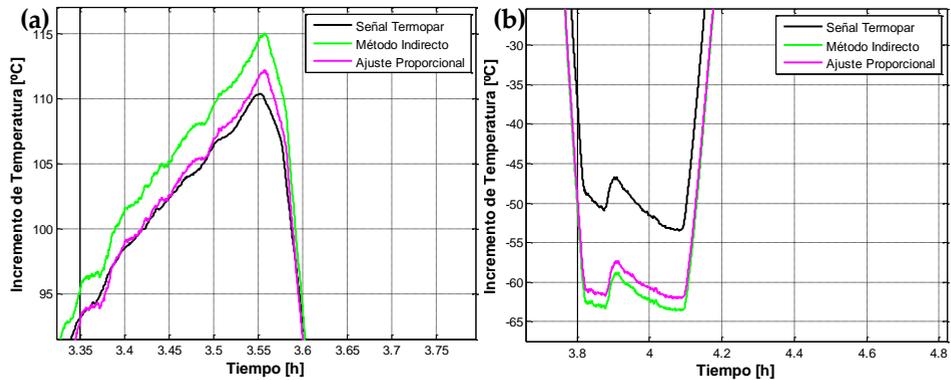


Figura 49. Detalle de la medida del incremento de temperatura en el ciclo N°3: (a) alta temperatura y (b) baja temperatura (Probeta FT-01).

Resultados análogos se obtienen en la Figura 50, aunque en esta no se dispone de la lectura del termopar. En ambas se verifica que el incremento de temperatura registrado con el FBG se mantiene constante en todos los ciclos aplicados (en torno a los 176°C , $T_{\text{máx.}}-T_{\text{mín.}}$).

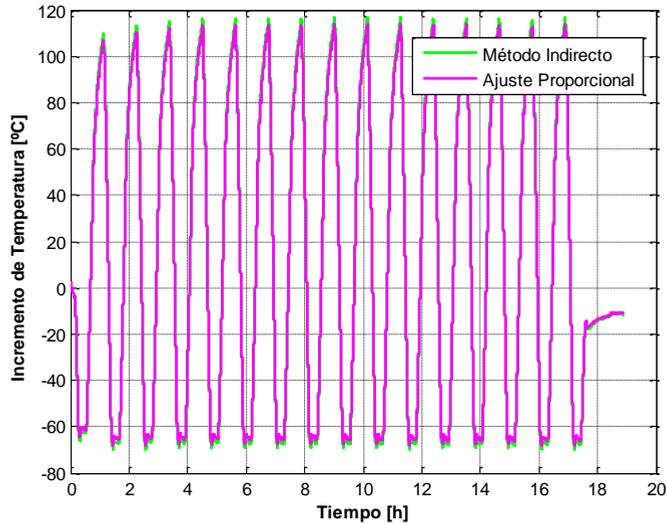


Figura 50. Medida del incremento temperatura durante la aplicación de los ciclos N° 6-20 (Probeta FT-01).

Conocido el incremento de temperatura se determinan las deformaciones experimentadas por las probetas como consecuencia de las sollicitaciones térmicas inducidas. A través de las Figura 51 - Figura 53 se verifica que la red de Bragg encolada logra captar la carga térmica aplicada. Los tres procedimientos empleados para la medida de las deformaciones presentan valores similares entre sí, estando superpuestas las respuestas de los procedimientos simplificado e indirecto. En las temperaturas extremas es donde se registran las mayores diferencias, siendo el valor estimado con el ajuste proporcional un 5,8% inferior al obtenido con los otros dos procedimientos.

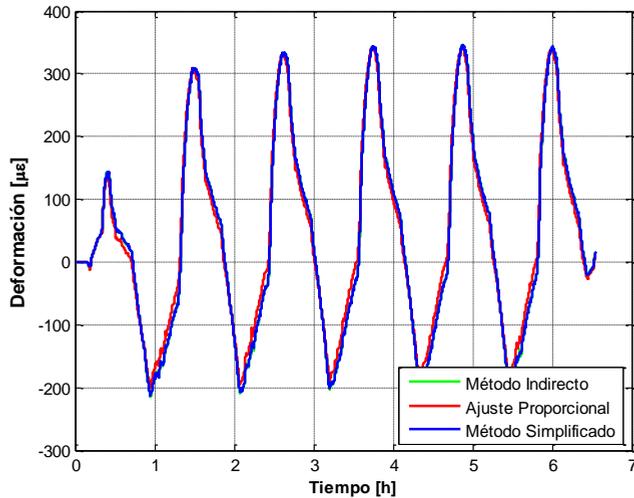


Figura 51. Deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).

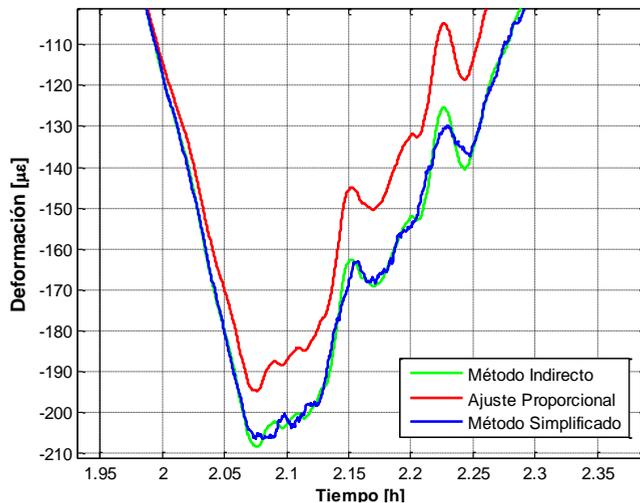


Figura 52. Detalle de las deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-01).

Resultados análogos se obtienen entre los ciclos N^o 6 y 20 (Figura 53). El incremento de deformación entre las temperaturas extremas se mantiene aproximadamente

constante durante los 20 ciclos aplicados ($535 \mu\epsilon$).

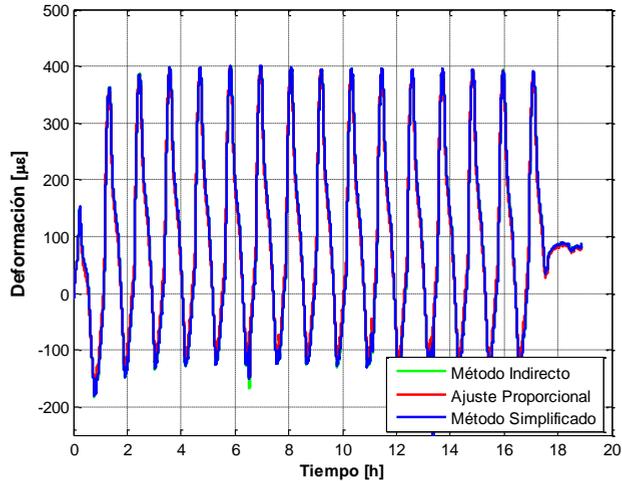


Figura 53. Deformaciones medidas durante la aplicación de los ciclos N^o 6-20 (Probeta FT-01).

Finalizado el ciclado térmico se repite el ensayo de tracción (Figura 54). En este se han incrementado las diferencias entre el sensor de Bragg y el extensómetro, representando en este caso un 3%. La lectura del extensómetro continúa siendo superior a la del FBG.

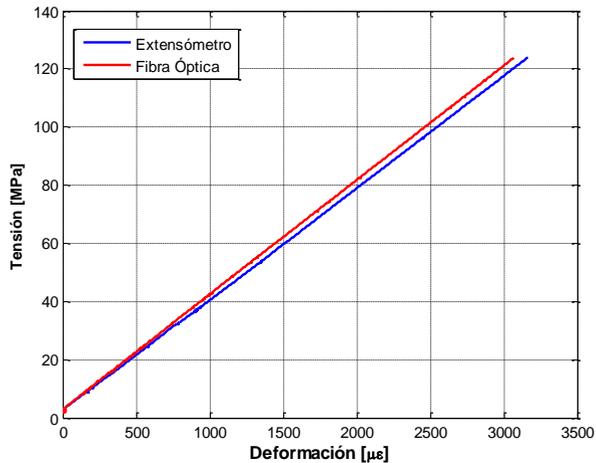


Figura 54. Resultados del ensayo de tracción tras 20 ciclos térmicos (probeta FT-01).

Para determinar si se ha producido degradación en la probeta o en la interfase del adhesivo se calcula el módulo de Young en los dos ensayos de tracción (Tabla 9). Este cálculo se realiza aplicando la norma ASTM-D3039 *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. En el caso del extensómetro se aprecia una disminución del módulo de Young de 1 GPa, entre los ensayos de tracción. Esta reducción no se detecta con el sensor de fibra óptica, estando ocasionada en el extensómetro por la propia incertidumbre del dispositivo de medida.

Tabla 9. Módulos de Young calculados en los ensayos de tracción mediante extensómetro y red de Bragg (FT-01).

Ensayo	Módulo de Young [GPa]	
	Extensómetro	Red de Bragg
Pre-ciclado	39,64	39,49
Post-ciclado (20 ciclos)	38,61	39,34

- **Probeta FT-02**

El análisis de la probeta FT-02 se ha efectuado siguiendo el procedimiento establecido en la probeta anterior. Evaluando los módulos de Young obtenidos previa y posteriormente de la aplicación de la carga térmica (Tabla 10) no se registran diferencias significativas que reflejen una alteración de las propiedades mecánicas de la probeta o de la unión adhesiva.

Tabla 10. Módulos de Young calculados en los ensayos de tracción mediante extensómetro y red de Bragg (FT-02).

Ensayo	Módulo de Young [GPa]	
	Extensómetro	Red de Bragg
Pre-ciclado	39,22	40,3
Post-ciclado (20 ciclos)	39	39,7

Los resultados extraídos de los ensayos térmicos dinámicos revelan que ni las probetas ensayadas ni la unión adhesiva probeta-fibra óptica se ven afectadas por la sollicitación térmica cíclica.

3.5. Discusión

Los resultados presentados demuestran la viabilidad del empleo de redes de Bragg para registrar solicitaciones térmicas, pudiéndose cuantificar su efecto y aislar su influencia sobre el sensor mediante las técnicas de compensación de temperatura. Asimismo, se verifica la capacidad de los FBGs para la medida de cargas térmicas dinámicas, presentando una rápida respuesta frente al aumento o descenso de temperatura.

Para la caracterización del comportamiento de los sensores de Bragg ante solicitaciones térmicas se han realizado ensayos, en los que se ha sometido al sensor a diferentes incrementos de temperatura comparando su lectura con la de un termopar de referencia. Su objetivo ha sido determinar el factor de conversión que permite relacionar el incremento de temperatura aplicado con el cambio de longitud de onda producido en el sensor. Aunque el fabricante de la red de Bragg proporciona un factor de sensibilidad a temperatura, son numerosos los autores que realizan una calibración experimental, obteniéndose como resultado factores diferentes a los originales y con menor error respecto a las medidas consideradas como referencia. Para el cálculo de este factor de conversión se han planteado cinco procedimientos: (i) Método directo, que utiliza el valor dado por el fabricante, (ii) Método indirecto, que emplea la ecuación que describe el comportamiento del sensor, (iii) Método de ajuste proporcional, donde la constante de conversión se obtiene mediante la aplicación del método de Newton-Raphson entre los registros de los dos dispositivos de medida, (iv) Método de ajuste lineal, que realiza una correlación lineal entre la medida del FBG y el termopar (procedimiento análogo al empleado por Barrera en [BAR 2008] y Werneck en [WER 2013]) y (v) Método de ajuste de mayor orden, similar al anterior pero aumentando el grado del polinomio de ajuste. Este último procedimiento es el seguido por Luyckx [LUY 2010], Sorensen [SOR 2006] y por el fabricante de sensores de Bragg HBM FiberSensing [HBM 2017], donde se relaciona el cambio de temperatura con el de longitud de onda a través de un ajuste cuadrático.

A pesar de que el fabricante del sensor establece un factor de sensibilidad, el análisis de los datos pone de manifiesto significativas diferencias entre la temperatura estimada con este procedimiento y el termopar de referencia, en especial en los periodos de alta temperatura donde el error relativo medio alcanza el 20%. Esta sobreestimación de la temperatura conlleva a medidas erróneas de la

deformación al aplicar las técnicas de compensación, obteniéndose valores de deformación inferiores a los reales y pudiendo comprometer la seguridad de la estructura.

El resto de procedimientos presentan respuestas muy similares entre sí, siendo los métodos indirecto y de ajuste proporcional los que menores errores cometen respecto a la lectura del termopar, observándose una buena correlación en todas las fases del ensayo, tanto a alta como a baja temperatura. Las diferencias más importantes se registran en los puntos de cambio de tendencia.

Entre los dos métodos no se detectan diferencias en el comportamiento ni en el error cometido, siendo análogos en todos los ensayos. El empleo del método indirecto elimina la incertidumbre asociada al uso de un factor de conversión calculado de forma experimental. No obstante, requiere conocer parámetros característicos de la fibra óptica, como el coeficiente de dilatación (α_{glass}) y el cambio en el índice de refracción medio con la temperatura (α_{s}), valores que no siempre están disponibles. El método de ajuste proporcional representa una alternativa en esos casos, empleando el factor de conversión $\alpha=89,27^{\circ}\text{C}/\text{nm}$.

Los errores relativos medios (considerando el total de los 15 ensayos) de los procedimientos indirecto y proporcional son 12,9% y 13,24%, respectivamente. En el cálculo del error, el registro del termopar ha sido considerado como referencia. No obstante, las discrepancias entre la lectura de los dos dispositivos de medida pueden estar influenciada por su diferente posición (aunque su ubicación es muy cercana) y por la falta de homogeneidad de la temperatura en el horno, dada la dificultad del control de temperatura en un volumen de aire.

Partiendo de los procedimientos seleccionados para la determinación del incremento de temperatura, se procede a los ensayos de compensación de temperatura. Se consideran tres métodos distintos, cuya principal diferencia radica en la necesidad o no de calcular previamente el ΔT . En los dos primeros dicho incremento de temperatura debe ser calculado, para lo que se aplican los métodos indirectos y de ajuste proporcional. Sustituyendo estos valores en la ecuación de funcionamiento del sensor, se obtienen las deformaciones de la pieza por los métodos indirecto y proporcional. Este método es el empleado por autores como Werneck [WER 2013] o Frovel [FRO 2006]. El tercero, método simplificado, no requiere calcular el incremento de temperatura. En este, dado que los dos FBGs se encuentran sometidos al mismo $\Delta\lambda$ por causas térmicas, basta con calcular la

diferencia entre el incremento de longitud de onda del sensor de deformación y el de temperatura para anular dicho efecto. A partir del dato resultante se obtienen las deformaciones.

Los resultados de estudio de compensación revelan que los tres procedimientos proporcionan resultados análogos en cuanto al cálculo de deformaciones, no detectándose diferencias significativas entre ellos. Su análisis muestra un pico de deformación al final de la fase a alta temperatura y comienzo del enfriamiento, debido a las distinta respuesta a dicho descenso térmico del sensor adherido en la probeta (sensor de deformación) y del sensor de temperatura, siendo más rápida la respuesta en el segundo, derivada de la inercia térmica de la probeta.

La repetibilidad de los resultados queda garantizada tanto para el valor de la deformación máxima producida por los distintos ΔT como las deformaciones registradas en las estabilizaciones a 50°C. Las discrepancias en deformación detectadas entre dichas dos estabilizaciones a 50°C se sitúan en 2,55 $\mu\epsilon$ (valor medio), valor que se considera despreciable.

Para el mismo incremento de temperatura aplicado, las deformaciones máximas registradas en la probeta CT-02 son inferiores a las obtenidas en el espécimen CT-01. Puesto que ambas probetas presentan la misma configuración geométrica, material y laminado, y que fueron ensayadas simultáneamente, el motivo de dicha diferencia radica en su diferente ubicación en el horno. Este efecto se repite en todos los ensayos efectuados, produciendo diferencias de 24 $\mu\epsilon$ entre las medidas de ambos sensores.

Los ensayos de ciclado térmico han demostrado la aptitud del empleo de sensores de Bragg para registrar solicitaciones térmicas dinámicas, permitiendo la medida simultánea tanto de deformación como de temperatura.

El objetivo de estos ensayos era doble, por una parte, evaluar la respuesta del sensor ante cargas térmicas dinámicas en un amplio rango de temperaturas, y por otro, estudiar la evolución y deterioro de la unión adhesiva entre la probeta y la fibra óptica. Dicha unión es un aspecto clave, puesto que su función es la de transferir las cargas del elemento ensayado a la red de Bragg.

La capacidad de los FBGs para seguir cargas térmicas dinámicas queda garantizada a través de los resultados obtenidos. Se aprecia un buen seguimiento del sensor de compensación de la temperatura registrada por el termopar, salvo en los extremos del ciclado térmico, donde aparecen diferencias pudiendo estar ocasionadas por la

superación de los límites de funcionamiento del sensor. La mayor diferencia se registra en el extremo inferior del ciclo, siendo la medida estimada por el FBG 10°C inferior a la registrada con el termopar. Entre las dos estimaciones del ΔT efectuadas con el sensor de Bragg las diferencias no superan en ningún caso los 3°C. Un comportamiento análogo al obtenido se aprecia en los ensayos efectuados por Barrera et al. en [BAR 2008], donde un sensor es expuesto a ciclos térmicos entre -10 y 100°C en el interior de una cámara climática. La comparación de los registros de temperatura obtenidos por el FBG y por un termopar de referencia revela diferencias de hasta 5°C a máxima temperatura.

El cálculo del módulo de Young revela que ni las probetas ni la unión adhesiva han sufrido deterioros por el ciclo térmico.

Como resultado de los diversos ensayos térmicos se ha obtenido un factor de sensibilidad de la red de Bragg ante un ΔT , estableciéndose los procedimientos proporcional e indirecto para determinar el incremento de temperatura aplicado y los métodos indirecto, proporcional y simplificado para compensar su efecto. Su validez ha quedado demostrada en un rango amplio de temperaturas, tanto para sollicitaciones térmicas estáticas como dinámicas. Esto representa un aspecto crítico para la aplicación de FBGs en la monitorización de la salud estructural de infraestructuras durante su vida en servicio.

4. MANIPULACIÓN DE FIBRA ÓPTICA E INTEGRACIÓN EN MATERIAL COMPUESTO

EN la actualidad, la principal limitación que presentan las redes de Bragg para su empleo en aplicaciones industriales reside en los problemas asociados a su manipulación e integración en grandes componentes. La sensorización de grandes estructuras requiere distribuir sobre el elemento una extensa red de sensores que permita conocer en todo momento su estado. Para ello, deben emplearse fibras ópticas de gran longitud, que incorporen numerosos FBGs en una misma línea. La manipulación de estas fibras resulta de gran complejidad, dada su escasa resistencia ante esfuerzos cortantes y a radios de giro acusados. Su instalación puede efectuarse sobre el componente final (fibra encolada) o integrando el sensor en la estructura durante su proceso de fabricación (fibra embebida). Este segundo método presenta la ventaja de que el sensor queda protegido frente a sollicitaciones externas. No obstante, la fabricación de estructuras de material compuesto con sensores embebidos presenta varias barreras tecnológicas que deben resolverse, como la salida de la fibra óptica del laminado y la supervivencia de los elementos de la instalación de fibra ante las condiciones del curado.

En el presente capítulo se evalúan distintas técnicas de integración de sensores de fibra óptica en estructuras de material compuesto, analizando las fortalezas y debilidades de cada una y desarrollando soluciones para estas últimas.

4.1. Materiales y métodos experimentales

Las pruebas de integración de fibra óptica en estructuras de material compuesto requieren de la fabricación de componentes en los que situar las redes de Bragg mediante los procedimientos considerados: embebido, encolado y curado superficial. El equipamiento y material utilizado en estos ensayos se describe seguidamente:

4.1.1. Materiales

El material compuesto empleado es un pre-impregnado unidireccional de fibra de carbono y resina epoxy, denominado MTM57/T700S. No requiere de la aplicación de presión para su curado, siendo necesario únicamente temperatura y vacío. Sus características y ciclo de curado se muestran en la Tabla 11 y Figura 55, respectivamente.

Tabla 11. Características del pre-impregnado MTM57/T700S y condiciones de curado [CAS 2017].

Características MTM57/T700S				
Contenido en resina		35%		
Espesor tras el curado		0.301 mm		
Vida útil a 20°C		30 días		
Tiempo de almacenamiento refrigerado a -18°C		12 meses		
Condiciones de curado al vacío	Temp. [°C]	80	100	120
	Tiempo [h]	16	3	1

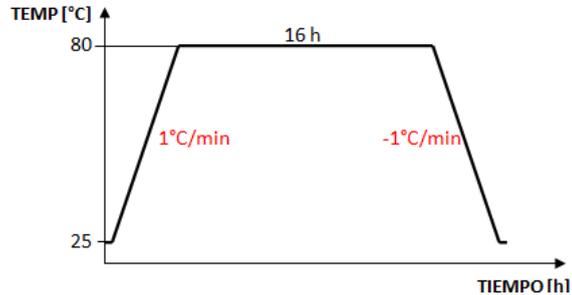


Figura 55. Ciclo de curado del material MTM57/T700S.

Dado que el curado se realiza sin aplicación de vacío, las prestaciones mecánicas del material obtenido no lo hacen apto para su uso en aplicaciones aeronáuticas.

La geometría, dimensiones, número de capas, secuencia de apilado y ubicación de fibra óptica se detallan para cada caso de forma particular, puesto que dependen del procedimiento de integración seguido y la finalidad del ensayo.

4.1.2. Equipamiento

Adicionalmente al equipo de lectura y adquisición con redes de Bragg (Interrogador Óptico sm130-700, descrito en el Capítulo 3 "Compensación y Medida de Temperatura"), se incluyen los sistemas necesarios para el curado de material compuesto y la fabricación de conectores y dispositivos para la integración de fibra óptica.

- **Equipo para curado de material compuesto MTM57/T700S**

El curado de este material, dado que no necesita de la aplicación de presión, se realiza en una cámara climática UD1000C de la marca ACS, que actúa como horno. El control se efectúa mediante el software Winkrator, donde se define el ciclo de curado y los parámetros a verificar.

La técnica de fabricación de las probetas es apilado manual (*hand lay-up*). Los elementos necesarios para su manufactura son: bolsa de vacío, film sangrador, manta de absorción y bomba para vacío.

- **Equipos de fabricación aditiva**

En este capítulo se presentan diversas soluciones que facilitan la integración de redes de fibra óptica en estructuras de material compuesto y mejoran la robustez de la instalación. Estos elementos se han diseñado empleando herramientas de diseño asistido CAD (CATIA V5) y fabricado mediante la tecnología de *Additive Manufacturing* (AM), tanto en metal como en poliamida. Los sistemas utilizados son la máquina para fundido selectivo por láser Renishaw AM 250 en metales y la SinterStation HiQ de 3D System en el caso de poliamida.

Equipo Renishaw AM 250

El equipo para la fabricación aditiva de componentes metálicos es el AM250 de RENISHAW plc (MTT Ltd) con actualización Plus Pack. Permite fabricar piezas con un volumen de hasta $250 \times 250 \times 300 \text{ mm}^3$, pudiéndose aumentar la altura hasta los 360 mm con la opción de extensión del eje Z.

Se emplean dos materiales diferentes. El primero de ellos es acero inoxidable AISI 316L. Se trata de material en polvo, desarrollado por Renishaw, cuya densidad es $7,99 \text{ g/cm}^3$ [REN 2016]. Sus características mecánicas se presentan en la Tabla 12. Estas propiedades dependen de la dirección de fabricación considerada, siendo inferiores en la dirección Z.

Tabla 12. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 316L.

Nota: Propiedades mecánicas obtenidas en CATEC.

Propiedad	AM-XY	AM-Z
Dureza [HV]	247	237
Módulo de Young [GPa]	166	119
Límite de fluencia [MPa]	529	499
Resistencia [MPa]	635	610

El segundo material considerado es la aleación de titanio Ti6Al4V. Al igual que en el caso anterior, se trata de un material en polvo desarrollado por Renishaw cuya densidad es de $4,42 \text{ g/cm}^3$ [REN 2016]. Sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 13, según la dirección de fabricación considerada.

Tabla 13. Propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti6Al4V.

Nota: Propiedades mecánicas obtenidas en CATEC.

Propiedad	AM-XY	AM-Z
Dureza [HV]	406	422
Módulo de Young [GPa]	108	108
Límite de fluencia [MPa]	1.108	1.083
Resistencia [MPa]	1.117	1.085

Equipo SinterStation HiQ

Para la fabricación aditiva en poliamida se emplea el equipo SinterStation HiQ, el cual se basa en la misma tecnología de fabricación que el sistema anterior. El material utilizado es poliamida DuraForm®PA, cuyas propiedades mecánicas se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14. Propiedades mecánicas de la poliamida DuraForm® PA.

Propiedades DuraForm® PA	
Dureza [HV]	73
Módulo de Young [GPa]	1.586
Límite de fluencia [MPa]	43
Resistencia [MPa]	14

4.2. Fibra óptica embebida

Al integrar los sensores de Bragg mediante la técnica de embebido, la fibra óptica queda protegida frente a golpes y agentes externos, evitando ser un obstáculo para las tareas de mantenimiento u operación de la pieza sensorizada. Sin embargo, este procedimiento presenta problemas derivados de la fabricación del material compuesto. La ubicación de la fibra debe realizarse con el material compuesto sin curar, debiendo resistir tanto la propia fibra óptica como los conectores ópticos de los extremos las condiciones de presión, temperatura y vacío necesarias para el proceso de fabricación.

Otro aspecto a resolver es la interferencia entre el proceso de fabricación del material compuesto y la integración de la fibra óptica embebida, lo cual está vinculado al modo de salida de dicha fibra óptica del interior del componente. La salida puede realizarse por la superficie o por el borde del laminado. La primera opción exige traspasar todas las capas del material compuesto que se encuentran por encima de la localización de la fibra, impidiendo la automatización del apilado de las capas. Además, el ángulo de la fibra al cruzar las diferentes capas debe ser adecuado, evitando que se produzcan pérdidas significativas de la intensidad de la señal o su rotura. La salida por el borde resuelve los problemas anteriores pero dificulta las actividades de recorte y mecanizado, siendo necesario un especial cuidado en no cortar o dañar las fibras salientes.

Evaluando ambas opciones se comprueba que la salida de la fibra óptica por el borde es una solución válida únicamente a nivel de pruebas en laboratorio. Las estructuras o componentes reales no presentan bordes (salvo en el caso de tratarse de placas o láminas) obligando a efectuar la salida por la superficie.

La rotura de la fibra a la salida del laminado supone la inutilización de todo el circuito integrado en la estructura, no siendo posible su reparación. Por este motivo, se han propuesto y analizado diversas soluciones para la protección de la fibra en esta región, aumentando su robustez ante golpes y facilitando la manipulación del componente.

4.2.1. Manufactura de paneles usando conectores comerciales

Se han efectuado diversas pruebas de fabricación de probetas de material compuesto con fibra óptica embebida en las que se evaluaron diferentes métodos para proteger la salida de la fibra tanto por la superficie como por el lateral del laminado. El objetivo es analizar la viabilidad de las soluciones de diseño planteadas.

Se han realizado cuatro fabricaciones en las que se estudiaron distintas configuraciones. En todas ellas se seleccionaron dispositivos comerciales con objeto de reducir costes:

- Configuración 1: Salida por el lateral del laminado.
- Configuración 2: Salida por superficie del laminado empleando adaptadores plásticos.

- Configuración 3: Salida por superficie del laminado empleando adaptadores plásticos y protector de adaptador.
- Configuración 4: Salida por superficie del laminado empleando adaptadores metálicos.

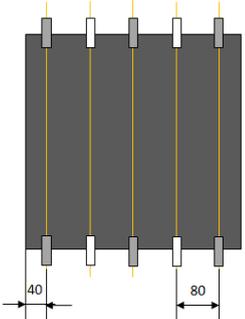
- **Configuración 1**

En el primer proceso de manufactura se fabricó el panel N°1, de dimensiones $400 \times 400 \text{ mm}^2$ y formado por cinco capas unidireccionales siguiendo la secuencia de apilado [0, 90, 0, 90, 0]. Las fibras ópticas se situaron entre las capas de laminado. Esta fibra óptica no presentaba marcado de Bragg, dado que el objetivo no era realizar medidas, sino únicamente estudiar la supervivencia de las mismas a la salida del panel. Las fibras se embebieron tras haber eliminado previamente todos los recubrimientos protectores, resultando un diámetro de $125 \mu\text{m}$.

Para la protección de la salida se emplearon capilares metálicos y plásticos. En el caso de los metálicos, estos eran de acero inoxidable AISI 304, con un diámetro exterior de $500 \mu\text{m}$ e interior de $260 \mu\text{m}$. Los capilares plásticos presentaban un diámetro de exterior de $900 \mu\text{m}$ e interior de $250 \mu\text{m}$.

El proceso de fabricación fue apilado manual. La ubicación de las fibras y las características de la protección en la salida se detallan en la Tabla 15.

Tabla 15. Ubicación de las fibras en el Panel N° 1.

Ubicación	Esquema	Descripción
Entre láminas de pre-impregnado 1 y 2		Se situaron cinco fibras ópticas con salida por el lateral. Tres de ellas se protegieron con capilares metálicos y dos con capilares plásticos.

Ubicación	Esquema	Descripción
Entre láminas de pre-impregnado 2 y 3		Se colocaron cinco fibras ópticas con salida por la superficie (un único extremo). Se emplearon capilares plásticos.
Entre láminas de pre-impregnado 3 y 4		Configuración análoga (y simétrica) a la anterior empleando capilares metálicos.
Entre láminas de pre-impregnado 4 y 5		Se situaron cuatro fibras con salida por superficie, dos con capilares metálicos y otros dos con capilares plásticos.

Durante la fabricación del panel y tras su curado se comprueba que numerosas fibras se han roto, quedando como consecuencia anuladas. Las causas de las roturas se clasifican según el orden de fabricación:

1.- En el caso de las fibras con salida por el lateral, aquellas que se encontraban protegidas con capilares metálicos se rompieron por el extremo libre del capilar, debido a la rigidez de estos que impiden cualquier giro o flexión de la fibra, ocasionando su rotura. Los capilares plásticos son flexibles y permiten ciertos giros de las fibras, siendo su radio de curvatura suficiente para evitar la rotura. Las dos fibras que presentaban los capilares plásticos han sobrevivido a todo el proceso.

2.- Para las fibras embebidas entre las láminas 2 y 3 se comprueba que ninguna de ellas ha resistido el proceso de fabricación de ir apilando capa a capa. Sobre estas fibras hay que situar tres capas de pre-impregnado, perdiéndose fibras en cada proceso de apilado.

3.- En el tercer proceso de apilado tampoco sobrevive ninguna fibra. Puesto que en esta ubicación no había ninguna fibra disponible, se colocaron dos fibras adicionales con salida por el borde, utilizando capilares metálicos. Al finalizar el curado se comprobó la rotura de dichas fibras por el extremo libre del capilar.

4.- Por último, el proceso seguido con las últimas fibras embebidas muestra resultados satisfactorios. En este, todas las fibras sobreviven al proceso de apilado, pues se invirtió el modo de fabricación: primero se introducen las fibras sobre la nueva capa a colocar y a continuación se coloca el conjunto sobre el panel.

Como conclusiones de la primera fabricación resaltar los siguientes aspectos:

- Las fibras ópticas con salida por la superficie del panel no sobreviven a más de dos procesos de apilado (apilado de más de dos capas).
- Para aumentar la supervivencia de las fibras con salida por superficie, hay que atravesar todas las capas que quedan por encima de las fibras en una única operación, traspasando primero las capas a colocar con la fibra óptica y seguidamente, situándola sobre el panel.
- En el caso de salida por el lateral, los capilares plásticos presentan mejores resultados gracias a la flexibilidad de los mismos.

• Configuración 2

Se fabricaron tres paneles para la segunda configuración considerada. Se trata de probetas constituidas por cinco capas unidireccionales de pre-impregnado con la secuencia de apilado [0, 90, 0, 90, 0]. Ninguna de las fibras presentaba redes de Bragg. En cada panel se embebió una única fibra óptica, disminuyendo la complejidad del proceso de fabricación.

El método de fabricación fue apilado manual. Partiendo de la experiencia extraída del primer panel el laminado se realizó en dos partes, esto es, se apilaron de forma independiente las capas que quedaban por debajo y por encima de las fibras embebidas. Una vez obtenidas ambas partes se situó la fibra óptica entre ellas y se traspasaron todas las capas que quedaban por encima de forma simultánea.

En los tres paneles fabricados (Panel N° 2, N° 3 y N° 4), la salida de la fibra óptica se realizó por la superficie, empleándose adaptadores plásticos tipo SC/APC. Los adaptadores permiten alinear dos conectores para garantizar la continuidad de la fuente de luz de un extremo de cable al otro. Con ello se facilita la manipulación de componentes con fibra embebida, pues no es necesario tener el conector (para la conexión con el equipo de medida) unido a la fibra durante el proceso de fabricación.

Las tres probetas presentaban la misma configuración, difiriendo únicamente en el procedimiento de unión del adaptador al panel. La fibra óptica se situó entre las capas 4 y 5 del panel. El tramo de fibra saliente del panel se mantuvo unida a un conector en su extremo, que se introdujo en el adaptador fijo al panel. Con este montaje, solo es necesario emplear un cable adicional de fibra óptica con un conector en cada extremo, uno para introducirlo en el extremo libre del adaptador y otro para conectarlo al interrogador óptico. Un esquema de la configuración de estos paneles se muestra en la Figura 56.

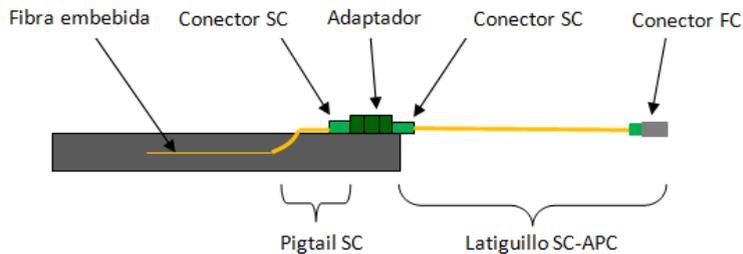


Figura 56. Esquema de fibra óptica embebida.

Las características de los elementos indicados en la Figura 56 se describen a continuación:

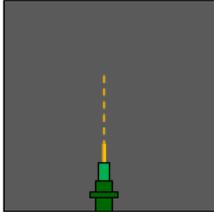
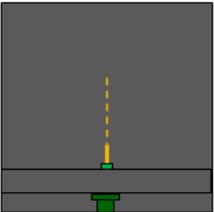
- Adaptadores tipo SC/APC: estos dispositivos presentan una guía interna en cada extremo para una correcta alineación de los conectores, facilitando el ensamblaje. Están fabricados en plástico, soportando temperaturas máximas de 85°C. Sus dimensiones son 27,3 x 22 x 9,3 mm³. Las pérdidas de inserción para fibra óptica monomodo son inferiores a 0,1 dB.
- Pigtail con conector tipo SC/APC: se trata de un conector tipo SC/APC con fibra óptica ajustada y recubrimiento exterior de 900 μm, monomodo 9/125 μm. El conector presenta férulas de cerámica de zirconio de 2,5 mm de diámetro, de alta

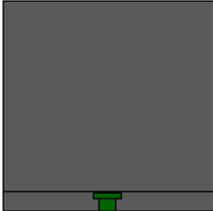
precisión. El cuerpo de dicho conector es plástico con fijación Push-Pull. Ofrece baja pérdida de inserción ($\leq 0,05$ dB) y retorno (≥ 70 dB), con un rango de temperatura de operación desde -20°C hasta 85°C .

- Latiguillo con conectores tipo SC/APC-FC/APC: es un cable de fibra óptica con conectores en ambos extremos, uno que se introduce en el adaptador de tipo SC/APC y otro, que se conecta al interrogador óptico, de tipo FC/APC. La fibra óptica es monomodo $9/125\ \mu\text{m}$ con una protección exterior de 2-3 mm de diámetro. Las características del conector son análogas a las del conector del pigtail: rango de temperaturas entre -20°C y 85°C , con un recubrimiento exterior de material termoplástico flexible dieléctrico LSZH de 2 mm de diámetro exterior.

Las características de los tres paneles fabricados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Descripción de los paneles N° 2, 3 y 4.

Ubicación	Esquema	Descripción
Panel N° 2		Se emplea el adaptador plástico tipo SC/APC, el cual se sitúa en el centro del laminado simplemente apoyado. Este queda adherido al panel a través de la resina durante el curado.
Panel N° 3		La configuración es análoga a la del panel anterior, añadiendo una lámina de pre-impregnado sobre el adaptador, para protegerlo de golpes. Las dimensiones de esta son $20 \times 200\ \text{mm}^2$, siendo las fibras paralelas al lado de mayor longitud. Esta banda no forma parte del laminado ni tiene función estructural, siendo su única misión proteger el adaptador.

Ubicación	Esquema	Descripción
Panel N° 4		<p>En el tercer panel, en lugar de la banda se situó una nueva lámina de pre-impregnado sobre toda la superficie con excepción del extremo, quedando libre para la colocación del adaptador. Así se protege tanto el adaptador como la salida de la fibra. Las dimensiones de la lámina fueron 170 x 200 mm², coincidiendo la dirección de las fibras con la longitud mayor. Esta lámina no tiene función estructural.</p>

Durante este segundo proceso de fabricación no se produjo la rotura de ninguna de las fibras ópticas. El estado de los paneles previos al curado se presenta en la Figura 57.

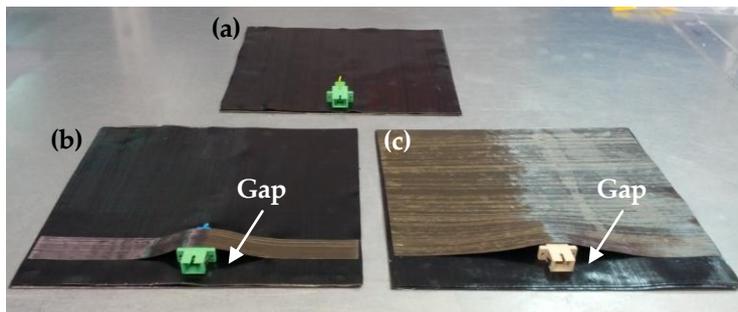


Figura 57. Paneles (a) N° 2, (b) N° 3 y (c) N° 4 con fibra óptica embebida previamente al curado.

Se comprueba que en los paneles N° 3 y N° 4 en los que se había colocado sobre los adaptadores una lámina de pre-impregnado, existe un *gap* entre dicha lámina y el panel debido a la presencia del adaptador. Al aplicar vacío durante el curado, esta capa de pre-impregnado se adhirió al adaptador, eliminando el hueco pero provocando arrugas y deformaciones en el panel, como se aprecia en la Figura 58, donde se muestra el estado final de los paneles tras el curado.

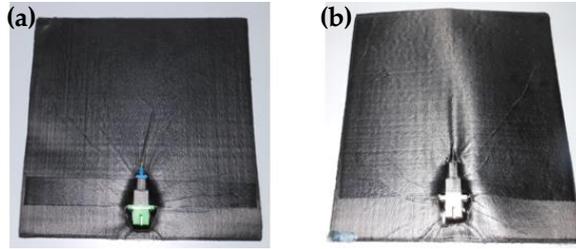


Figura 58. Estado tras el curado del panel (a) N° 3 y (b) N° 4.

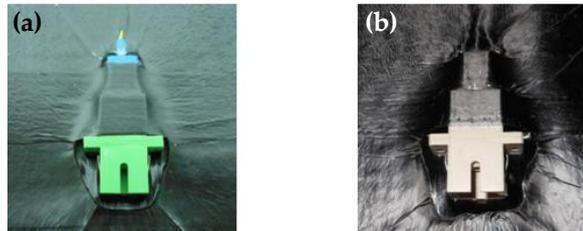


Figura 59. Vista de detalle del adaptador del panel (a) N° 3 y (b) N° 4.

Un segundo efecto derivado del proceso de curado en bolsa de vacío puede distinguirse en los paneles. Debido a la presión ejercida, el adaptador se hundió en el panel, originando una hendidura en todo su contorno (Figura 59). En la superficie opuesta del panel este efecto también es visible, observándose tanto la región hundida bajo el adaptador como zonas faltas de resina a su alrededor. En la Figura 60 se presenta el panel N° 2 tras el curado, donde también se han producido estas anomalías.

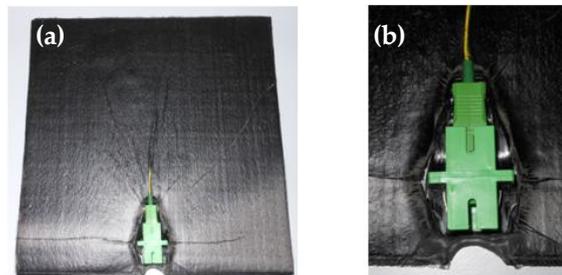


Figura 60. (a) Estado tras el curado y (b) vista de detalle del adaptador del panel N° 2.

En este panel fue necesario rectificar la región situada delante del adaptador, pues

debido a la hendidura aparecida no era posible conectar el latiguillo (Figura 60 b).

Tras este segundo proceso de fabricación se dedujo:

- El empleo de conectores y adaptadores resulta un procedimiento viable para embeber fibra óptica. La salida de la fibra queda fijada al panel y protegida frente a golpes, pues está conectada al adaptador. Además, presenta la ventaja de no tener que mantener un cable conectado al sensor durante todo el curado y posterior manipulación del panel.
- En los tres paneles el adaptador quedó completamente adherido a la superficie del panel. La colocación de la capa protectora de pre-impregnado provoca mayores deformaciones en la estructura y aumenta el peso del componente. Por tanto no es necesario su empleo.
- Deben evitarse las depresiones aparecidas alrededor del adaptador. Para ello, es necesario impedir que queden gaps entre la bolsa de vacío y dicho adaptador.

• Configuración 3

La tercera configuración estudiada es análoga a la número 2. A diferencia del caso anterior, las fibras embebidas en estos paneles sí presentan marcados de Bragg, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los sensores tras el curado.

Los dos paneles fabricados (paneles N^o 5 y N^o 6) tienen unas dimensiones de 200 x 200 mm², manteniendo la misma secuencia de apilado de los anteriores [0, 90, 0, 90, 0]. La fibra óptica sensorizada fue integrada entre las capas 3 y 4.

Para evitar las deformaciones y hendiduras aparecidas en las probetas de la configuración 2 debido al *gap* entre la bolsa de vacío y el adaptador, se diseñó y fabricó en poliamida mediante *Additive Manufacturing* un protector para el adaptador (Figura 61). Este elemento se sitúa sobre el adaptador durante el curado, evitando la aparición de estos *gaps*, pues la bolsa de vacío se adapta a su geometría.



Figura 61. Protector de adaptador.

En la Tabla 17 se presenta un esquema de los paneles fabricados.

Tabla 17. Descripción de los paneles N° 5 y N° 6.

Ubicación	Esquema	Descripción
Panel N° 5		<p>Se emplea el adaptador plástico tipo SC/APC, el cual se sitúa en un lateral del laminado simplemente apoyado. Este se fija a través de la resina durante el curado. La fibra presenta dos FBGs: uno para medida de deformaciones y otro para medida de temperatura. Este último se introduce dentro de un capilar metálico, para que pueda dilatarse libremente.</p>
Panel N° 6		<p>Configuración de salida de la fibra óptica análoga a la del panel N° 5. En este caso, solo se embebe una red de Bragg ubicada en el centro del laminado.</p>

Los paneles resultantes tras el curado se muestran en la Figura 62. Se comprueba que el uso de los protectores de adaptadores ha contribuido a evitar la aparición de hendiduras alrededor del adaptador. Las arrugas son consecuencia de un film sangrador que quedó adherido a la superficie, y que se situó entre el protector de adaptador y el panel para facilitar el despegue tras el curado.

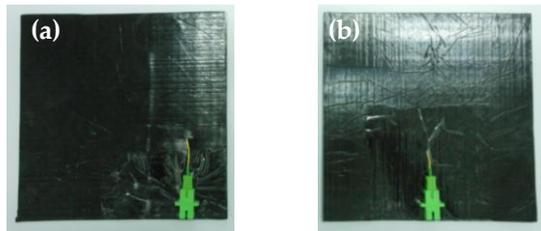


Figura 62. Resultado tras el curado del panel (a) N° 5 y (b) N° 6.

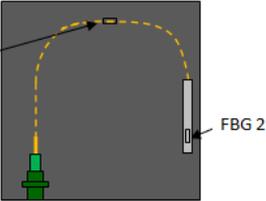
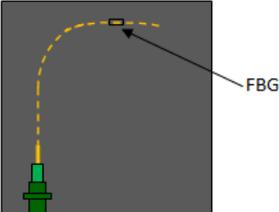
- **Configuración 4**

Las probetas fabricadas son idénticas a obtenidas en la configuración 3, salvo por los adaptadores utilizados. En este caso, se sustituyeron los adaptadores plásticos por otros metálicos. El cambio de adaptador se debe a la temperatura máxima soportada por los mismos. No obstante, los metálicos también presentan una parte plástica en su interior, que provoca que la temperatura máxima soportada no supere los 85°C (aproximadamente). Puesto que en el ciclo de curado aplicado la mayor temperatura es de 80°C, los adaptadores plásticos son adecuados. Sin embargo, su uso durante el curado en autoclave no es posible dada la mayor temperatura necesaria (en torno a 180°C).

El adaptador empleado es de tipo SC/APC-FC/APC. La conexión FC/APC se realizó con el conector que unido a la fibra embebida en el panel. Sus dimensiones son 21,2 x 22 x 9,4 mm³.

Los dos paneles fabricados son de 200 x 200 mm², con la secuencia de apilado [0, 90, 0, 90, 0]. La fibra óptica con los sensores de Bragg se situó en ambos casos entre las láminas 3 y 4. Las características de los paneles se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Descripción de los paneles N^o 7 y N^o 8.

Ubicación	Esquema	Descripción
Panel N ^o 7		Se emplea un adaptador metálico tipo SC/APC-FC/APC, el cual se sitúa sobre la superficie del panel simplemente apoyado. La fibra embebida presenta dos redes de Bragg, una para la medida de deformaciones y otra para temperatura (encapsulado en capilar metálico).
Panel N ^o 8		La configuración de esta probeta es similar a la anterior, presentando un único sensor de deformación.

Durante el curado se utilizaron los protectores de adaptadores fabricados en *Additive Manufacturing* para evitar la aparición de hendiduras y arrugas alrededor de dicho adaptador. El resultado de las probetas tras el curado se muestra en la Figura 63, donde se aprecia la marca superficial producida por el protector del adaptador a causa de la presión ejercida por la bolsa de vacío.

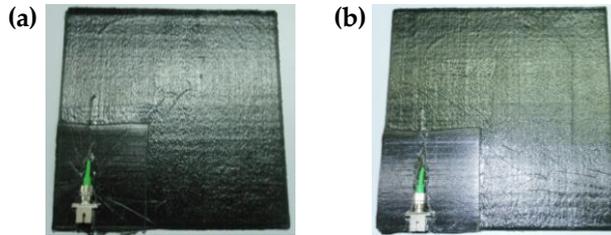


Figura 63. Resultado tras el curado del panel (a) N° 7 y (b) N° 8.

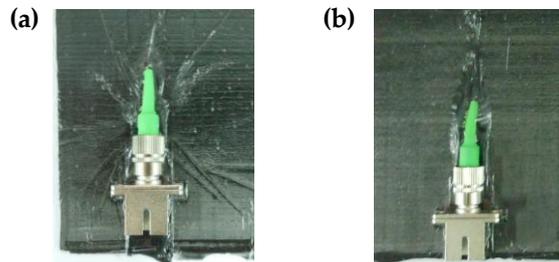


Figura 64. Vista de detalle del adaptador del panel (a) N° 7 y (b) N° 8.

De la Figura 64 se advierte que la ubicación de los adaptadores difiere ligeramente entre ambas probetas, estando situado en el panel N° 8 coincidente con el borde mientras que en el N° 7 restan unos 7 mm. Esto ocasionó que se acumulase la resina debido la falta de protector en dicha región.

Aunque el empleo de los protectores de adaptadores disminuyó en gran medida las deformaciones aparecidas en el panel, en la superficie opuesta a la de salida de la fibra se registran ondulaciones coincidentes con la parte inferior del conector y del adaptador, debido al desplazamiento de la resina de estas regiones (Figura 65).

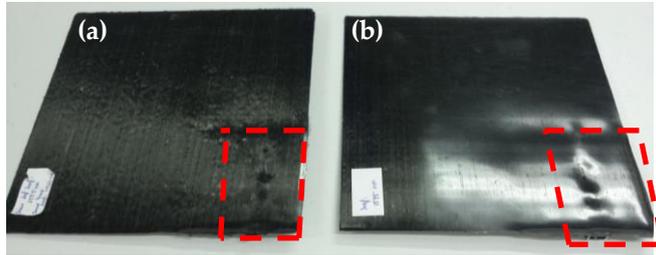


Figura 65. Vista posterior del panel (a) Nº 7 y (b) Nº 8.

4.2.2. Diseño y desarrollo de conectores y adaptadores

A través del estudio realizado con conectores comerciales se ha demostrado la viabilidad del uso de este tipo de dispositivos, facilitando la manipulación de las estructuras con fibra óptica embebida y aumentando su robustez. Al tratarse de elementos comerciales preparados para aplicaciones de telecomunicaciones, no están diseñados para resistir las condiciones de curado de material compuesto (habitualmente en torno a 180°C y 6 bar de presión). Suelen estar fabricados en plástico o contener partes internas en este material, cuyas características limitan la temperatura de operación a 85°C.

Gracias a la tecnología del *Additive Manufacturing* es posible diseñar y fabricar dispositivos que cumplan los requisitos (tanto en diseño como en propiedades) necesarios para el curado. En esta sección se presenta el diseño de adaptadores desarrollados por fabricación aditiva, donde según los requisitos a satisfacer, podrán ser fabricados en materiales metálicos (acero AISI 316L, Ti6Al4V) o poliamida (DuraForm© PA). En todos los casos, se trata de demostradores cuya geometría puede ser fabricada en cualquier material por AM sin necesidad de efectuar ningún cambio en el diseño.

El desarrollo de los dispositivos se ha realizado en base a la experiencia previa con elementos comerciales. Los nuevos componentes están formados por dos partes para poder integrar la fibra óptica en su interior. Las características de estos elementos se detallan a continuación:

- **Adaptador V1 (acero AISI 316 L)**

Este elemento tiene como objetivo permitir la continuidad entre dos cables de fibra óptica diferentes: el que se encuentra embebido en la pieza y el necesario para la

conexión con el equipo de medida. Su empleo permite conectar el segundo cable solo cuando se vayan a efectuar medidas. En la Figura 66 se aprecian las dos partes del adaptador:

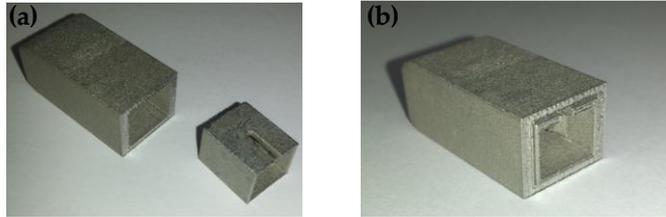


Figura 66. Adaptador de acero V1: (a) componentes por separado y (b) montaje del conjunto.

En la Figura 67 se presenta la primera parte, denominada adaptador hembra. Este elemento es el que se fija a la estructura. Sus dimensiones son $28,5 \times 15 \times 12 \text{ mm}^3$. En la parte posterior presenta un orificio para la entrada de la fibra embebida en el componente.

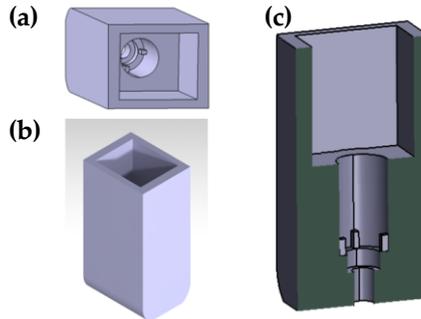


Figura 67. Adaptador hembra V1 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.

En su interior se ha realizado un conducto con estrías (Figura 67 c) para favorecer el correcto posicionado de la fibra. En este debe encajarse la férula de zirconio que permite la conexión de la fibra óptica con el equipo de medida (Figura 68). La posición de esta férula es de gran importancia en el caso de los conectores APC, debido al ángulo de inclinación que presentan en el extremo. Alrededor se sitúa otra cánula de zirconio para reducir pérdidas de luz (Figura 69).

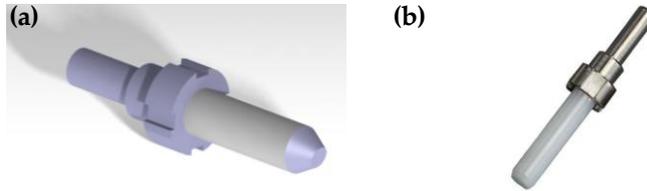


Figura 68. Férula de zirconio para conexión con equipo de medida: (a) modelo CAD y (b) elemento real.



Figura 69. Cánula de zirconio: (a) modelo CAD y (b) elemento real.

Las características de la segunda parte del adaptador se muestran en la Figura 70. Este elemento (denominado adaptador macho) se introduce en el interior del adaptador hembra. Sus dimensiones son $13 \times 11 \times 9 \text{ mm}^3$.

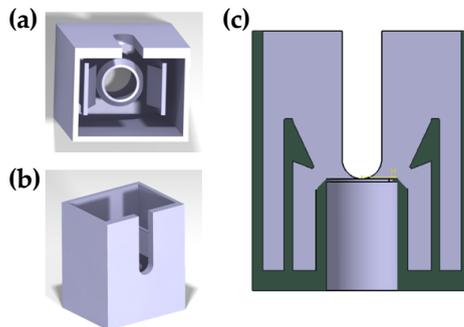


Figura 70. Adaptador macho V1 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.

Durante el montaje, la férula de zirconio junto con su cánula circundante deben situarse en el interior del cilindro del adaptador macho (Figura 71). En el extremo libre se introduce el conector del cable de fibra óptica para la comunicación con el equipo de medida, que debe ser de tipo SC. Para su correcto posicionado, en la superficie superior se ha realizado una ranura. La fijación del conector queda garantizada a través de las dos pestañas verticales adyacentes al cilindro interior.

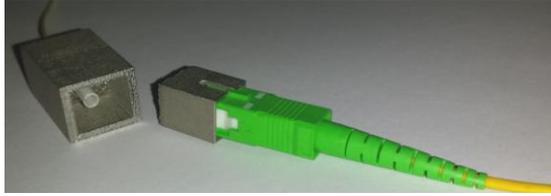


Figura 71. Detalle de la instalación del adaptador V1.

Se trata de un dispositivo completamente metálico, resistente a las condiciones de curado del material compuesto. Su geometría en forma de prisma garantiza su fácil adaptación a la superficie en la que se integre. No obstante, la tecnología de fabricación aditiva permite la rápida adecuación de la superficie interfaz a la geometría del elemento sensorizado. Para su aplicación en la industria aeronáutica, donde el peso de los elementos juega un papel fundamental, es necesario optimizar la forma minimizando su peso.

- **Adaptador V2 (acero AISI 316 L)**

El objetivo y funcionamiento de la segunda versión del adaptador son análogos a los de la versión V1, modificándose únicamente la geometría externa del adaptador hembra para reducir el peso. El nuevo diseño se muestra en la Figura 72, donde se aprecian los cambios realizados en la parte posterior del elemento. Las dimensiones externas coinciden con las de la primera versión ($28,5 \times 15 \times 12 \text{ mm}^3$).

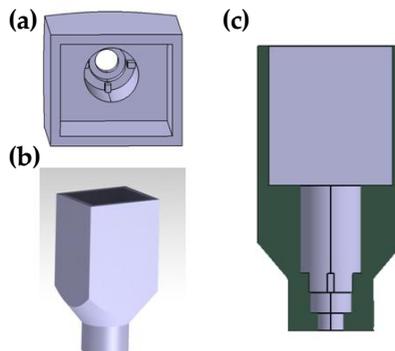


Figura 72. Adaptador hembra V2 (a) vista de perspectiva frontal, (b) vista de perspectiva lateral y (c) corte longitudinal.

La Figura 73 presenta el adaptador V2:

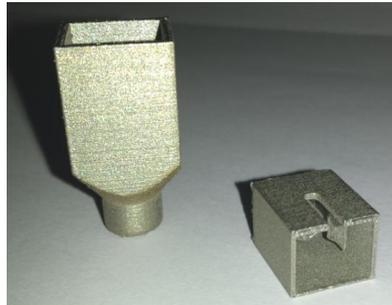


Figura 73. Adaptador de acero V2.

Esta segunda versión del adaptador permite reducir su peso en un 49%, manteniendo las prestaciones del primer dispositivo. La ejecución de pruebas con este elemento revela varios puntos de mejora: por un lado, la conexión del conector SC en el adaptador macho resulta compleja, siendo necesario ejercer mucha presión sobre este, lo cual conlleva su daño tras repetir varias veces esta acción. Por otra parte, aunque el extremo de la fibra que sale de la estructura queda integrado en el interior del adaptador hembra, un pequeño tramo de fibra sigue quedando a la intemperie (desde la salida del laminado a la entrada del adaptador hembra), siendo este el punto débil del montaje.

- **Adaptador V3 (acero AISI 316 L)**

Para resolver los problemas apreciados al introducir y extraer el conector tipo SC del adaptador macho, se rediseñan las pestañas verticales de fijación (Figura 74), transformándose en dos resaltes laterales que sobresalen de la pared interna del adaptador macho.

El nuevo diseño consigue solventar los problemas detectados en las anteriores versiones, facilitando el montaje y desmontaje del adaptador al completo e impidiendo la desconexión involuntaria de la fibra. El adaptador hembra conserva la geometría de la versión V2.

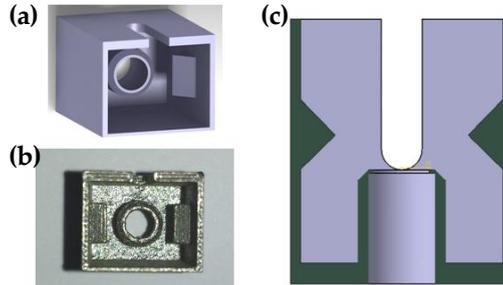


Figura 74. Adaptador macho V3 (a) vista de perspectiva, (b) vista frontal y (c) corte longitudinal.

- **Adaptador V4 (acero AISI 316 L, Ti6AlV4 y Poliamida DuraForm© PA)**

Los tres diseños previos cumplen con los requisitos de fijar el conector a la salida del componente. No obstante, en los tres casos la salida de la fibra por la superficie del laminado no se encuentra protegida, estando expuesta a posibles daños. El cuarto diseño pretende eliminar estos riesgos quedando cubierta durante todo su recorrido. Este dispositivo sigue constando de dos partes (Figura 75).



Figura 75. Adaptador V4 (acero AISI 316 L).

La geometría del adaptador hembra ha sido diseñada para facilitar su acomodación dentro de la bolsa de vacío, mediante superficies suaves y sin aristas que provoquen deformaciones de la estructura de compuesto a causa de la presión o del vacío. Este dispositivo mantiene las mismas características internas de anteriores versiones (Figura 76), con el conducto para la férula cerámica del conector de la fibra. Dicho conducto parte desde la superficie del laminado quedando la fibra protegida en toda su extensión. El adaptador macho no sufre cambios respecto a la versión V3.

El adaptador hembra presenta en la parte frontal una sección con forma semicircular que sobresale de la pieza (Figura 76 b, detalle A). El motivo es evitar la acumulación de resina en la parte delantera del adaptador durante la fase de

fluencia de la resina, lo cual puede impedir la conexión del latiguillo que une el adaptador con el interrogador óptico. Este efecto se produjo previamente en las pruebas realizadas con los conectores comerciales, siendo necesario alterar la geometría de la probeta para realizar la conexión (Figura 60).

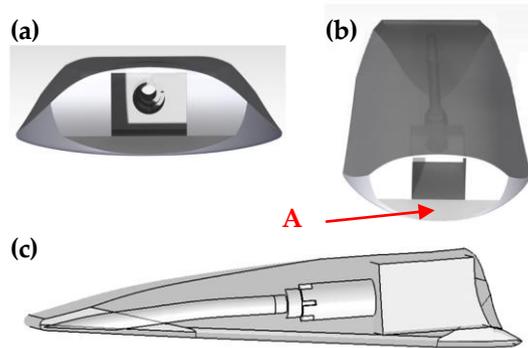


Figura 76. Adaptador hembra V4 (a) vista frontal, (b) vista en perspectiva superior y (c) corte longitudinal.

Para reducir el peso del elemento se realizan vaciados en el adaptador hembra, simétricos respecto al eje longitudinal. Dentro de dichas regiones se acumula polvo sin sinterizar que se extrae por medio de orificios realizados en la base del adaptador. El adaptador hueco es un 25% más ligero que el macizo. Para evaluar la viabilidad de ambos diseños, se fabrican tres probetas de material compuesto, en cada uno de los cuales se integra un adaptador V4 de tipo: (i) adaptador V4 macizo metálico de Ti6Al4V (panel N° 9), (ii) adaptador V4 macizo de poliamida (panel N° 10) y (iii) adaptador V4 hueco de poliamida (panel N° 11). Las imágenes de los adaptadores se muestran en la Figura 77.

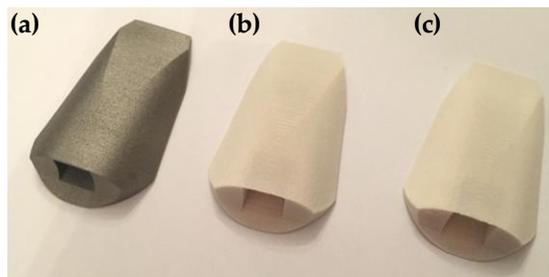


Figura 77. Adaptador hembra V4 de (a) Ti6Al4V (macizo), (b) poliamida DuraForm PA (macizo) y (c) poliamida DuraForm PA (hueco).

Los tres paneles fabricados presentan una configuración análoga: cinco capas de pre-impregnado unidireccional con secuencia de apilado $[0, 90, 0, 90, 0]$ y dimensiones $200 \times 200 \text{ mm}^2$. La fibra óptica se sitúa entre las capas 3 y 4 del laminado. Cada fibra presenta dos sensores, uno para medida de deformación (directamente embebido entre las capas de material compuesto) y otro para medida de temperatura (situado en el interior del capilar metálico). La Figura 78 presenta un esquema de la ubicación de los sensores.

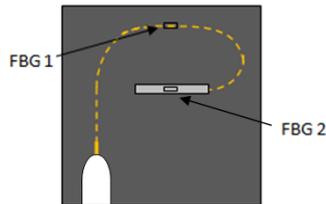


Figura 78. Esquema de la configuración de los paneles N° 9, 10 y 11.

Tras el curado, los paneles resultantes se muestran en la Figura 79. En los tres casos, los adaptadores han quedado completamente adheridos a la superficie, gracias a la polimerización de la resina del material compuesto. La geometría del adaptador permite la perfecta adaptación de la bolsa de vacío a los paneles, sin presencia de huecos que causen flujos de resina, hendiduras o deformaciones en la parte posterior del panel. La fibra óptica queda protegida en la totalidad de su longitud.

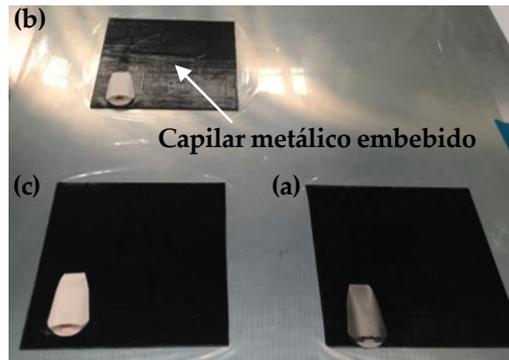


Figura 79. Paneles (a) N° 9, (b) N° 10 y (c) N° 11 tras el curado.

Tras estos ensayos queda demostrada la validez del empleo de los dispositivos adaptadores en su versión V4. Se trata de elementos con una geometría sencilla, que aumentan la robustez de la instalación de fibra óptica en uno de sus puntos

críticos. No se han registrado discrepancias en el comportamiento de los adaptadores macizos y hueco, siendo posible su uso de forma indistinta sin ocasionar deformaciones no deseadas en la pieza huésped.

4.3. Fibra óptica encolada

La técnica de encolado es el procedimiento más sencillo para la integración de sensores de fibra óptica. Consiste en fijar el sensor a la superficie de la pieza a monitorizar mediante un adhesivo, una vez terminado el proceso de fabricación (incluyendo el mecanizado) y montaje de la misma. Esta metodología presenta ventajas en cuanto a la facilidad de fabricación, pues no interfieren en el procedimiento de apilado de las capas de pre-impregnado. Además, es posible localizar la fibra óptica encolada a simple vista para posteriores operaciones en la pieza. Su principal problema es que los sensores se encuentran expuestos a golpes y a las condiciones ambientales, pudiendo ser dañados durante las operaciones de mantenimiento y operación. Asimismo, la calidad de las medidas está condicionada por el adhesivo empleado y el estado de la unión.

La integración de sensores mediante este procedimiento es muy sencilla, siendo únicamente necesario asegurar la limpieza de la superficie previa a la colocación de la fibra y garantizar su correcta alineación con la dirección en la que se deseen medir las deformaciones.

En el caso de fibras ópticas de gran longitud, su manipulación durante la fase de colocación puede resultar un proceso complejo. Aunque la fibra presenta una alta resistencia ante cargas longitudinales, se rompe con facilidad bajo esfuerzos cortantes, por lo que requiere de especial atención durante su manejo. La rotura de la fibra óptica (en zonas donde no exista sensor de Bragg) puede repararse mediante soldaduras, quedando estas zonas debilitadas debido a la necesidad de retirar el recubrimiento protector de la fibra para realizarlas. Como consecuencia es posible que se reduzca la amplitud de la señal transmitida, pudiendo ocasionar la pérdida de la señal en el caso de existir numerosas soldaduras en una misma línea.

Para facilitar el despliegue de fibras ópticas de gran longitud y aumentar la robustez del proceso, se ha diseñado y fabricado una herramienta para la colocación de la fibra. Una vez colocada es necesario fijar el conector para minimizar posibles roturas. Para ello, se han desarrollado elementos para el anclaje de los conectores a la superficie sensorizada.

4.3.1. Herramienta de posicionado de fibra óptica

Para reducir la elevada mortandad de sensores de fibra óptica durante su integración se ha desarrollado una herramienta para el posicionado de fibra óptica en grandes estructuras. Esta se ha fabricado en poliamida mediante la tecnología de *Additive Manufacturing*.

El modelo CAD se presenta en la Figura 80. Consta de tres partes: mango, disco y carrete. Su funcionamiento es muy sencillo. En primer lugar, la línea de fibra óptica se enrolla alrededor del disco, que se encuentra separado del resto de componentes de la herramienta. Una vez enrollada, el disco se coloca en el mango que facilitará el giro y por tanto el despliegue de la fibra. Por último, en paralelo al disco se sitúa el carrete, en cuyo interior se aloja un muelle tipo fleje. Su objetivo es proporcionar cierta tensión a la fibra óptica, de forma que se impida que se desenrolle de forma involuntaria. El giro del disco es impedido mediante un freno presente en el mango de la herramienta que debe ser liberado para la colocación de la fibra.

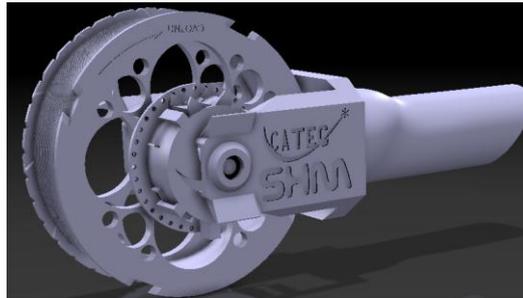


Figura 80. Herramienta de posicionado de fibra óptica.

Una descripción detallada de cada componente se realiza a continuación:

- **Disco**

Es el elemento alrededor del cual se enrolla la fibra óptica (Figura 81). Sobre su superficie se ha realizado un surco en forma de hélice que favorece el correcto posicionado de la fibra óptica evitando cruces en su recorrido (Figura 81 b).

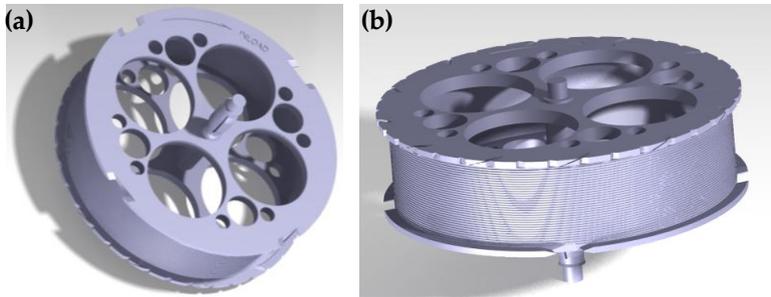


Figura 81. Disco de herramienta de posicionado de fibra óptica (a) perspectiva frontal y (b) perspectiva lateral.

Sobre el perímetro de las dos superficies laterales se han efectuado una serie de ranuras para introducir los extremos de la fibra óptica enrollada en el disco, de forma que quede completamente sujeta. En la Figura 82 se muestra un detalle de las ranuras, las cuales son de dos tipos. En la superficie delantera se trata de pequeñas incisiones (identificadas con la letra A) para introducir un cable de fibra óptica de $250\ \mu\text{m}$ de diámetro (como máximo). La segunda tipología (letra B) son muescas sobre el contorno de la superficie posterior para el paso de un extremo de fibra óptica incluyendo el conector. Los laterales de estas muescas han sido diseñados con forma de chaflán para evitar radios de giro pronunciados de la fibra óptica.

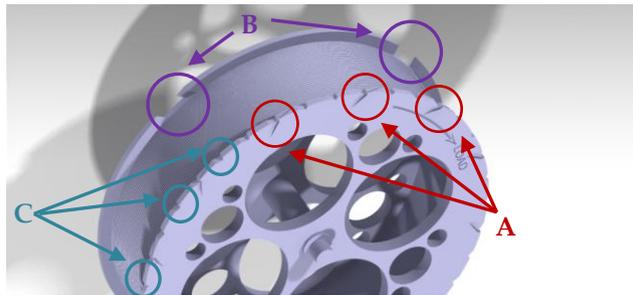


Figura 82. Ranuras para amarre de los extremos de la fibra óptica.

En la Figura 82 se señala un tercer tipo de marca (letra C), consistente en una serie de escalones en el borde de la superficie delantera. Estos escalones actúan como topes del sistema de frenado de la herramienta.

El disco está unido de forma solidaria a su eje de revolución. En ambos extremos

del eje se colocan rodamientos para facilitar su giro al introducirlo en el mango. Sobre el disco se han realizado numerosos orificios con la única función de reducir peso (Figura 83).

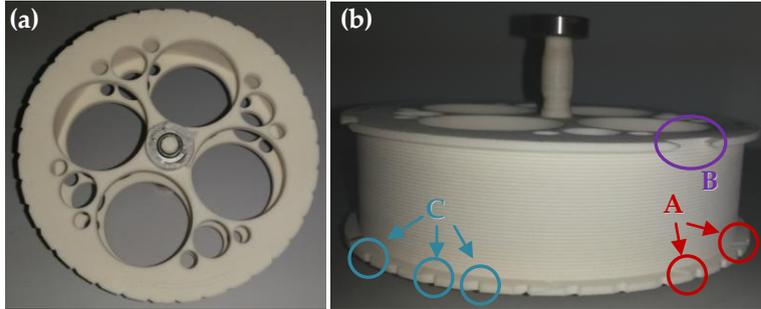


Figura 83. (a) Vista superior y (b) lateral del disco.

- **Carrete**

El carrete es el elemento en cuyo interior se sitúa el muelle de tipo fleje (Figura 84). Se ubica en paralelo al disco compartiendo ambos el mismo eje. El muelle debe ser cargado previamente a colocarlo en el eje, prestando especial atención en el sentido en el que se enrolla.

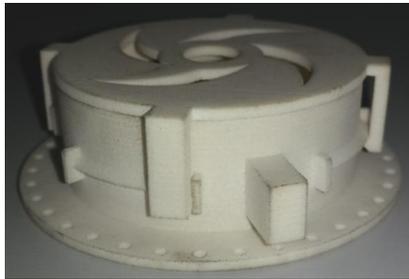


Figura 84. Carrete.

La parte inferior del carrete aloja el muelle que proporciona la tensión necesaria a la fibra evitando su despliegue involuntario. Este muelle es de tipo fleje-espiral, con un espesor de la cinta de 0,2 mm, un ancho de 18 mm y 6 m de largo. El extremo exterior se fija al carrete.

El extremo interior se introduce en una ranura efectuada para tal efecto en el eje de giro del disco, de forma que transmita la tensión a este.

- **Mango**

El último de los componentes es el mango, que actúa como elemento de sujeción de la herramienta (Figura 85).



Figura 85. Mango de la herramienta de posicionado de fibra óptica.

El mango incorpora un freno que se libera para permitir el giro del disco (Figura 86 a). Este se desplaza lateralmente, manteniéndose en su posición de reposo gracias a un muelle que aporta rigidez (Figura 86 b). La geometría de la parte superior del freno encaja con la de los escalones del borde del disco (zona de contacto entre freno y disco, Figura 82 y Figura 83, letra C).



Figura 86. (a) Detalle del freno en modelo CAD y (b) muelle de freno.

En la Figura 86 a, junto al freno, se aprecia una región con resaltos. Estos resaltos se han incorporado para adherir un elemento que presione la fibra contra el disco sin dañarla y que actúe como freno de seguridad evitando el despliegue la fibra de forma brusca al liberar el giro. El elemento seleccionado ha sido espuma (Figura 87).

Para facilitar la colocación del disco en el mango, en los extremos superiores de este se han incorporado unas pestañas que permiten ampliar la distancia entre las dos paredes verticales (Figura 87).

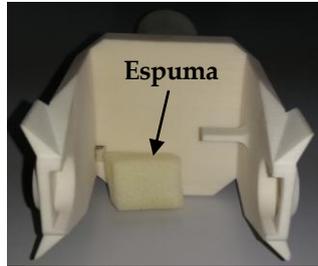


Figura 87. Espuma para frenado de disco.

Una vista del conjunto completo se muestra en la Figura 88. La viabilidad del empleo de esta herramienta ha sido demostrada en el Capítulo 6 "Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales", sección 1.1. Se utilizó para la sensorización de una cabina a escala real de CFRP, la cual se sometió a varios ensayos de presurización. Sobre la misma se ubicaron un total de 24 FBGs, distribuidos en cuatro fibras ópticas. Las grandes dimensiones tanto de la cabina como de las fibras (~8 m) dificultan significativamente la instalación de la red de sensores. Gracias al empleo de la herramienta de posicionado, la red de fibra óptica pudo ser instalada en un entorno industrial y con numerosas personas trabajando alrededor de manera simultánea. La instalación se completó en un corto periodo de tiempo, sin ninguna rotura en las fibras y garantizándose en todo momento la ergonomía de los operarios.



Figura 88. Herramienta de posicionado de fibra óptica.

4.3.2. Protector de conector

El último tramo de la fibra óptica encolada debe mantenerse libre (sin adherir), para permitir su conexión con el equipo de medida. La presencia de estos tramos de fibra sin fijar incrementa el riesgo de rotura. Para minimizarlo se ha desarrollado

una solución análoga a la planteada en el caso de sensores embebidos, basada en el uso de adaptadores. En esta, el conector del extremo de la fibra encolada se introduce en un adaptador que se fija a la estructura. La medida con la fibra encolada sólo requiere conectar un cable adicional entre el extremo libre del adaptador y el equipo de medida.

Dado que estos elementos no deben resistir las condiciones de curado, es posible utilizar dispositivos comerciales. Para el anclaje del adaptador a la superficie se han desarrollado unos protectores que lo envuelven, protegiéndolo de golpes. Estos se han fabricado en poliamida DuraForm© PA por AM.

Una primera versión de este elemento se muestra en la Figura 89. Se comprueba que tanto el adaptador como el conector quedan completamente protegidos.

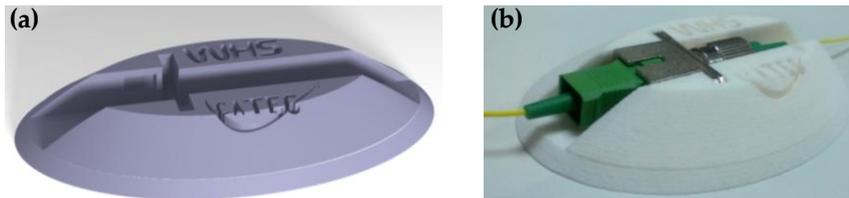


Figura 89. Protector de adaptador V1 (a) modelo CAD y (b) elemento real.

En la Figura 90 se presenta la segunda versión del protector de adaptador, en el cual se ha reducido peso y se han incorporado dos accesos (A) para facilitar la extracción del adaptador en caso de que sea necesario.

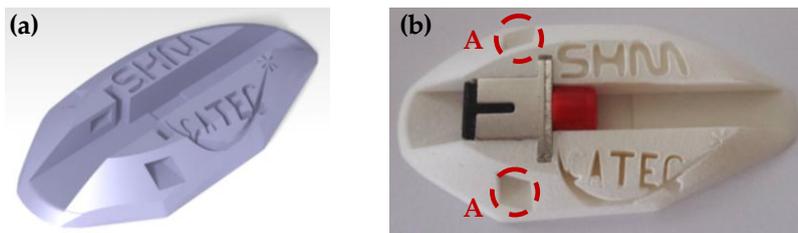


Figura 90. Protector de adaptador V2 (a) modelo CAD y (b) elemento real.

La validez de estos dispositivos se ha verificado a través de ensayos realizados sobre componentes reales en el Capítulo 6 "Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales". Estos elementos se emplearon para la conectorización de tres demostradores reales de distinta naturaleza: una cabina de aeronave de escala real de CFRP, dos pilares híbridos de hormigón reforzado y CFRP y un panel

rigidizado de fibra de carbono. La instalación de los protectores de adaptador permite la fácil manipulación y traslado de los elementos ensayados. Su fabricación mediante AM aporta versatilidad al diseño, pudiendo crearse una geometría *ad-hoc* para cada aplicación que garantice la perfecta adaptación del elemento a la pieza sensorizada.

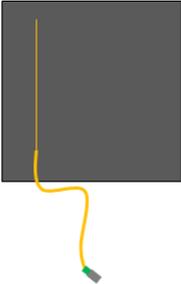
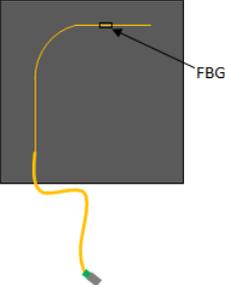
4.4. Fibra óptica pseudoencolada o curada en superficie

Una solución intermedia a las dos técnicas tradicionales de integración de fibra óptica se propone a través de las pruebas de fabricación efectuadas. Este método se ha denominado fibra “pseudoencolada” o de curado superficial, donde el sensor se sitúa sobre el material compuesto fresco (previamente al curado), quedando adherido a la superficie del laminado a través de la propia resina durante el curado. Este es un procedimiento prometedor que aúna las ventajas de las dos técnicas anteriores. Por una parte, las fibras pueden situarse en el componente una vez finalizado el proceso de apilado, sin interferir durante el mismo ni en la estructura interna del componente. La fibra queda completamente integrada a la primera capa del laminado, sin necesidad de emplear adhesivo y pudiendo ser localizada a simple vista. Además, dado que la resina del material compuesto envuelve la fibra óptica durante el curado, se disminuyen las posibilidades de dañarla.

Se han realizado diversas pruebas con fibra pseudoencolada, utilizando en todas ellas el material compuesto MTM57/T700S. Se fabricaron tres paneles, todos de 200 x 200 mm², con la secuencia de apilado [0, 90, 0, 90, 0]. La configuración de cada panel se muestra en la Tabla 19.

En los tres casos las fibras quedan completamente integradas en la probeta. El flujo de resina durante el curado hace que las fibras queden protegidas, no siendo necesario capas adicionales sobre estas.

Tabla 19. Descripción de los paneles N° 12, N° 13 y N° 14.

Ubicación	Esquema	Descripción
Panel N° 12 Panel N° 13		<p>Una fibra óptica (sin sensor en el Panel 12 y con sensor en el Panel 13) se situó sobre el laminado, terminado el proceso de apilado. A la fibra que debía quedar adherida al panel se le retiraron todos los recubrimientos protectores, resultando un diámetro de 125 μm. El resto de la fibra se mantuvo con la protección plástica de 900 μm.</p>
Panel N° 14		<p>La tercera probeta fabricada con fibra pseudoencolada presentaba un único sensor. En este caso, se modificó el recorrido de la fibra óptica, para estudiar su correcta integración en el laminado.</p>

Una vista de detalle del resultado de la fabricación se presenta en la Figura 91, donde la fibra óptica se encuentra perpendicular a las fibras de refuerzo del material compuesto. A pesar de ello la fibra queda protegida a través de una capa de resina que la envuelve.



Figura 91. Vista de detalle de la fibra pseudoencolada.

4.5. Discusión

El empleo de la técnica de integración de embebido o encolado depende de las características de la pieza, el instante en el que se realice la sensorización y la naturaleza de las cargas a monitorizar.

En la fibra embebida existen dos alternativas para la salida de la misma de la estructura de material compuesto: salida por el borde del laminado o salida por la superficie. Para la protección del punto de salida en la primera de las opciones se propone el empleo de dos tipos de capilares: metálicos y plásticos. Tras las pruebas efectuadas se comprueba que son los capilares plásticos los que mejores resultados proporcionan, gracias a la flexibilidad que presentan que permite que se produzcan giros en la fibra. Estos giros son impedidos por los capilares metálicos, ocasionando la rotura de las fibras en todas las configuraciones evaluadas. Resultados análogos a los obtenidos se encuentran en la bibliografía. Numerosos autores analizan el uso de tubos capilares plásticos para proteger la salida de la fibra, como Beukema o Kinet [BEU 2012, KIN 2014] con tubos de teflón, Green y Shafir [GRE 1999] con tubos capilares termoplásticos o Hong [HON 1998] con tubos capilares híbridos, compuestos por un capilar metálico con un refuerzo de goma. Todos estos cumplen el objetivo de proteger la salida de la fibra, reduciendo el efecto de aumento de la fragilidad que aparece como consecuencia del flujo de resina alrededor de la fibra durante el curado. El capilar plástico empleado satisface todos estos requisitos, minimizándose la distorsión ocasionada en el material compuesto gracias a sus reducidas dimensiones. Esta solución resulta útil únicamente en aplicaciones de laboratorio o demostradores. Las piezas reales de material compuesto no presentan bordes en los que finaliza el componente, sino que se encuentran integrados con el resto de la estructura. Por este motivo, es necesario el desarrollo de soluciones basadas en salida por la superficie.

Entre los problemas que presenta la salida de la fibra por superficie se encuentran la necesidad de atravesar todas las capas de pre-impregnado que quedan por encima de ella una vez situada y su ángulo de salida, el cual debe ser tal que se minimicen las pérdidas de luz y se evite su rotura. Para proteger la fibra se ha estudiado el empleo de adaptadores. Puesto que las redes de fibra óptica son ampliamente utilizadas en la industria de las telecomunicaciones, existen múltiples soluciones comerciales desarrolladas. Basados en los resultados mostrados por Kang y Kinet [KAN 2000, KIN 2014] se efectúan pruebas en las que se utilizan

adaptadores comerciales en paneles de CFRP con fibras embebidas. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del uso de estos dispositivos así como su gran potencial.

Los adaptadores empleados, puesto que proceden de la industria de las telecomunicaciones, no presentan requisitos exigentes en cuanto a las temperaturas de operación. En el caso de la industria aeronáutica, una de las ventajas que aportan los sensores de Bragg embebidos es la posibilidad de monitorizar el proceso de curado, garantizando que este se ha producido en las condiciones adecuadas y determinando las deformaciones residuales resultantes en la estructura. Para ello, tanto la fibra óptica como todos los elementos que compongan la instalación deben soportar las condiciones de curado.

Aunque los adaptadores comerciales suponen una solución económica y adecuada para casos a baja temperatura ($<85^{\circ}\text{C}$), es necesario el desarrollo de nuevos adaptadores que resistan las condiciones de fabricación de estructuras de material compuesto aeronáuticas. Autores como Beukema, Frovel o Green [BEU 2012, FRO 2006, GRE 1999] desarrollaron dispositivos adaptadores que pueden ser empleados durante el curado en autoclave. Todos estos elementos son de grandes dimensiones, siendo soluciones muy invasivas que producen distorsiones significativas en las piezas en las que se integran. Utilizando la fabricación aditiva, se han diseñado y fabricado unos adaptadores aptos para el curado. Estos elementos han sido obtenidos tras seguir un proceso iterativo, alcanzando finalmente un dispositivo que permite proteger por completo todo el recorrido de la fibra óptica (Adaptador V4). El adaptador está formado por dos partes (adaptador hembra y macho) y queda completamente adherido a la superficie durante el curado. La geometría del adaptador hembra favorece el correcto acomodo de la bolsa de vacío, distribuyéndose homogéneamente la presión en todo el elemento y evitando la aparición de deformaciones, hendiduras o flujos de resina indeseados. La fabricación por AM hace posible crear complejas geometrías internas de los adaptadores, aportando versatilidad al diseño de la interfaz adaptador-estructura que puede modificarse para un perfecto ajuste entre ambos elementos.

Los autores Eaton y Green [EAT 1992, GRE 1999] en sus respectivos trabajos establecen una serie de requisitos que deben satisfacer los adaptadores y elementos de conectorización de líneas de fibra óptica para su utilización en estructuras de material compuesto:

- Capacidad para mantener la fibra óptica y el conector con pocas pérdidas: el adaptador seleccionado ha sido integrado en laminados de fibra de carbono en los que se han embebido redes de Bragg. El estudio de la amplitud de los picos reflejados por los FBGs durante el curado de los paneles revela que la geometría del adaptador posibilita el correcto registro de la señal de los sensores sin que se produzcan pérdidas.
- Robusto ante condiciones ambientales y de servicio de la estructura, como vibraciones, fluctuaciones de temperatura o humedad: la presencia de pestañas internas en el conector macho impide la desconexión involuntaria del latiguillo de fibra óptica durante la operación de la pieza con motivo de vibraciones. Adicionalmente, estos elementos no se ven afectados por las condiciones de humedad ni temperatura (este último aspecto es únicamente válido en el caso de los adaptadores metálicos).
- Deben permitir el mecanizado de los bordes de la estructura y la unión de varias partes: al ser adaptadores para proteger la salida de la fibra en superficie no interfieren en el mecanizado de los bordes ni en el montaje del resto de la estructura.
- Compatibilidad con los sistemas estándar de la industria óptica para aprovechar sus continuas mejoras: la geometría del adaptador macho se ha creado tal que permita la conexión de latiguillos comerciales. Las férulas de zirconio utilizadas son las que se emplean en la industria óptica, favoreciendo la compatibilidad de elementos.
- Simpleza y robustez para conectar y desconectar en entornos industriales: la conexión y desconexión de elementos es inmediata, requiriendo únicamente un latiguillo comercial para la conexión con el equipo de medida. Este latiguillo puede ser conectado en el momento de efectuar la medida, evitándose tramos de fibra sin fijación en la estructura.

Los últimos dos requerimientos establecidos en la bibliografía son bajo coste y aptitud para el proceso de curado, es decir, resistir las condiciones de temperatura, presión y vacío de este. Ambos requisitos están fuertemente vinculados al material seleccionado para la fabricación del adaptador. Para los adaptadores diseñados, se han considerado tres materiales diferentes: acero AISI 316 L, la aleación de titanio Ti6Al4V y poliamida DuraForm© PA. Los dos primeros resisten las condiciones de curado en autoclave, aunque incrementan el precio del dispositivo. Además, a causa de su alta densidad pueden llegar a ocasionar un aumento del peso de la estructura tras la sensorización. Para solventar este problema se propone la

fabricación de adaptadores huecos. Los adaptadores de poliamida resuelven tanto el problema del coste como el del peso, aunque este material no resiste las condiciones de curado en autoclave. Según las exigencias de cada aplicación se seleccionarán adaptadores metálicos o plásticos.

En la actualidad, el gran desarrollo que están experimentando las tecnologías de fabricación aditiva conlleva un rápido crecimiento de los materiales disponibles para la misma. La Unión Europea, en la convocatoria *Clean Sky 2* para 2017 propone el estudio de materiales plásticos con altas prestaciones mecánicas y térmicas, que hagan posible su uso en procesos de fabricación en autoclave [EU 2017]. La compañía Stratasys ha desarrollado una resina termoplástica para aplicaciones de FDM (*Fused Deposition Modeling*) con elevadas propiedades mecánicas y térmicas, cuya principal particularidad es que resiste las condiciones de curado en autoclave. Este material, denominado ULTEM 1010, presenta unas características óptimas para la fabricación de los adaptadores para fibra óptica embebida, puesto que tienen una alta resistencia a temperatura (temperatura de transición vítrea de 215°C) y bajo peso (densidad 1,27 g/cm³) [STR 2017].

En la Figura 92 se realiza una clasificación de materiales según sus propiedades de densidad y coeficiente de expansión térmica (CE). Adicionalmente, se impone la condición de que su temperatura de servicio sea como mínimo 180°C (para resistir las condiciones de curado en autoclave). Los materiales que satisfacen esta condición se presentan en la Figura 92, donde se han identificado aquellos materiales que pueden ser de interés para la tecnología de AM, pudiéndose fabricar los conectores diseñados y garantizando que son compatibles con el material compuesto CFRP. De esta forma es posible seleccionar materiales con baja densidad, que no penalicen el peso de la estructura, y con un coeficiente de expansión térmica similar al del material compuesto, para evitar producir distorsión en el mismo. Analizando esta segunda propiedad se verifica que los metales presentan valores similares al del compuesto, aunque su densidad es muy superior. En el caso de los materiales plásticos (siliconas, PEEK, PTFE) estos presentan un coeficiente de expansión térmica mayor con una baja densidad (en algunos de ellos incluso inferior al del CFRP). Dado la gran importancia del peso en las estructuras aeronáuticas, prevalece el criterio de bajo peso frente al del CE bajo.

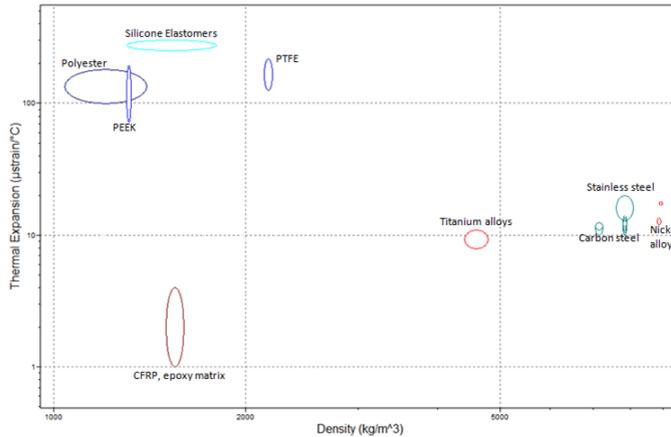


Figura 92. Clasificación de materiales: densidad vs coeficiente de expansión térmica.

La integración de la fibra óptica por el procedimiento de encolado elimina todos los problemas asociados a la salida de la fibra óptica. Este método tiene otro punto débil correspondiente con la sección de fibra que deja de adherirse a la superficie de la pieza para su conexionado con el equipo de medida. Siguiendo un procedimiento similar al de la fibra embebida, se han desarrollado unos dispositivos protectores del conector. Estos elementos alojan adaptadores comerciales y los fijan a la superficie de la pieza. De esta forma se evita tener grandes tramos de fibra óptica sin anclar a la pieza, los cuales se pueden romper durante la manipulación de la estructura, su traslado o simplemente durante la ejecución de pruebas y ensayos. Dado que la pieza a monitorizar está previamente fabricada, no es necesario el uso de dispositivos con altas prestaciones a temperatura, pudiéndose utilizar adaptadores comerciales. El elemento protector del conector se ha fabricado en poliamida por AM, lo que aporta la flexibilidad de poder modificar el diseño para una mejor acomodación en la pieza.

La tecnología de fabricación aditiva también ha permitido desarrollar una herramienta para el posicionado y distribución de líneas de fibra óptica de gran longitud. Esta herramienta reduce significativamente el riesgo de rotura de la fibra, permitiendo una mejor manipulación de la misma, evitando radios de giro acusados y pudiendo situar los sensores en las ubicaciones deseadas. Tanto esta herramienta como los protectores de conectores han sido utilizados con resultados satisfactorios en los casos de estudio presentados en el Capítulo 6 "Implementación

de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales".

Finalmente, se propone un nuevo procedimiento de integración de la fibra óptica, denominada fibra pseudoencolada o curada en superficie. En este caso, la fibra se adhiere a la superficie de la estructura de material compuesto durante su curado a través de la propia resina del material. La fibra queda integrada en la superficie y protegida por una capa de resina (en especial en los casos en los que se sitúa en paralelo a las fibras de refuerzo del material compuesto). Esta técnica reúne las ventajas de los procedimientos tradicionales, puesto que no requiere utilizar adhesivo y se evitan todos los problemas derivados del proceso de embeber la fibra óptica (salida de la fibra, traspasar capas de pre-impregnado con la fibra, alteración de las propiedades del material huésped, etc.). La principal limitación reside en el punto en el que la fibra se separa del material compuesto para su conexión con el equipo. Este método presenta un gran potencial para aplicaciones aeronáuticas, aunque requiere de un mayor estudio de la respuesta de los sensores así integrados ante sollicitaciones térmicas y mecánicas.

5. MONITORIZACIÓN DEL CURADO

EL proceso de curado en estructuras de material compuesto origina estados de deformación y tensión residual que pueden dificultar su posterior ensamblaje y disminuir sus propiedades mecánicas. Su origen se encuentra en los distintos coeficientes de expansión térmica de la resina y de las fibras de refuerzo, que ocasionan deformaciones diferentes entre ambos componentes. El tiempo de curado, la temperatura y la presión son los parámetros que controlan la calidad final del material compuesto.

Los ensayos de monitorización del curado tienen como objetivo conocer el estado de deformaciones/tensiones resultante de la pieza fabricada mediante redes de Bragg. El estudio del cambio del espectro óptico, de la atenuación de la señal y del desplazamiento de la longitud de onda del sensor permite la medida de estas magnitudes residuales.

5.1. Materiales y métodos experimentales

El material y equipamiento empleado es análogo al de las pruebas del Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto", dado que en ambos capítulos se realizan los mismos ensayos aunque con distinta finalidad. El estudio se efectúa sobre dos tipos de material compuesto con procesos de curado diferentes: en el primer caso, únicamente se aplica temperatura y vacío, y en el

segundo se requiere además de presión. Esto obliga a la utilización de dos equipos para el curado: un sistema que funcione como horno (la cámara climática descrita en el Capítulo 4) y un autoclave.

5.1.1. Materiales

Los materiales empleados son los pre-impregnados MTM57/T700S, para los curados realizados bajo condiciones de temperatura y vacío (Capítulo 4) y Z19.732. Este segundo material, coincide con el de las probetas utilizadas en los ensayos de compensación y medida de temperatura. Su ciclo de curado queda caracterizado por la Figura 93 y la Tabla 20. La descripción de las probetas se realiza en cada sección, especificando sus particularidades y los aspectos analizados.

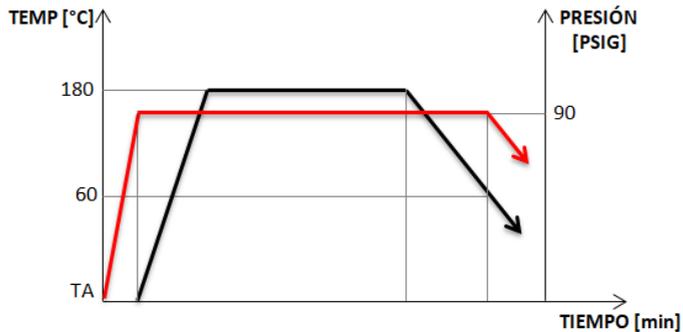


Figura 93. Ciclo de curado del material Z19.732.

Tabla 20. Parámetros del ciclo de curado del material Z19.732.

Variables		Notas
Presión [PSIG]	90 + 10/-5	Se permite una caída natural de presión en enfriamiento, manteniendo un mínimo de 58 PSIG.
Vacío [mm Hg]	550 a 600	Ventilar al exterior a los 28 PSIG.

Variables	Notas
Tiempo de calentamiento [min]	57 a 285
	Máxima velocidad de subida: 2,7°C/min.
	Intervalo 54 a 165°C: mínima velocidad de subida 0,6°C/min.
	Intervalo 165 a 180°C: mínima velocidad de subida 0,2°C/min.
Temperatura de estabilización [°C]	180
Tiempo de estabilización [min]	120 a 180
Tiempo de enfriamiento [min]	≥43
Temperatura de desmoldeo [°C]	≤60

5.1.2. Equipamiento

Para el curado del material Z19.73 se emplea un autoclave (Figura 94), debido a las condiciones de temperatura y presión requeridas para su fabricación.

Para poder registrar los datos durante el curado, es necesario sacar del autoclave tanto los conectores de las fibras ópticas embebidas como los termopares de referencia mediante el pasa-muros del equipo.



Figura 94. Autoclave empleada para el curado del material compuesto Z19.732.

5.2. Resultados de ensayos con material MTM57/T700S

El análisis del curado de este pre-impregnado se realiza a través de dos procesos de manufactura independientes. Se fabricaron dos y tres probetas con sensores embebidos, respectivamente.

Se trata de paneles de $200 \times 200 \text{ mm}^2$, formados por cinco capas de pre-impregnado unidireccional con la secuencia de apilado $[0, 90, 0, 90, 0]$. Para la monitorización del curado es necesario embeber dos sensores de Bragg independientes, uno sometido a sollicitaciones térmicas y mecánicas y un segundo solo afectado por efectos térmicos. Para ello, el segundo sensor se encapsuló en un capilar metálico de acero inoxidable AISI 304, con un diámetro exterior de $500 \mu\text{m}$ e interior de $260 \mu\text{m}$. Al ser metálico es un buen conductor del calor, permitiendo que los cambios de temperatura que se produzcan en el panel puedan ser registrados rápidamente por el sensor.

En las cinco probetas, la fibra óptica se ha situado entre las capas 3 y 4 del laminado. En la Figura 95 se presenta un esquema de los paneles N° 1, 3, 4 y 5. La probeta restante (N° 2) muestra las mismas características salvo que únicamente se ha integrado una red de Bragg (Figura 96). La compensación de temperatura se realizó en este caso con la medida del sensor encapsulado en la probeta N° 1, que se fabricó simultáneamente al N° 2.

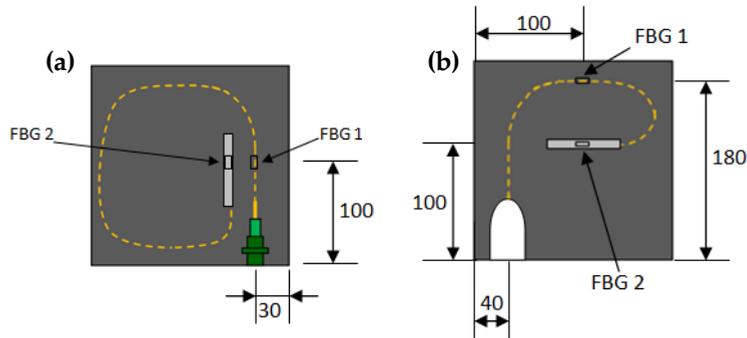


Figura 95. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en los paneles N° (a) 1 y (b) 3, 4 y 5.

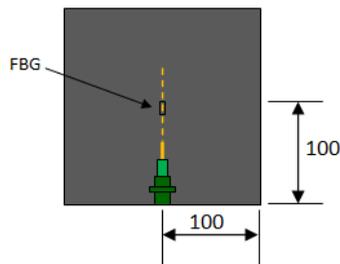


Figura 96. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en el panel N° 2.

5.2.1. Primer proceso de manufactura y curado de paneles

La Figura 97 muestra el cambio de longitud de onda de los sensores del panel N° 1. Dicho cambio es mayor en el caso del FBG sometido a deformaciones mecánicas y térmicas que en el sensor únicamente afectado por el cambio de temperatura. Un aspecto a destacar es que al final del ensayo la longitud de onda de ambos sensores no vuelve a su estado inicial, presentando un $\Delta\lambda=0,2$ nm con respecto al valor inicial en el sensor de temperatura y de 0,34 nm en el de deformación.

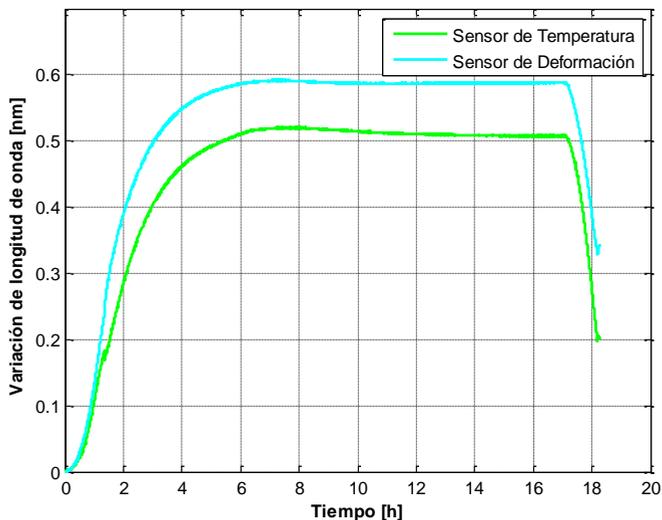


Figura 97. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N° 1.

La representación tridimensional de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación se muestra en la Figura 98. En esta se aprecia el $\Delta\lambda$ experimentado por el FBG, el cual no vuelve a su valor inicial.

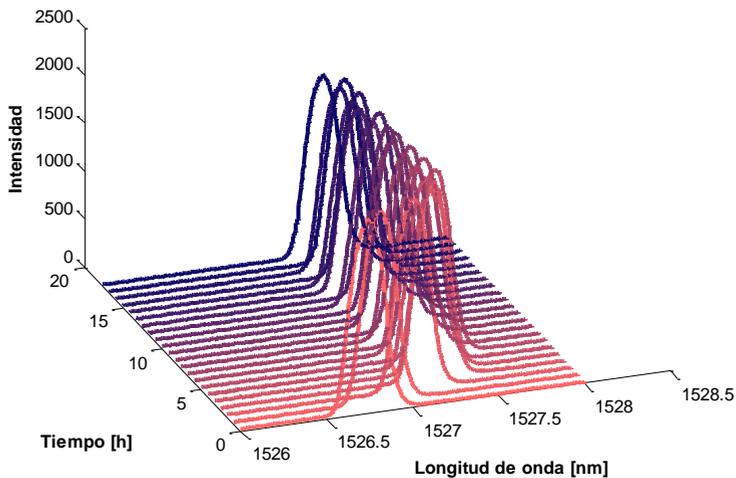


Figura 98. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 1).

Las proyecciones de las longitudes de onda durante el calentamiento y el enfriamiento se presentan en la Figura 99. En el primero caso, la longitud de onda característica se desplaza hacia la derecha, manteniéndose constante la intensidad en torno a 2.000 AU. En el periodo de enfriamiento el $\Delta\lambda$ decrece (aunque no vuelve al valor inicial), apreciándose una reducción de la amplitud de la señal (el valor final se sitúa en 1.800 AU).

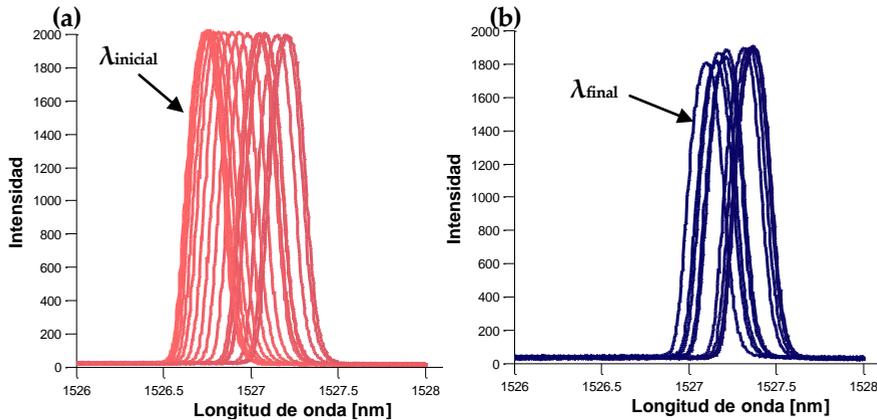


Figura 99. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 1).

A través de la señal registrada por el sensor encapsulado es posible determinar la temperatura alcanzada durante el curado (Figura 100), empleando los dos procedimientos seleccionados en el Capítulo 3 "Compensación y Medida de Temperatura", esto es, método indirecto y de ajuste proporcional. Ambas estimaciones presentan resultados análogos, detectándose las mayores diferencias en la estabilización a 80°C. Las diferencias no superan los 0,4°C en ningún momento.

El incremento de temperatura establecido fue de 55°C, sin embargo, como se aprecia en la Figura 100, el registrado por el sensor no alcanza los 47°C. La diferencia radica en la distinta ubicación de los dispositivos de medida, dado que el sensor se encuentra embebido (y mide las temperaturas en el interior del panel) y en la cámara se mide con la sonda de temperatura situada en el techo de la misma. Por otra parte, en el Capítulo 3 se comprobó que los métodos seleccionados para estimar la temperatura presentan un error medio en torno al 3,5% en la región a alta

temperatura. Ambos efectos producen que la temperatura medida en el interior del panel sea inferior a la establecida en la cámara.

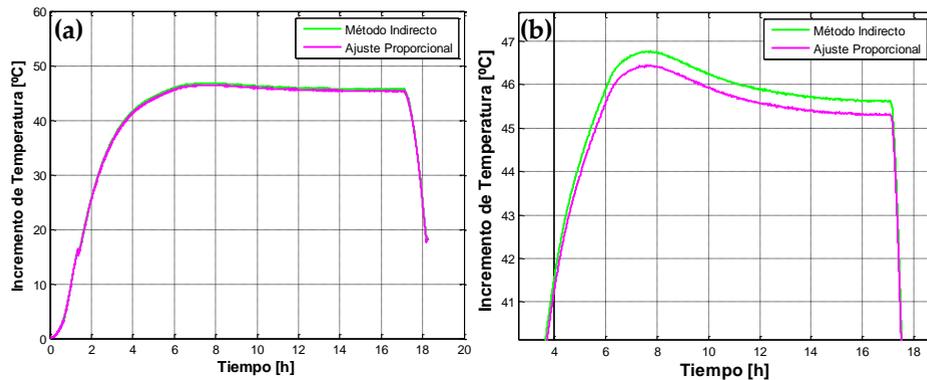


Figura 100. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a .

Tras terminar el ciclo de curado, en el interior de la probeta no se habían alcanzado los 25°C establecidos sino que la temperatura permanecía en 42,5°C (como se aprecia en la Figura 100 donde se verifica que al final del ensayo $\Delta T \neq 0$). Es necesario permitir el enfriamiento completo de la probeta, pues el $\Delta\lambda$ de los sensores al final del ensayo está ocasionado tanto por el efecto de esta temperatura como por las deformaciones residuales, no siendo posible delimitar la fracción correspondiente a cada uno de ellos. Para ello se debe comparar la medida de los FBGs al comienzo y al final del ensayo a temperaturas análogas.

La deformación sufrida por el panel durante el ensayo se muestra en la Figura 101. El cálculo se ha efectuado por tres procedimientos: método indirecto, ajuste proporcional y método simplificado (Capítulo 3). Las tres técnicas proporcionan valores muy similares entre sí, encontrándose superpuestas las respuestas de los métodos simplificado e indirecto (se ha aumentado el espesor de la línea del método indirecto para permitir su visualización). La estimación obtenida con el ajuste proporcional presenta valores ligeramente superiores (siendo las diferencias inferiores a las 3 $\mu\epsilon$ en todo ensayo), debido a la menor estimación de temperatura de este método. Los máximos se producen al final del enfriamiento, alcanzándose las 120 $\mu\epsilon$. La importancia de estas deformaciones se podrá evaluar en el proceso de curado de una estructura real, de la que se conozcan las solicitaciones mecánicas y

térmicas a las que se encontrará sometida durante su vida útil, así como su resistencia estimada.

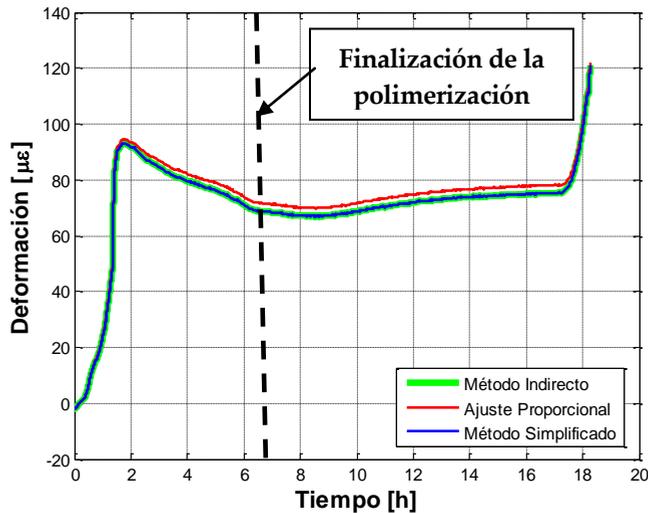


Figura 101. Medida de deformaciones en el panel N° 1.

En las tres respuestas se observa un pico al comienzo de la estabilización a 80°C a consecuencia del flujo de resina. Tras alcanzar el máximo, la deformación disminuye debido a la reacción de curado. Esta se prolonga durante unas 6,7 h, instante en el que finaliza la polimerización de la resina y a partir de donde se mantiene aproximadamente constante la deformación, indicando que la reacción de curado está próxima a concluir.

Cabe destacar el comportamiento registrado durante la etapa de enfriamiento del panel donde se muestra un crecimiento de las deformaciones en la posición donde se sitúa el sensor. Finalizado el curado, se vuelve a registrar la longitud de onda de los sensores a la misma temperatura que se inició el ensayo, determinando unas deformaciones residuales de 84 $\mu\epsilon$.

La respuesta del sensor depende de su orientación respecto a las fibras de refuerzo del material compuesto, de la secuencia de apilado del laminado y de la ubicación del sensor. En la probeta, existirán regiones con deformaciones locales positivas y otras con valores negativos, pudiendo registrar el sensor deformaciones positivas cuando se está produciendo una contracción térmica.

En el caso del panel N° 2, el comportamiento registrado es análogo al de la primera

probeta, no apreciándose diferencias significativas entre ambas. Los resultados se presentan en el Anexo B "Monitorización del Curado: Resultados de ensayos con material MRM57/T700S". En este panel también se identifican mayores cambios en las deformaciones al comienzo de la fase a 80°C, fruto del proceso de fluencia de la resina del material compuesto.

La principal diferencia entre las deformaciones medidas en esta probeta y en el panel N° 1 se encuentra en la fase de enfriamiento. En esta, la deformación disminuye a medida que desciende la temperatura. Los valores residuales se sitúan en torno a 45 $\mu\epsilon$. Estas discrepancias están ocasionadas por la diferente ubicación de los sensores de deformación en ambos casos (Figura 95 y Figura 96).

En la Figura 102 se presenta el cambio de longitud de onda del sensor de deformación de los paneles N° 1 y 2. Ambas son prácticamente coincidentes durante la estabilización a 80°C, mostrando diferencias en la fase de calentamiento y en el periodo de enfriamiento, apreciables en las deformaciones de cada panel.

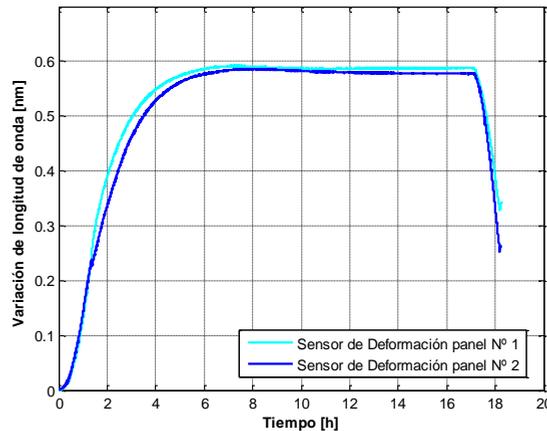


Figura 102. Comparación del cambio de longitud de onda de los sensores de deformación en los paneles N° 1 y 2.

5.2.2. Segundo proceso de manufactura y curado de paneles

La variación de la longitud de onda de los dos sensores del panel N° 3 se muestra en la Figura 103.

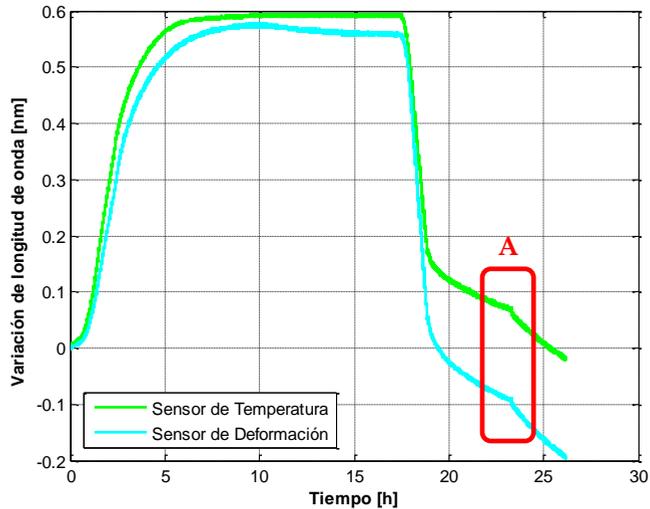


Figura 103. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N^o 3.

Se aprecia una diferencia significativa respecto a los procesos de monitorización anteriores: en este caso, el cambio de longitud de onda experimentado por el sensor de temperatura (solo sometido al efecto de la dilatación térmica) es mayor que el del sensor de deformación (afectado también por la deformación mecánica). Aunque este hecho podría indicar que se ha introducido resina en el interior del capilar metálico, lo cual falsearía los resultados medidos, se comprueba que tras el enfriamiento la variación de longitud de onda vuelve prácticamente a cero, siendo la temperatura a la que finaliza el ensayo ligeramente inferior a la del inicio de la monitorización. De esta forma, dado que el FBG de temperatura registra valores reales que evidencian que no ha entrado resina en el capilar, el comportamiento del sensor de deformación es debido a esfuerzos de compresión sobre el mismo, que reducen el incremento de longitud de onda frente al aumento de temperatura que lo eleva. Es posible identificar de forma clara las tres etapas del proceso de curado: aumento de temperatura a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, estabilización a 80°C y descenso de temperatura a $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Finalizado este periodo, se aprecia una fase de libre enfriamiento de la probeta, el cual queda caracterizado por una pendiente menos acusada del cambio de longitud de onda. En este último periodo se observa un nuevo cambio de pendiente (detalle A), debido a la apertura de la puerta de la cámara climática en la que se ejecutó el curado, con objeto de acelerar el proceso de

enfriamiento. Terminada esta fase, el cambio de longitud de onda del sensor de temperatura es prácticamente nulo, $\Delta\lambda = -0,02$ nm, mientras que el del sensor de deformación es de $\Delta\lambda = -0,196$ nm.

El cálculo del incremento de temperatura se presenta en la Figura 104 a y b para el ciclo completo de curado y el detalle de la fase a alta temperatura, respectivamente. Durante todo el ciclo los dos métodos de cálculo de temperatura aportan ΔT análogos, presentando las mayores diferencias en la fase de alta temperatura, siendo el valor proporcionado por el método indirecto $0,23^\circ\text{C}$ superior. La máxima temperatura medida es de 78°C , inferior a los 80°C establecidos para el curado. Esta diferencia vuelve a estar ocasionada por la falta de uniformidad de la temperatura en la cámara. La temperatura final registrada es de $23,36^\circ\text{C}$.

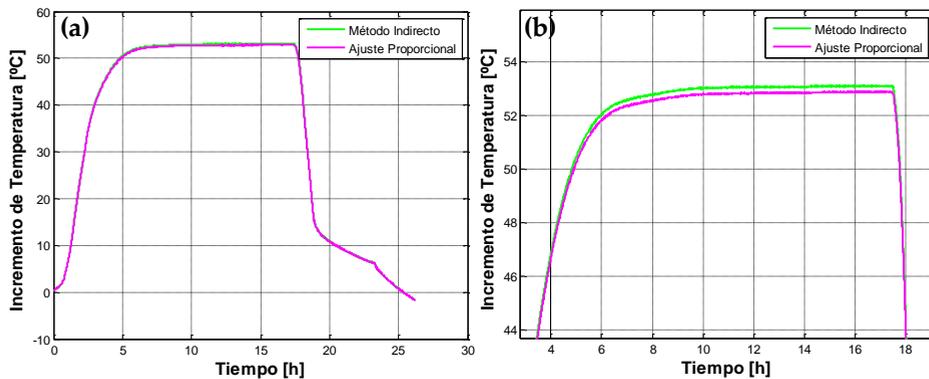


Figura 104. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a .

Conocido el ΔT se determinan las deformaciones (Figura 105). Como principal aspecto a destacar, resaltar que durante todo el ciclo las deformaciones registradas son negativas. Durante la fase de calentamiento se observa un fuerte descenso de las deformaciones hasta transcurridas 2,43 h, donde se produce un drástico cambio en el comportamiento creciendo las deformaciones. Dado la compleja respuesta mostrada por el sensor se dificulta la identificación de instante en el que finaliza la polimerización de la resina, que se produce transcurridas 8,4 h desde el inicio del proceso. El máximo de deformación se obtiene en el instante 9,53 h, en el que el valor estimado por el ajuste proporcional es de $-2 \mu\epsilon$ y por los otros dos procedimientos es de $-4 \mu\epsilon$. Esta es la máxima diferencia registrada entre los tres

procedimientos. Concluido el periodo de estabilización se inicia el enfriamiento, donde las deformaciones disminuyen de forma rápida en el enfriamiento controlado y con menor pendiente en la etapa de enfriamiento libre. Las deformaciones residuales medidas al final del proceso son coincidentes con los tres procedimientos, siendo de $-149 \mu\epsilon$.

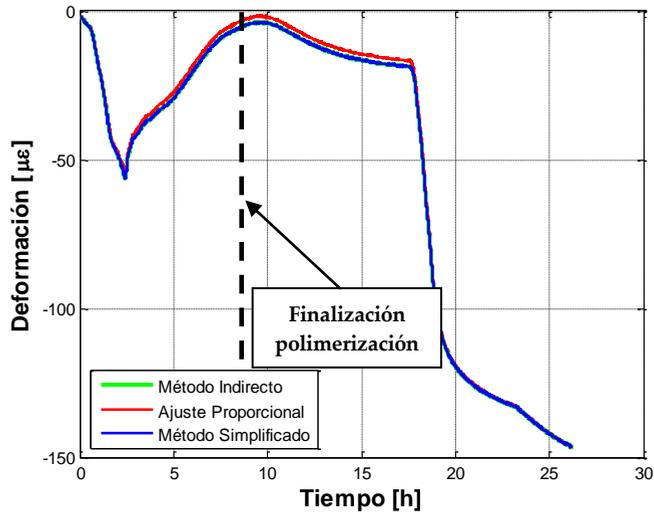


Figura 105. Medida de deformaciones en el panel N^o 3.

Los resultados correspondientes a los paneles N^o 4 y 5 se presentan en el Anexo B "Monitorización del Curado: Resultados de ensayos con material MRM57/T700S". En el caso de la probeta N^o 4 se repite el mismo comportamiento registrado en la N^o 3, volviendo a ser el cambio de longitud de onda del sensor de deformación inferior en el FBG de temperatura durante todo el ensayo, excepto alrededor de las 10 h, donde se alcanza el $\Delta\lambda$ máximo del sensor de deformación ($12 \mu\epsilon$). La deformación residual medida es de compresión ($-114 \mu\epsilon$). El fin de la polimerización de la resina se produce en torno al instante 8,4 h, coincidente con el punto de inflexión de la curva de deformación.

Para el último panel (N^o 5) se aprecia un comportamiento distinto al de las dos probetas anteriores: en este caso el $\Delta\lambda$ del sensor de deformación es mayor que el del sensor de temperatura, comportamiento esperado a priori, debido a deformaciones positivas o de tracción.

La polimerización de la resina queda caracterizada por el cambio de

comportamiento registrado durante la fase a alta temperatura, tras aproximadamente 8,4 h desde el inicio de la monitorización. Derivado de la etapa de enfriamiento se producen deformaciones residuales de compresión en la probeta, alcanzándose el valor final de $-38 \mu\epsilon$.

5.3. Resultados de ensayos con material Z19.732

La monitorización del curado con este material se ha realizado sobre dos probetas de $250 \times 250 \text{ mm}^2$, formadas por diez capas de pre-impregnado unidireccional siguiendo la secuencia de apilado [+45,-45,0,90,90,90,90,0,-45,+45]. Cada probeta presenta dos sensores situados entre las capas 5 y 6 (Figura 106). La salida de la fibra óptica del panel se efectúa por el lateral.

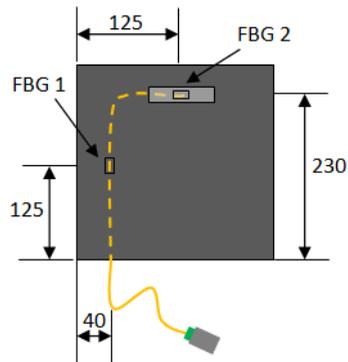


Figura 106. Esquema de la ubicación de las redes de Bragg en los paneles N^o 6 y N^o 7.

El curado de las dos probetas se realizó en un mismo proceso de fabricación en autoclave. En el interior de la bolsa de vacío se situaron dos termopares para registrar el cambio de temperatura. Este valor se toma como referencia, aunque es necesario resaltar que su ubicación difiere de la de los FBGs de temperatura, los cuales están embebidos en el material.

El cambio de longitud de onda de los sensores de fibra óptica embebidos en la probeta N^o 6 se muestra en la Figura 107. El incremento experimentado por el sensor de deformación es significativamente mayor que el del sensor de compensación durante la fase de aumento de temperatura. Esto se debe al flujo de

resina que tiene lugar en el material como consecuencia del calentamiento, hasta que se completa la polimerización de la misma. En todo el periodo a máxima temperatura, la variación de la longitud de onda del sensor de deformación es mayor que la del FBG de compensación, puesto que este sólo se ve sometido a los cambios de temperatura. Tras la finalización del curado se permite el enfriamiento completo de la probeta, volviendo a cero el $\Delta\lambda$ del sensor de compensación. En el FBG de deformación se aprecia un $\Delta\lambda$ final negativo, consecuencia de las deformaciones residuales del panel.

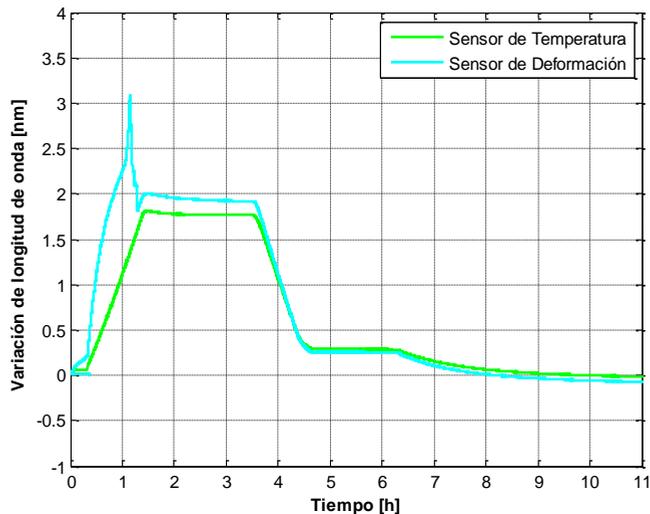


Figura 107. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura (panel N^o 6).

La señal reflejada por el sensor de deformación se muestra en la Figura 108. En esta se identifica el desplazamiento experimentado por la longitud de onda característica del FBG durante la fluencia de la resina, así como su regreso a valores próximos a los del inicio del ensayo a medida que avanza el curado. Estos desplazamientos de la longitud de onda reflejada van acompañados de variaciones en la intensidad de la señal, aumentando durante el calentamiento y volviéndose a reducir de forma significativa tras la polimerización.

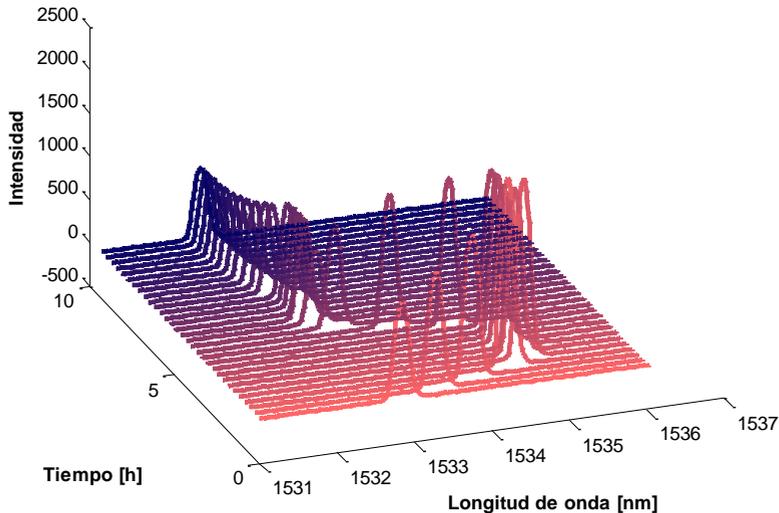


Figura 108. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 6).

Los cambios en la amplitud de la señal se aprecian de forma más clara en la Figura 109. Al inicio del ensayo la intensidad es de 1.148 AU, incrementándose hasta 1.844 AU al alcanzar la máxima temperatura. En este periodo de calentamiento se detecta un cambio de pendiente en la recta que une los máximos de los picos reflejados. Dicho cambio de pendiente se produce al superar la temperatura de transición vítrea de la resina (transcurridos 37 minutos desde el comienzo del ensayo, que se corresponde con una temperatura de unos 65°C). Durante el enfriamiento tiene lugar el efecto contrario, descendiendo la intensidad desde 1.086 AU previo al enfriamiento hasta 830 AU al final del mismo.

La Figura 110 muestra el cambio de temperatura. A máxima temperatura, el incremento estimado mediante el sensor de Bragg muestra una buena correlación con la lectura del termopar, siendo la medida proporcionada por el método indirecto 1°C superior a la de referencia, mientras que la obtenida con el proporcional es 2°C inferior. Al inicio de este periodo a 180°C el FBG registra un pico, ocasionado por la reacción exotérmica del curado de la resina. Las mayores diferencias se detectan en la segunda estabilización, donde la señal medida con el termopar muestra un valor superior al de la fibra óptica (6°C de diferencia con el método indirecto y 7°C con el proporcional). Tras esta segunda estabilización se permite el enfriamiento no controlado de la probeta, donde conforme aumenta el

tiempo de ensayo se incrementan las diferencias entre el FBG y el termopar.

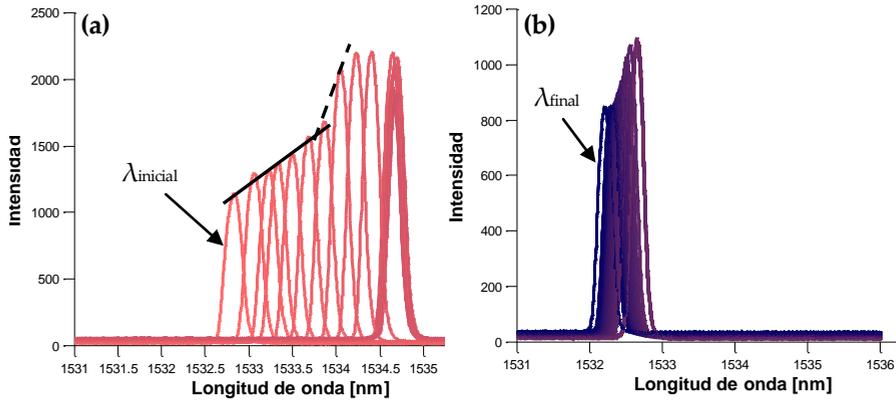


Figura 109. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N^o 6).

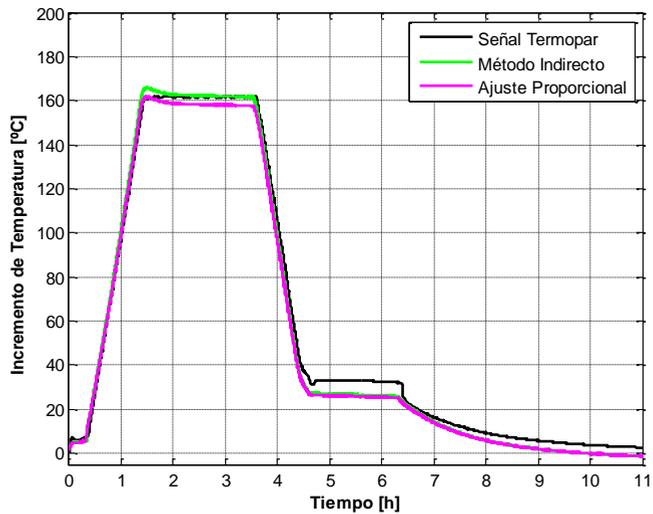


Figura 110. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 18,5°C).

Las deformaciones (Figura 111 a) presentan los máximos durante el calentamiento de la probeta y al comienzo de la fase a 180°C, debido a la fluencia de la resina. En este periodo se produce la polimerización, que se extiende durante 1,3 horas. Finalizada la polimerización tiene lugar una disminución significativa de las deformaciones, manteniéndose aproximadamente constantes hasta concluir la fase de temperatura máxima. Por último, se efectúa un enfriamiento controlado de la probeta, disminuyendo de forma progresiva las deformaciones.

Las deformaciones calculadas por los tres métodos son muy similares entre sí, encontrándose superpuestos los registros de los procedimientos indirecto y simplificado. Superado el proceso de polimerización de la resina, aparecen las mayores discrepancias entre los métodos proporcional y las otras dos aproximaciones, siendo estas de $37 \mu\epsilon$ (Figura 111 b). Las deformaciones residuales medidas al final del curado ascienden hasta las $-47 \mu\epsilon$ en los tres métodos.

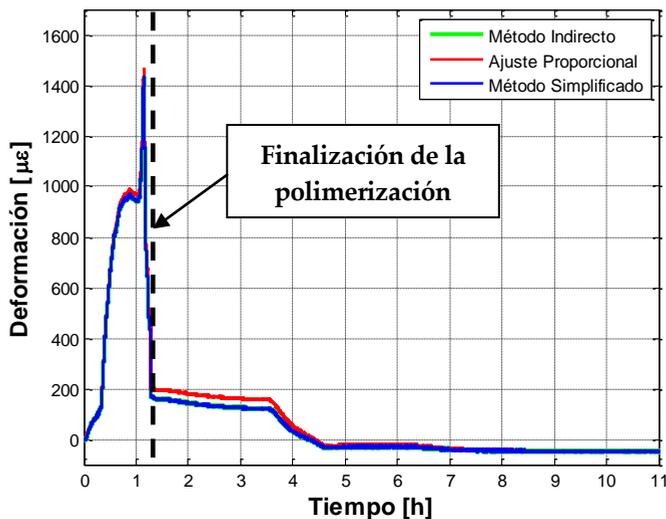


Figura 111. Medida de deformaciones en el panel N° 6.

Resultados similares a los anteriores se obtienen en el panel N° 7 (Anexo B "Monitorización del Curado: Resultados de ensayos con material Z19.732"). El efecto de la reacción exotérmica de la resina se manifiesta en la medida de temperatura, detectándose un pico en el ΔT medido con el sensor de Bragg al inicio de la etapa a máxima temperatura.

Las deformaciones máximas de la probeta se alcanzan durante la fluencia de la

resina, siendo de $1.177 \mu\epsilon$ con el método proporcional y $1.153 \mu\epsilon$ con el simplificado e indirecto. El proceso de polimerización finaliza transcurridas 1,3 h. Las deformaciones residuales inducidas en este caso son positivas, alcanzándose las $140 \mu\epsilon$ con los tres métodos de cálculo.

5.4. Discusión

Tradicionalmente, la monitorización del curado se ha realizado por diversas técnicas, como el análisis dieléctrico [LEN 2002, SHE 1996], la resonancia nuclear magnética [LEN 2002] o la calorimetría diferencial de barrido (DSC) [ADU 2010], entre otras. Todas estas técnicas analizan la evolución de las reacciones de polimerización que ocurren durante el ciclo, estudiando su grado de avance. Aunque dichos procedimientos muestran resultados satisfactorios a nivel de laboratorio, ninguno es válido para la cuantificación de deformaciones residuales originadas durante la manufactura de estructuras reales, lo cual puede resolverse con la utilización de FBGs. Dada la sensibilidad de las redes de Bragg a los efectos térmicos y mecánicos, para la discriminación de ambos efectos es necesario disponer de dos medidas independientes. Para ello, algunos autores proponen el empleo de sensores híbridos como Kang et al. [KAN 2002, KAN 2003] o de dos tipos de sensores de fibra óptica distintos, como FBGs y sensores Fabry-Perot [LEN 2002]. Aunque estas soluciones aportan resultados satisfactorios dificultan el proceso de análisis y adquisición de datos, siendo necesaria la utilización de distintos equipos de adquisición. La opción más extendida para resolver esta problemática coincide con la seguida en los ensayos efectuados, consistente en la utilización de dos redes de Bragg diferentes, una de las cuales se aísla de las deformaciones mecánicas por medio de un capilar metálico [COL 2007, SUN 2011]. En sus trabajos, Parlevliet et al. [PAR 2010] y Montanini et al. [MON 2007] utilizan tubos capilares con unas dimensiones exteriores e interiores de 1 mm y 0,6 mm en el primer caso y 0,6 mm y 0,4 mm en el segundo, respectivamente. Estos elementos introducen una fuerte distorsión en los laminados de material compuesto, dadas sus grandes dimensiones externas comparadas con las de la fibra de carbono. Asimismo, puesto que el diámetro exterior de la fibra óptica es de unos $250 \mu\text{m}$, es necesario el empleo de una resina epoxy resistente a alta temperatura para sellar ambos extremos del capilar metálico. En la campaña de ensayos realizada, las dimensiones del capilar seleccionado eliminan la necesidad de sellar el capilar.

Se ha realizado un total de cinco procesos de curado con el material MTM57/T7, divididos en dos fabricaciones. Todos los paneles presentan geometría y características análogas, difiriendo únicamente en la ubicación en planta de los sensores en el interior del laminado. En los paneles N° 1 y N° 2, durante la fase de incremento de temperatura y al comienzo de la estabilización, aparece un significativo aumento de la lectura de ambas redes de Bragg, asociados a la polimerización de la resina. Esto es consecuencia, en primer lugar a que en la etapa de calentamiento, la temperatura de transición vítrea de la resina se excede, lo que causa la fluencia de la misma dando lugar a un crecimiento de las deformaciones. A su vez, este proceso ocasiona una reacción exotérmica, que queda reflejada en el registro del sensor de temperatura. El fin de la polimerización se detecta mediante la disminución del cambio de longitud de onda de los dos sensores. Para el cálculo de las deformaciones residuales fue necesario permitir el completo enfriamiento de la probeta hasta alcanzar en el interior temperaturas similares a las del inicio del ensayo. Como consecuencia del enfriamiento, en ambas probetas se registra un crecimiento de las deformaciones, motivada por la aparición de esfuerzos de tracción en las regiones en las que se situaron los sensores embebidos. Deformaciones positivas en la fase de enfriamiento también se registraron en el artículo de Shen [SHE 2011]. En este estudio, varios laminados de CFRP fueron fabricados, integrando redes de Bragg en distintas posiciones del espesor. Algunos de los resultados se muestran en la Figura 112, donde se representa el incremento de longitud de onda de dos FBGs de deformación tras compensar en temperatura (n° 4 y 5). Se aprecia un crecimiento de las deformaciones en las fases III y IV, correspondientes con los periodos del curado de máxima temperatura y enfriamiento, respectivamente.

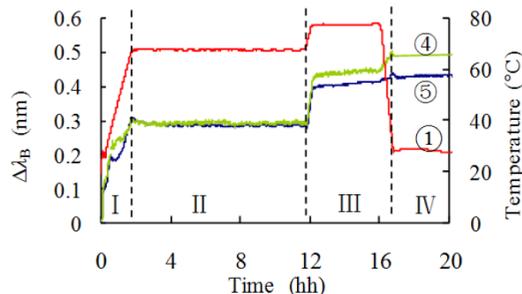


Figura 112. Incremento de la longitud de onda durante el curado de dos FBGs embebidos (n° 4 y 5) y registro de T^ra mediante termopar (n° 1) [SHE 2011].

El resultado del proceso de curado de los paneles N° 3, N° 4 y N° 5 muestra diferencias respecto a los anteriores, a pesar de ser dichas probetas análogas en configuración y características. Estas diferencias aparecen en las lecturas de los sensores de deformación, cuya magnitud depende de su localización en la probeta, mientras que los sensores destinados a la medida de temperatura presentan una respuesta similar. El aspecto más característico es que en los paneles N° 3 y N° 4, el cambio de longitud de onda del sensor de temperatura es mayor que el del sensor de deformación, debido a las deformaciones de compresión experimentadas por los laminados en la ubicación del FBG. La fluencia de la resina queda caracterizada por un fuerte descenso de las deformaciones al inicio del ensayo (durante el calentamiento). Trascorridas 8,4 h se registra el fin de la polimerización de la resina, mientras que en los paneles N° 1 y N° 2 este efecto se observa tras 6,7 h. Esta diferencia se debe al estado de polimerización parcial del material compuesto previo al curado. La etapa de enfriamiento origina un nuevo descenso de las deformaciones, registrándose valores negativos de las deformaciones residuales.

En el último proceso de fabricación se empleó un nuevo material para las probetas, el cual requería de presión para su curado así como una mayor temperatura aplicada. La configuración de la probeta, en cuanto a número de capas y secuencia de apilado también difería de los anteriores. Aunque de forma cualitativa la respuesta de los sensores embebidos es similar a la del panel N° 1, cuantitativamente se observan considerables diferencias. El efecto de la presión ejercida incrementa fuertemente las deformaciones producidas en la etapa de fluencia de la resina, siendo los máximos en los paneles N° 6 y N° 7 un orden de magnitud mayor que en el resto de componentes estudiados.

Este comportamiento coincide con los resultados encontrados en la bibliografía. Montanini et al., en los estudios presentados en [MON 2007], muestran la evolución de la longitud de onda de dos sensores FBG embebidos en un laminado de GFRP, uno destinado a la medida de deformaciones y otro para efectuar la compensación de temperatura. La evolución de las longitudes de ondas de estos sensores son análogas a las obtenidas en las probetas N° 6 y N° 7, detectándose los valores máximos durante la etapa de calentamiento, debido al curado de la resina y a la reacción exotérmica producida. Adicionalmente, estos autores comparan el cambio de longitud de onda con la curva de curado de la resina, obtenida mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) (Figura 113). Se corrobora que el pico registrado en el cambio de longitud de onda coincide con el proceso de

polimerización de la resina, cuya finalización se produce al término de la fase II (tras la disminución del cambio de longitud de onda y el comienzo del periodo de estabilización). Un efecto similar se aprecia en el trabajo de Collombet [COL 2007].

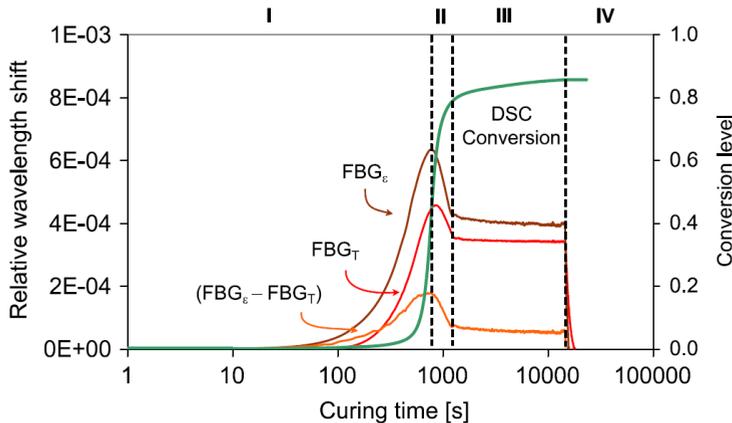


Figura 113. Superposición de las curvas de cambio de longitud de onda de los FBGs embebidos y del análisis de calorimetría diferencial de barrido [MON 2007].

Otro aspecto a destacar de los resultados obtenidos de estas probetas se deriva del análisis de la representación tridimensional del pico reflejado por el sensor de deformación. Uniendo los máximos de dichos picos durante la fase de calentamiento se detecta un instante en el que se produce un cambio de pendiente a causa de variaciones en su amplitud. Este cambio de pendiente refleja el instante en el que se supera la temperatura de transición vítrea de la resina y en el que comienza la fluencia [TSA 2009, CHI 2011 a, CHI 2011 b]. Los cambios en la amplitud de la señal son más acusados en los procesos de curado en los que se aplica presión, registrándose durante el calentamiento.

Aunque el estudio de la monitorización del ciclo de curado se ha realizado sobre laminados fabricados a partir de pre-impregnados, este procedimiento resulta una técnica viable y fácilmente extensible a otros métodos de fabricación tanto de compuestos (LRI, *pultrusión*, *filament winding*, etc.) como de otros tipos de materiales (p. e. fraguado de cemento).

6. IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FBG EN ENSAYOS ESTRUCTURALES

EL estudio con redes de Bragg realizado en las secciones anteriores se ha centrado en componentes de reducidas dimensiones, instrumentados con uno o dos sensores bajo situaciones de carga conocidas inicialmente. Con objeto de evaluar la validez de los desarrollos realizados sobre estructuras reales y en entornos relevantes de funcionamiento, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante los ensayos mecánicos de tres demostradores: (i) el ensayo *full-scale* de presurización de una cabina de CFRP, (ii) los ensayos de caracterización mecánica de dos pilares híbridos de CFRP y hormigón armado y (iii) los ensayos de tracción y flexión sobre un panel rigidizado. En los casos de la cabina y los pilares, las cargas aplicadas representan las condiciones reales de operación de dichas estructuras. El número de redes de Bragg situadas ha permitido caracterizar completamente la respuesta de los mismos.

6.1. Monitorización estructural de cabina CFRP

El primer caso de estudio consiste en la implementación de una red de 24 sensores FBG distribuidos sobre una cabina de avión de tamaño real. La cabina ha sido

diseñada y desarrollada por Airbus Defence & Space, en el Centro Bahía de Cádiz (Puerto de Santa María, Cádiz, España). La novedad más importante que aporta este componente es haber sido fabricada completamente en fibra de carbono, en un único proceso de fabricación mediante la tecnología de *fiber placement*. Sus dimensiones generales son 4 m de longitud y 2,6 m de diámetro máximo. Un esquema se presenta en la Figura 114.

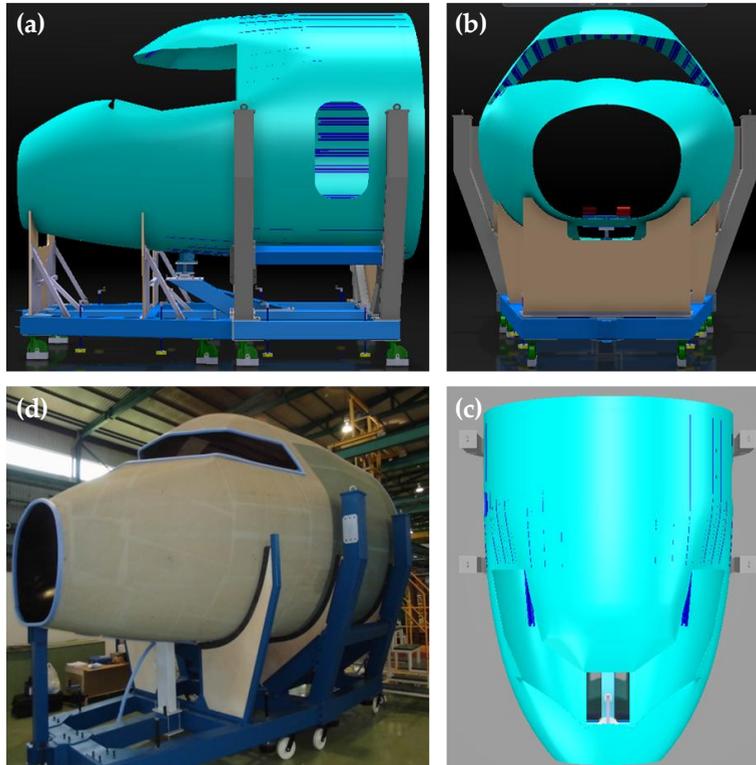


Figura 114. Modelo CAD de la cabina (a) perfil, (b) alzado y (c) planta; (d) cabina sobre rig de ensayo.

6.1.1. Plan de sensorización e implementación del ensayo

Sobre la cabina se realizan diversos ensayos de presurización, evaluando la estanqueidad y su resistencia estructural. La medida de las deformaciones se

efectúa mediante bandas extensométricas y sensores de Bragg. Con el objetivo de tener un valor de referencia en la distribución de las deformaciones, los sensores FBG se situaron próximos a las ubicaciones de las galgas. Además, dichas localizaciones coinciden con regiones de interés, debido a la influencia de concentradores de tensión (como las esquinas de la ventana o de la puerta de acceso) o zonas remachadas.

Las fibras ópticas fueron fabricadas *ad-hoc* para esta aplicación, evitándose la necesidad de realizar soldaduras para unir varios FBGs en una misma línea, lo cual puede ocasionar pérdidas de amplitud en la señal. Su recubrimiento es acrilato.

La distribución final de las redes de Bragg sobre la cabina se muestra en la Figura 115, donde las posiciones de los FBGs se indican mediante puntos sobre las líneas de fibra (representadas en color rojo). La distribución de fibra óptica abarca toda la superficie de la cabina (Figura 115), excepto el techo debido a la falta de acceso a esta región. La longitud total de cada línea de fibra es: 6,2 m (fibra óptica N° 1), 3,1 m (fibra óptica N° 2), 8,5 m (fibra óptica N° 3) y 8,8 m (fibra óptica N° 4).

La fijación de la fibra óptica a la superficie se realizó tras la instalación de las galgas y el rutado de los cables. Esto dificultó el proceso de integración de los sensores, debido a que las líneas de fibra deben evitar los obstáculos en su recorrido. Por otra parte, la gran longitud de las fibras junto con las grandes dimensiones de la cabina aumentan el riesgo de rotura. La instalación de los circuitos de fibra óptica fue realizada usando la herramienta de posicionamiento de fibra (cuya descripción se detalla en el Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto"), que permitió la integración de la fibra de forma simple, sin que se produjera la rotura de ninguna fibra, en un corto periodo de tiempo y en un entorno industrial real.

La Figura 116 muestra algunos detalles de la instalación de fibra, donde puede apreciarse la línea 2 (Figura 116 a y c), la línea 4 (Figura 116 b) y la línea 1 (Figura 116 d). Se observan numerosas curvas y giros en el recorrido de la fibra, con el fin de ubicar los sensores FBG en su correcta posición.

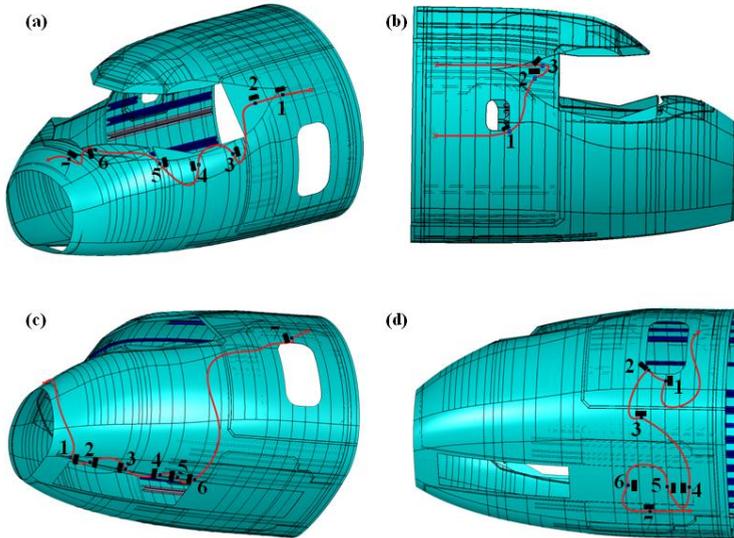


Figura 115. Circuitos de fibra óptica (a) línea 1, (b) línea 2, (c) línea 3 y (d) línea 4. Las posiciones de las bandas extensométricas se representan en negro.

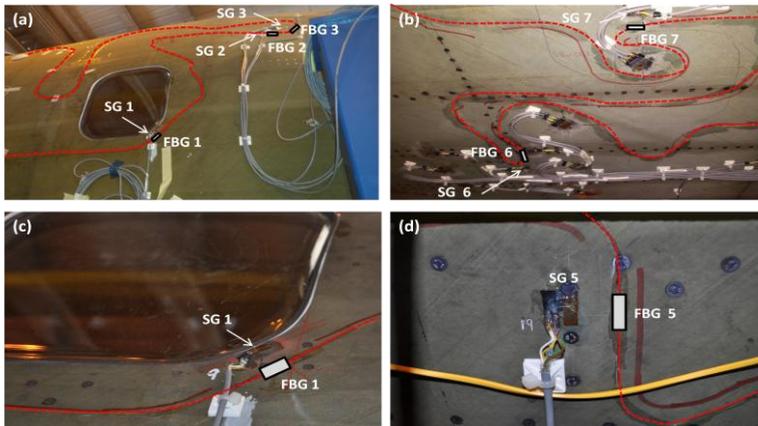


Figura 116. Imágenes de detalle de la instalación de fibra óptica en la superficie de la cabina: (a) línea 2, (b) línea 4, (c) línea 2 y (d) línea 1. El recorrido de la fibra óptica ha sido destacado mediante líneas discontinuas.

En cada fibra se han instalado conectores ópticos en ambos extremos, como medida de seguridad redundante contra una posible rotura durante la manipulación de la cabina. Los dispositivos para fijación de conectores (descritos en el Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto") se han empleado, permitiendo adherir toda la longitud del cable de fibra a la estructura y aumentando la robustez de la instalación (Figura 117). La configuración final de la línea de fibra para la medida se muestra en la Figura 117 b, donde se ha conectado el cable adicional (latiguillo) entre los sensores y el equipo interrogador.

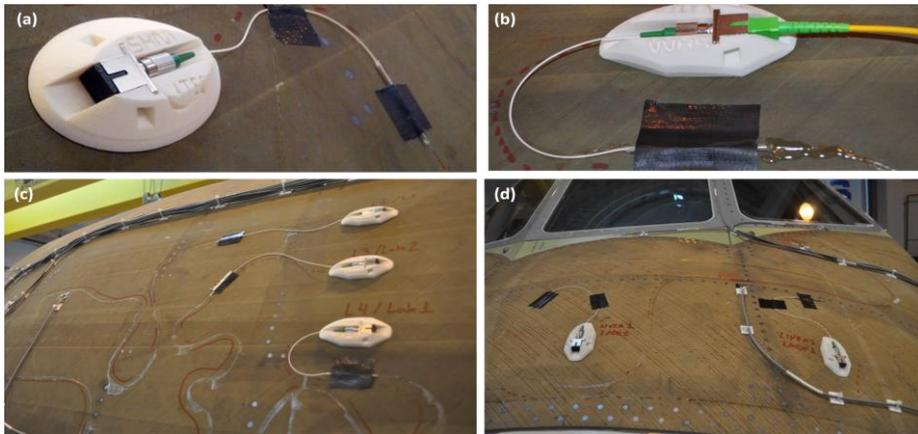


Figura 117. Detalles de la instalación de fibra óptica en la superficie de la cabina: dispositivos para fijación de conectores.

6.1.2. Resultados

Se han realizado dos ensayos de presurización, alcanzando 3 y 7,7 psi (20684,3 y 53089,6 Pa), siendo este último la carga límite de diseño de la estructura (considerando el factor de reserva).

- **Ensayo hasta 3 psi (20684,3 Pa)**

En este ensayo la máxima presión interna aplicada fueron 3 psi. Dicho valor fue alcanzado con incrementos sucesivos de presión en los siguientes pasos: 1; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75 y 3 psi. Tras esto, la presión interna fue liberada hasta 0,29 psi. Una segunda presurización se realizó hasta 1,5 psi, con la posterior despresurización completa de la estructura. Las medidas de los sensores de fibra óptica para la

primera línea de fibra óptica se presentan en la Figura 118. Las lecturas del resto de sensores se muestran en el Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de cabina CFRP”.

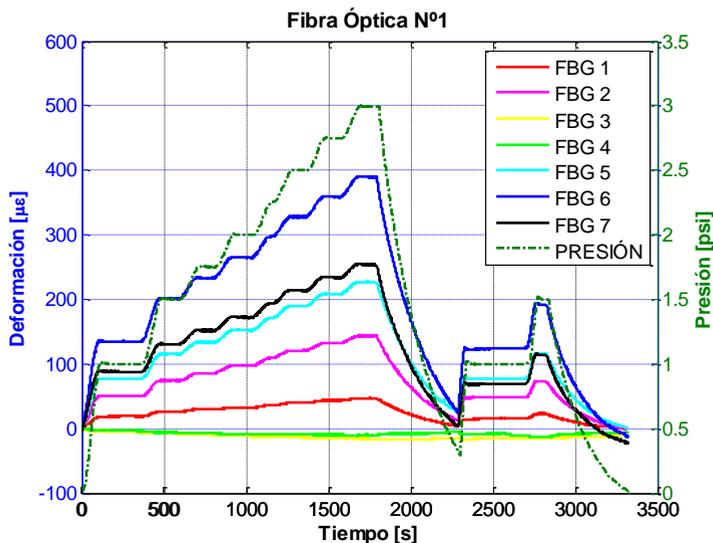


Figura 118. Medida de deformación de sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 1).

A través del análisis del registro de los sensores es posible identificar los distintos intervalos de carga. El máximo valor de deformación positiva se detecta en el FBG 3 de la fibra óptica N° 2 ($553 \mu\epsilon$), correspondiente con el sensor más próximo al techo de la cabina. El mínimo se registra por el sensor N° 2 de la línea N°3 ($-132 \mu\epsilon$). Este sensor se sitúa junto al hueco del tren de aterrizaje. Ambos valores fueron medidos cuando la presión interna aplicada era de 3 psi.

La comparación entre la lectura de las bandas extensométricas y las redes de Bragg se presenta en la Tabla 21 para una presión de 3 psi. En algunos casos se detectan discrepancias significativas, incluso registrándose valores de deformación de signo contrario. Aunque los sensores de fibra fueron posicionados lo más próximos posible a las galgas extensométricas, la presencia de concentradores de tensión puede ocasionar grandes cambios de deformación en distancias cortas. Además, dado que la fibra fue adherida a la superficie tras la instalación de las galgas, la distancia entre ambos dispositivos excede los 15 cm en algunas localizaciones.

Tabla 21. Comparación de medidas de deformación de sensores FBG y galgas extensométricas a 3 psi.

Línea	Sensor	Nº 1 [$\mu\epsilon$]	Nº 2 [$\mu\epsilon$]	Nº 3 [$\mu\epsilon$]	Nº 4 [$\mu\epsilon$]	Nº 5 [$\mu\epsilon$]	Nº 6 [$\mu\epsilon$]	Nº 7 [$\mu\epsilon$]
1	FBG	47	143	-17	-10	227	389	253
	SG	23	168	-124	-159	-26	397	171
2	FBG	370	167	105	-	-	-	-
	SG	707	195	148	-	-	-	-
3	FBG	389	-132	105	361	-21	381	-13
	SG	378	-90	-207	-215	-35	349	13
4	FBG	-56	145	-20	212	262	210	136
	SG	-36	376	-29	150	120	188	169

En el caso de la fibra óptica Nº 1, las máximas diferencias se detectan entre los sensores identificados con el Nº 5. En este caso, la galga estaba fijada en una región remachada, donde una cuaderna se une a la piel de la estructura. Aunque la distancia entre ambos dispositivos era menor de 2 cm (Figura 116 d), el sensor de fibra estaba adherido fuera del área de remaches, produciéndose como consecuencia grandes diferencias entre los registros de deformación.

La diferencia más importante en el circuito Nº 2 se identifica en el sensor Nº 1. Como se observa en las Figura 115 b y Figura 116 c, ambos dispositivos están situados en una región bajo el efecto de un concentrador de tensiones, producido por la geometría de la esquina de la ventana. El sensor FBG se situó a una distancia de 3,5 cm desde la esquina, mientras que la galga estaba sólo a 1 cm. Esto explica la gran reducción del valor de las deformaciones desde la galga al sensor de fibra.

Las diferencias observadas en el circuito Nº 3 se deben a la distancia existente entre los dos tipos de sensores. La mayor diferencia coincide con la pareja de sensores localizada más lejos el uno del otro (Nº 4), más de 15 cm.

En el último circuito de fibra, los dispositivos identificados con los Nº 2 y 5 presentan valores muy diferentes entre sí. El motivo en el primer caso es otro concentrador de tensiones, coincidente con la esquina inferior izquierda de la puerta. Dado que la posición de la galga es más cercana a la esquina, su medida de deformación es mayor que el valor del FBG. Para los sensores Nº 5, las

discrepancias en las deformaciones están producidas por la gran distancia entre ambos dispositivos.

En aquellos casos en los que ambos sensores pudieron ser situados próximos entre sí y no se encontraban bajo el efecto de concentradores de tensión se aprecia una buena correspondencia entre las dos lecturas, como en los dispositivos N° 1, 2 y 6 de la línea N°1, el N° 2 de la línea N°2, los sensores N° 1, 5 y 6 de la línea N°3 y los N° 1, 3, 6 y 7 de la línea N° 4.

- **Ensayo hasta 7,7 psi (53089,6 Pa)**

El objetivo de este segundo ensayo fue evaluar la integridad estructural de la cabina hasta carga límite. Previamente a la ejecución de este ensayo, se realizaron nuevos trabajos sobre la superficie del componente para la instalación de sensores adicionales (galgas y acelerómetros). Estas actividades llevan asociadas operaciones de lijado de la superficie y rutado de cables, que causaron la rotura de la fibra óptica N° 1 en tres puntos. Como consecuencia, esta fibra quedó inutilizada para la medida durante este ensayo. El resto de fibras resistió todas las operaciones.

La presión interna se aplicó en incrementos desde 0 hasta 7,7 psi. Para valores de presión próximos a carga límite, la amplitud de cada incremento se redujo, verificando en cada paso el estado de la cabina. Tras alcanzarse el máximo el componente fue descargado. La medida de los sensores durante el ensayo se muestra en la Figura 119 para la línea 2, y en el Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de cabina CFRP” para el resto de líneas.

Resultados similares a los del ensayo anterior se obtuvieron en este caso. Los valores registrados presentan el máximo en el FBG 3 de la línea N° 2 ($1221 \mu\epsilon$, Figura 119) y el mínimo en el sensor de Bragg N° 2 de la fibra óptica N° 3 ($-335 \mu\epsilon$), cuando la presión aplicada es de 7,7 psi.

La integridad estructural de la cabina hasta carga límite fue verificada mediante este ensayo de presurización.

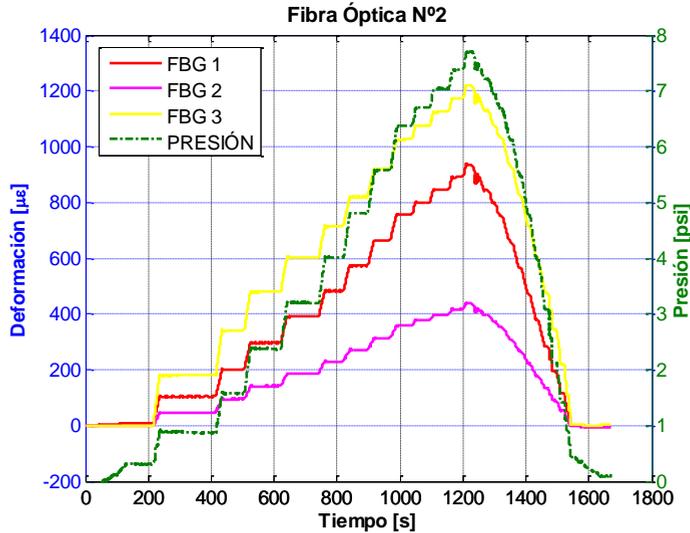


Figura 119. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 2).

6.2. Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono

El segundo caso de estudio se ha centrado en elementos representativos de la industria civil, que es otro de los campos con mayor potencial de desarrollo para las redes de Bragg. Se trata de dos pilares de hormigón armado fabricados por ACCIONA Infraestructuras, que presentan un refuerzo exterior de fibra de carbono. Estos elementos fueron sometidos a ensayos de compresión hasta la rotura. La monitorización de los ensayos se realizó mediante sensores FBG y galgas extensométricas. Para su fabricación se ha empleado el hormigón HA-25/B/II-a, con una resistencia característica a compresión de 25 MPa, y una resistencia media a compresión de 28 MPa, calculada a partir de ensayos sobre probetas cilíndricas normalizadas. El armado del hormigón se ha efectuado mediante barras de acero B500S con un límite elástico de 500 MPa.

Los pilares de hormigón se han reforzado exteriormente mediante *roving* de fibra de carbono impregnado con resina epoxy, usando la tecnología de *filament winding*.

La fibra de refuerzo se enrolló perpendicularmente al eje del pilar, en un tramo de 600 mm de longitud, con el objetivo de incrementar su capacidad portante así como la capacidad de deformación del hormigón bajo cargas de compresión en dirección longitudinal. Este efecto se consigue gracias a que la fibra de carbono transversal, cargada en tracción debido a la dilatación del hormigón, proporciona una presión de confinamiento lateral al hormigón. Las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de carbono empleada en el refuerzo son: densidad 1,8 g/cm³, resistencia a tracción 4.900 MPa, módulo a tracción 230.000 MPa y deformación a rotura 2,1%. Los pilares ensayados se muestran en la Figura 120, identificados como P1 y P2.

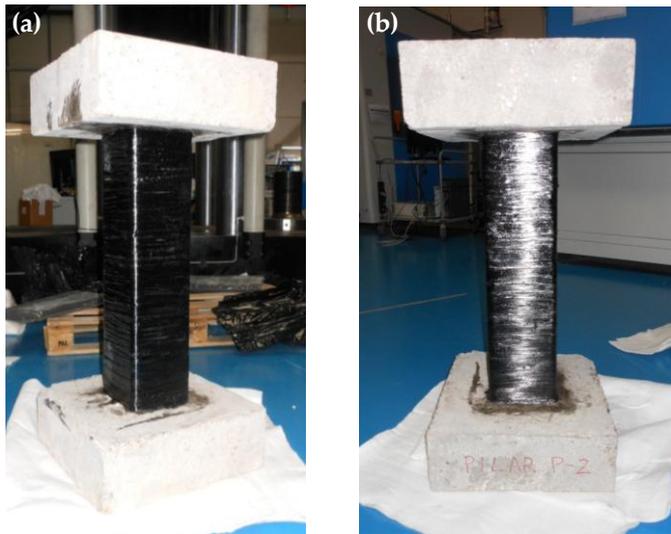


Figura 120. Imágenes de los pilares ensayados (a) P1 y (b) P2.

6.2.1. Plan de sensorización e implementación del ensayo

Las pruebas de compresión se han realizado en una máquina de ensayos INSTRON, modelo PL4000KN. Para la transmisión de la carga desde la máquina a los pilares, así como para mejorar el apoyo de los mismos, se han empleado dos placas de acero, de 10 y 30 mm de espesor, respectivamente y con unas dimensiones de 50 x 50 mm² en ambos casos. En la Figura 121 se muestra la configuración de las probetas para ensayo.



Figura 121. Ensayo de pilar de hormigón armado reforzados con CFRP.

El estado de deformación producido en las probetas como consecuencia de la carga aplicada se registra mediante los sensores indicados en la Figura 122. En primer lugar, un total de ocho galgas extensométricas se instalaron en cada pilar, distribuidas entre las cuatro superficies. En cada una, dos galgas se situaron en el punto central de la misma, una para la medida de las deformaciones en la dirección de aplicación de la carga (dirección longitudinal) y otra para las deformaciones en dirección transversal (Figura 124 a). Adicionalmente, cuatro redes de Bragg se adhirieron al refuerzo de fibra de carbono, en dirección transversal a la carga (alineados con la fibra de carbono), y ubicados en las esquinas del pilar en la sección central del mismo (Figura 124 d). Las pequeñas dimensiones de los sensores de fibra óptica hacen posible su instalación en esta localización. El dispositivo para fijación de conector se ha empleado en esta aplicación (Figura 123), permitiendo amarrar el conector óptico a la base del pilar y evitando la presencia de cables de fibra sin fijación a la estructura (con el consiguiente riesgo de rotura que esto conlleva). Los sensores de fibra óptica empleados son de la marca Micron Optics, OS1100, con recubrimiento de poliimida. Los cuatro sensores se ubicaron en una misma fibra óptica obtenida a través de la soldadura de cuatro fibras.

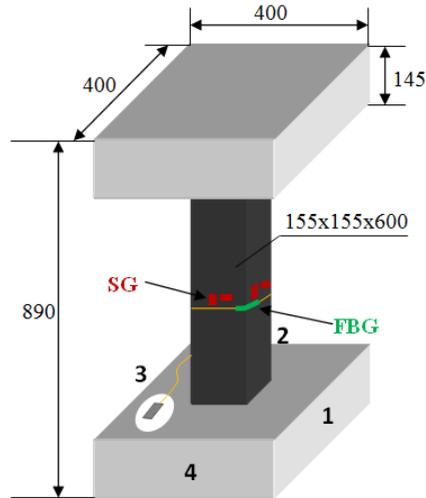


Figura 122. Dimensiones del pilar y configuración de sensores.

Por último, se empleó el sistema de correlación digital de imágenes PONTOS, de la marca GOM, para el registro de los desplazamientos en una de las superficies durante los ensayos. Este equipo permite medir desplazamientos con una precisión de hasta $70\ \mu\text{m}$, sin necesidad de contacto con el espécimen ensayado. Se coloca de forma que en todos los casos se monitoricen los desplazamientos de la superficie 4 del pilar ensayado (Figura 124 b y c).

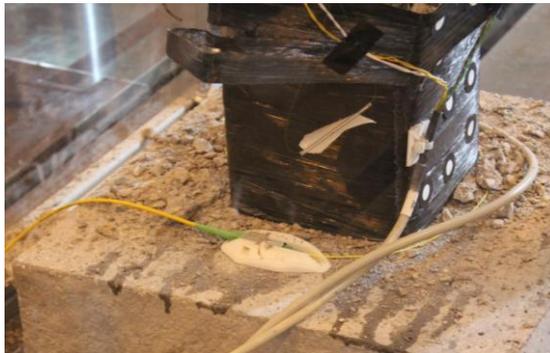


Figura 123. Detalle del dispositivo protector de conector de fibra óptica.

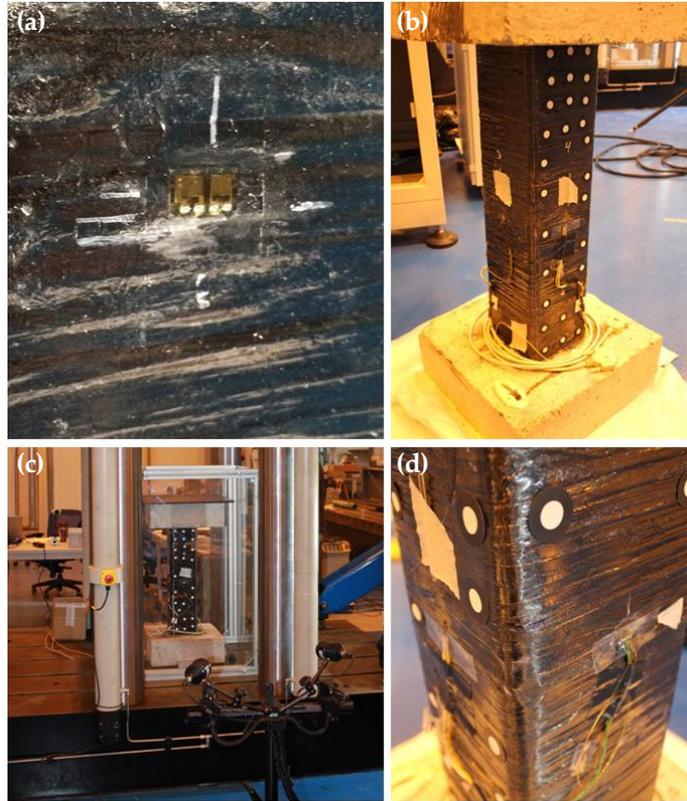


Figura 124. Detalles de la sensorización de los pilares (a) galgas extensométricas instaladas sobre el recubrimiento de carbono, (b) marcadores para medida con sistema PONTOS, (c) disposición del sistema PONTOS durante la medida y (d) detalles de los sensores de fibra óptica y las bandas extensométricas.

Dada la diferente ubicación de los sistemas de monitorización de las probetas (galgas, FBGs y PONTOS) no es posible establecer una comparativa directa entre sus registros de medida. El objetivo de la instrumentación realizada ha sido obtener la mayor cantidad de información posible de cada elemento, aprovechando las ventajas de cada tipo de sensor para una completa caracterización del estado de los pilares.

6.2.2. Resultados

- **Pilar P1**

El ensayo del primer pilar se divide en dos periodos de carga:

-Precarga: esta etapa tiene como objetivo conocer el comportamiento de la estructura. Se realiza con control manual en desplazamiento de la máquina, hasta un nivel de carga de 400 kN. Posteriormente se aumenta la fuerza hasta 700 kN, con la siguiente descarga del espécimen.

-Rotura: el segundo periodo de carga consistía en 30 ciclos entre 340 y 1.020 kN, con control en fuerza de la máquina de ensayos y tasa de aplicación de 15 kN/s (según la planificación inicial del ensayo). Sin embargo, durante la ejecución del primero de los ciclos se produjo el fallo de la probeta, siendo imposible continuar la prueba.

Periodo I: Precarga

Las deformaciones medidas con las redes de Bragg durante la precarga se muestran en la Figura 125. En esta se ha superpuesto la carga aplicada durante este periodo. Se aprecia como inicialmente la fuerza se eleva desde 0 hasta 100 kN, donde se mantiene unos minutos, para seguidamente incrementarse hasta los 400 kN. En este nivel de carga se realiza una estabilización de unos 5 minutos, durante la cual se produce una disminución de la fuerza registrada hasta su estabilización en torno a los 350 kN. Esto puede estar ocasionado por la relajación de la estructura ensayada. Finalmente, la carga se aumenta hasta los 700 kN aproximadamente, no efectuándose una clara estabilización en este periodo. La fuerza máxima alcanzada durante la precarga es de 731,25 kN, correspondiente a un desplazamiento del travesaño de 8,30 mm.

Analizando el registro de los sensores, el aspecto fundamental a destacar son las significativas diferencias que aparecen entre las lecturas de las cuatro redes de Bragg. Dado que los cuatro FBGs se han situado en la misma sección transversal de la probeta, cabe esperar que sus valores sean muy similares entre sí, con leves diferencias ocasionadas por discrepancias relativas a la alineación de la fibra. Sin embargo, como se observa en la Figura 125, aunque el comportamiento de todos los sensores es análogo (siguiendo el perfil de carga) las deformaciones mediadas por el sensor FBG 1 son muy superiores a las del resto. A este le siguen (ordenados de forma decreciente) FBG 2, FBG 3 y FBG 4.

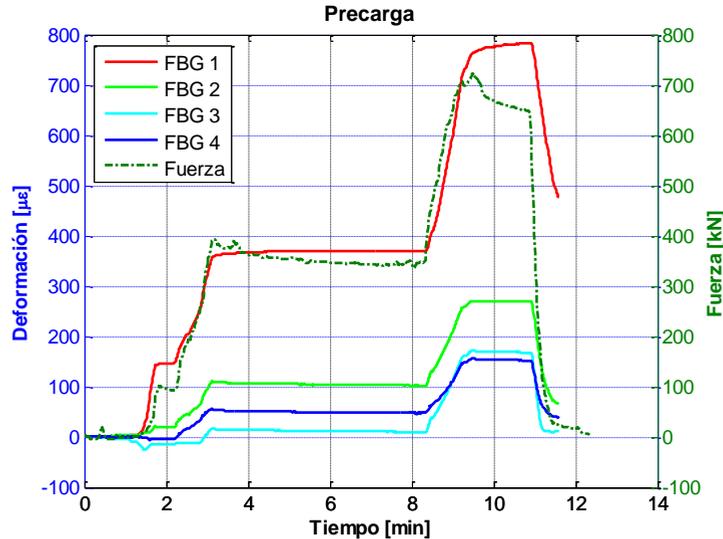


Figura 125. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo I: precarga.

Estas diferencias entre las cuatro medidas revelan una falta de alineación entre el espécimen y la máquina de ensayos, como consecuencia de la falta de paralelismo entre las superficies de apoyo de la probeta. Esto ocasiona un reparto desigual de la carga en la superficie de la probeta, dando como resultado diferentes niveles de deformación según el punto de medida considerado.

Otro detalle a señalar es el comportamiento detectado en los sensores FBG 3 y FBG 4. Se comprueba que desde el inicio del ensayo hasta aproximadamente los 630 kN, la medida registrada por el FBG 4 es mayor que la del sensor FBG 3, produciéndose en este punto un cambio en este comportamiento, derivado del acomodo de la probeta a la carga aplicada.

Tras la finalización de la prueba la probeta se descarga completamente. Sin embargo, el recorrido marcado por el LVDT no retorna a valor nulo, sino que se mantiene en 2,75 mm, lo cual indica que se ha producido deformación permanente en el pilar. Esto coincide con lo observado en la Figura 125, donde los sensores de Bragg registran valores positivos de deformación al término del ensayo.

Estos efectos también pueden apreciarse en las medidas obtenidas con las galgas extensométricas, mostradas en el Anexo C "Implementación de la Tecnología FBG

en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono”.

La diferente ubicación de los sensores FBG y de las galgas junto con la falta de alineación de la carga no permite la comparación de sus registros. No obstante, en la Tabla 22 y Tabla 23 se muestra a modo de resumen el valor máximo registrado por cada dispositivo así como su lectura tras la descarga del pilar, respectivamente.

Tabla 22. Valores máximos de deformación registrados durante la precarga por las galgas extensométricas y las redes de Bragg.

Sensor	Nº 1 [με]	Nº 2 [με]	Nº 3 [με]	Nº 4 [με]
Galgas Extensométricas Transversales	677	633	308	213
Galgas Extensométricas Longitudinales	-1.474	-2.149	-957	-766
Redes de Bragg	784	271	172	155

Tabla 23. Valores de deformación registrados por las galgas extensométricas y las redes de Bragg al finalizar la fase de precarga.

Sensor	Nº 1 [με]	Nº 2 [με]	Nº 3 [με]	Nº 4 [με]
Galgas Extensométricas Transversales	164	202	41	28
Galgas Extensométricas Longitudinales	-184	-469	-63	-73
Redes de Bragg	477	66	12	40

Periodo II: Rotura

La segunda parte del ensayo se corresponde con el periodo de ciclado. En primer lugar, se produce la carga del pilar hasta 660 kN, con un desplazamiento del pistón de 3,4 mm. A continuación se inician los ciclos de fatiga, disminuyendo la fuerza hasta los 337 kN y volviéndola a aumentar hasta alcanzar 1.005 kN, punto en el que se produce la rotura del pilar. Tras el fallo la fuerza aplicada disminuye de forma abrupta a consecuencia de la pérdida de capacidad portante de la probeta.

En la Figura 126 se representan las deformaciones medidas por los sensores FBG.

La falta de alineamiento de la probeta con la carga aplicada vuelve a quedar patente, siendo las lecturas de los cuatro sensores muy diferentes entre sí a pesar de encontrarse en la misma sección transversal. Al inicio del ensayo (con valor nulo de carga aplicada) la deformación registrada por los sensores FBG es distinta de cero, debido a la deformación plástica sufrida por el componente en el periodo anterior. En el caso del sensor FBG 1 se identifica una ligera disminución respecto al valor final registrado tras la precarga ($477 \mu\epsilon$ vs $368 \mu\epsilon$). Dicha diferencia puede deberse a la relajación de la estructura. En el resto de sensores no se detectan cambios significativos entre los valores de deformación finales de la precarga y de inicio de esta fase.

Aunque la rotura del pilar se produjo para una carga de 1.005 kN, en la Figura 126 se aprecia que se pierde la lectura de los sensores de Bragg a partir de 800,4 kN. En este punto las redes de Bragg comienzan a experimentar un "estrangulamiento" debido a la presión lateral que ejercen las fibras de refuerzo del material compuesto sobre la fibra óptica, perdiéndose la lectura del pico reflejado por el sensor (aunque no se haya producido la rotura de la fibra óptica). Al igual que durante la precarga, el FBG 1 vuelve a ser el sensor que registra las mayores deformaciones durante todo el ensayo, seguido del FBG 2. En el caso de las redes de Bragg 3 y 4 los valores presentados son muy similares entre sí.

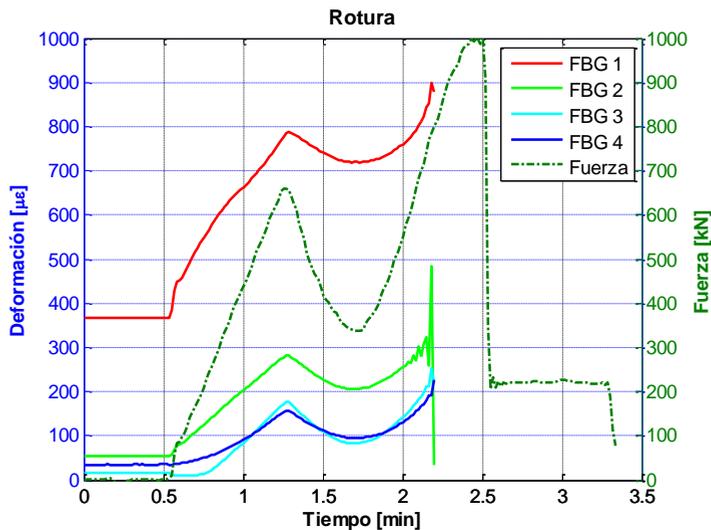


Figura 126. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo II: rotura.

Los resultados extraídos con las galgas se presentan en el Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono”, cuya lectura se taró a cero previamente al inicio del ensayo.

Como se observa en la Tabla 24, las galgas SG-T4 y SG-L4 son las que mayores valores de deformación presentan en el punto de máxima fuerza. Sin embargo, esta superficie es la menos cargada durante prácticamente la totalidad de la prueba. Esto puede estar ocasionado por un cambio en las condiciones de contorno durante la aplicación de la carga, debido al apoyo irregular sobre la superficie del pilar.

Tabla 24. Lecturas de las galgas extensométricas transversales y longitudinales en el instante de máxima carga aplicada (1005 kN).

Sensor	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]
Galgas Extensométricas Transversales	3.307	4.445	5.965	6.318
Galgas Extensométricas Longitudinales	-535	-1.965	-2.369	-5.884

Por último, para obtener un mayor conocimiento del comportamiento del pilar durante la rotura, en la Figura 127 se presentan los resultados obtenidos con el sistema PONTOS. Los instantes representados se corresponden con los valores de carga de (a) 0 kN, (b) 659 kN, (c) 337 kN y (d) 999,4 kN. La Figura 127 d coincide con un instante posterior al fallo del pilar, donde los desplazamientos en la parte superior alcanzan los 10 mm.

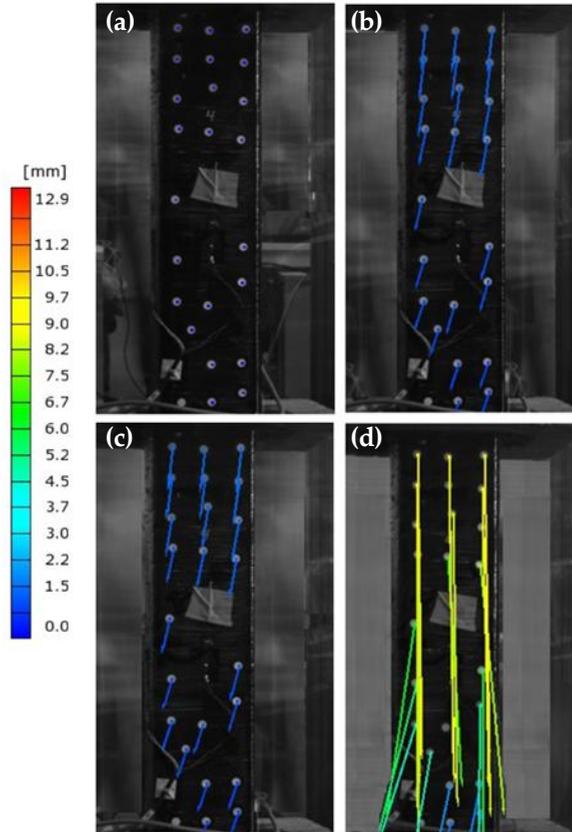


Figura 127. Campos de desplazamientos (major displacement) en cuatro instantes del periodo de rotura: (a) 0 kN, (b) 659 kN, (c) 337 kN y (d) 999,4 kN.

Finalmente, en la Figura 128 se muestran imágenes del pilar P1 tras la rotura donde se aprecia el daño del hormigón armado.

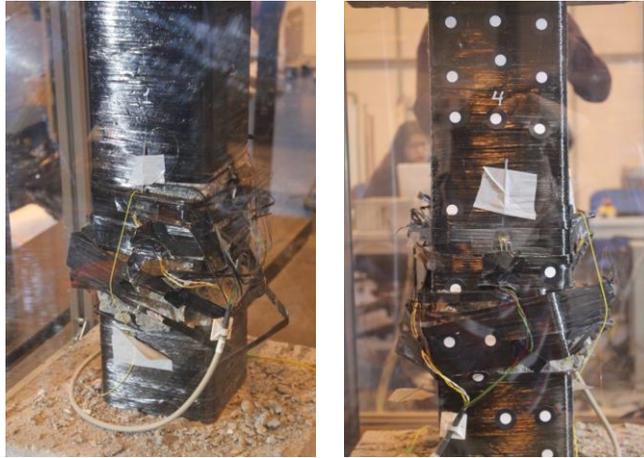


Figura 128. Imágenes del pilar P1 tras la rotura.

- **Pilar P2**

El ensayo realizado sobre el segundo pilar se divide en cuatro fases de carga:

- Precarga: esta fase es análoga a la del pilar P1. Efectuando un control manual en desplazamiento de la máquina, la carga se eleva hasta alcanzar 400 kN. Posteriormente, se vuelve a aumentar hasta 700 kN, seguido de la descarga completa del elemento.

- Ciclos a bajo nivel de carga: se aplican 100 ciclos entre 300 y 700 kN, con control en carga de la máquina y frecuencia de ensayo de 0,025 Hz (onda seno). Tras su finalización se descarga el pilar.

- Ciclos a alto nivel de carga: en la tercera etapa se aplican nuevamente ciclos, en este caso entre 300 y 800 kN, controlando en carga la máquina y con una frecuencia de ensayo de 0,02 Hz (onda sinusoidal).

- Rotura: en el último periodo la fuerza sobre el espécimen es elevada hasta el fallo del mismo, realizando un control en desplazamiento.

Periodo I: Precarga

El registro de los sensores de Bragg durante la fase de precarga se muestra en la Figura 129. Se aprecia como la carga se eleva desde 0 hasta 400 kN, valor en el que se efectúa una estabilización de varios minutos. Durante dicha estabilización la

fuerza ejercida disminuye hasta los 317 kN, a consecuencia de la relajación tanto de la estructura como de los apoyos de la misma. Posteriormente, la carga se aumenta hasta 700 kN, instante en el que se produce la descarga completa del componente. Durante el último ascenso de la carga se registra una reducción momentánea de la fuerza, tras la que se continúa cargando la probeta.

El análisis de los datos medidos con las redes de Bragg revela de nuevo una aplicación excéntrica de la carga, identificándose distintos niveles de deformación para cada uno de los sensores FBG. De forma análoga a la probeta P1, en este caso vuelve a ser el FBG 1 el que registra una mayor deformación, seguido del FBG 2, el FBG 4 y por último el FBG 3, debido a la falta de paralelismo de las caras de apoyo de la probeta.

Tras la descarga se comprueba la presencia de deformación permanente en el pilar, al no volver a cero las deformaciones para un valor de carga nulo.

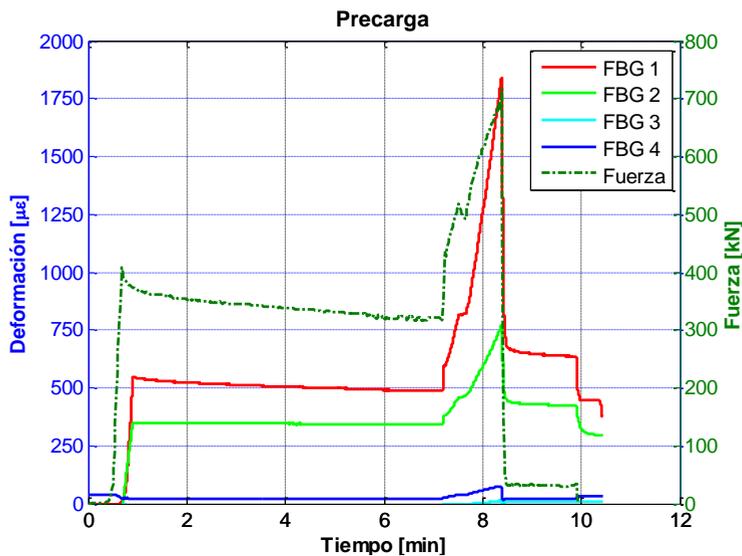


Figura 129. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo I: precarga.

Las lecturas de las galgas extensométricas se presentan en el Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono”, para las bandas situadas en dirección transversal y longitudinal. El valor máximo de

deformación registrado por cada dispositivo de medida se presenta en la Tabla 25. Se verifica la coherencia de los resultados, alcanzándose las mayores deformaciones de las galgas en la superficie 2 y con las redes de Bragg en el FBG 1, situado en la esquina entre las superficies 1 y 2.

Tabla 25. Valores máximos de deformación registrados durante la precarga por las galgas extensométricas y las redes de Bragg.

Sensor	Nº 1 [μ€]	Nº 2 [μ€]	Nº 3 [μ€]	Nº 4 [μ€]
Galgas Extensométricas Transversales	515	1.538	866	87
Galgas Extensométricas Longitudinales	-908	-3.760	-1.880	-189
Redes de Bragg	1.842	768	12	76

La deformación residual del pilar tras la descarga se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26. Valores de deformación registrados por las galgas extensométricas y las redes de Bragg al finalizar la fase de precarga.

Sensor	Nº 1 [μ€]	Nº 2 [μ€]	Nº 3 [μ€]	Nº 4 [μ€]
Galgas Extensométricas Transversales	124	648	117	4
Galgas Extensométricas Longitudinales	-44	-1.087	-388	41
Redes de Bragg	471	362	11	29

Periodo II: Ciclos a bajo nivel de carga

La segunda fase del ensayo consiste en un ciclado comprendido entre 300 y 700 kN. Para una mejor visualización de los resultados, la carga aplicada no se ha superpuesto al registro de los sensores. Finalizados los 100 ciclos se procede a la descarga del pilar.

La Figura 130 presenta la evolución de las deformaciones medidas con los sensores de fibra óptica durante el ciclado. Los valores de deformación al inicio del ensayo coinciden con la deformación residual registrada al final de la precarga. La falta de paralelismo entre las superficies de apoyo de la probeta vuelve a manifestarse en

los resultados, siendo muy superior la medida del sensor FBG 1 a la del resto de sensores. Tras la descarga de la probeta el nivel de deformación permanente aumenta.

Respecto a los valores medidos durante el ciclado se comprueba que aunque la amplitud de las deformaciones entre pico y valle de cada ciclo se mantiene aproximadamente constante durante el ensayo, los valores máximos y mínimos van aumentando con el número de ciclos. A modo de ejemplo, para el FBG 1 en el primer ciclo los valores extremos son $2.118 \mu\epsilon$ (para 700 kN) y $1.630 \mu\epsilon$ (para 300 kN), mientras que en el último se alcanzan 2.501 y $2.137 \mu\epsilon$, respectivamente.

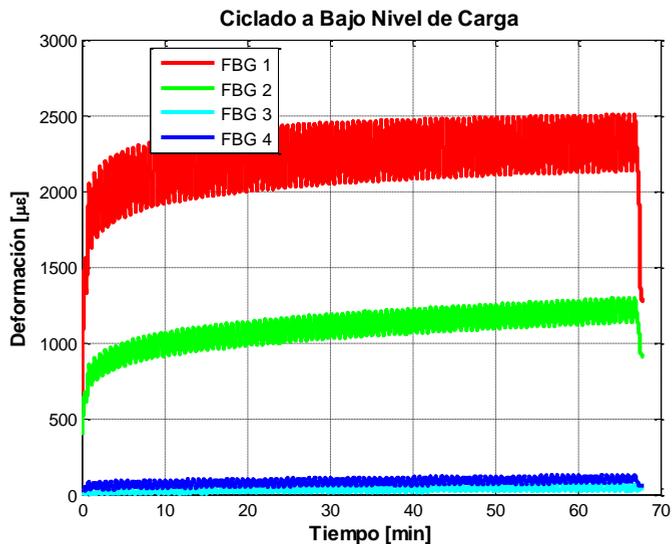


Figura 130. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.

En el caso de las bandas extensométricas (resultados mostrados en Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono”) se aprecia un comportamiento diferente según la dirección de medida. Previamente al inicio del ensayo las medidas de las bandas son taradas a cero. Los registros de las galgas transversales muestran una respuesta análoga a la de los FBGs.

El máximo de deformación medido en el ciclo N^o 100 por los distintos sensores se presenta en la Tabla 27. Dichos valores coinciden con los máximos registrados

durante este periodo del ensayo para todos los sensores salvo para el SG-L2 (que se alcanza en el ciclo N°14). En las medidas de las bandas, para obtener la deformación real de la probeta sería necesario añadir la deformación permanente obtenida tras la precarga.

Tabla 27. Valores máximos de deformación para el ciclo N° 100 registrados durante el ciclado a bajo nivel de carga por las galgas extensométricas y las redes de Bragg.

Sensor	N° 1 [μ€]	N° 2 [μ€]	N° 3 [μ€]	N° 4 [μ€]
Galgas Extensométricas Transversales	1.144	2.769	1.344	396
Galgas Extensométricas Longitudinales	-781	-2.864	-2.388	-451
Redes de Bragg	2.502	1.296	70	130

Las deformaciones residuales al final del ensayo se muestran en la Tabla 28. En los valores mostrados para las galgas extensométricas se han incluido las deformaciones residuales medidas tras la precarga.

Tabla 28. Valores de deformación registrados por las galgas extensométricas y las redes de Bragg al finalizar el ciclado a bajo nivel de carga.

Sensor	N° 1 [μ€]	N° 2 [μ€]	N° 3 [μ€]	N° 4 [μ€]
Galgas Extensométricas Transversales	762	2.281	999	194
Galgas Extensométricas Longitudinales	-3	-1.635	-1.265	34
Redes de Bragg	1.277	909	40	60

Periodo III: Ciclos a alto nivel de carga

La tercera parte del ensayo consiste nuevamente en un ciclado comprendido entre 300 y 800 kN. El número de ciclos aplicados se reduce hasta 20 (Figura 131). Partiendo del valor de las deformaciones permanentes obtenidas al final del segundo periodo, los registros de los FBGs presentan un comportamiento análogo al detectado en la segunda fase, esto es, los valores extremos de deformación en cada ciclo aumentan a medida que se incrementa el número de ciclos aplicados (manteniendo prácticamente constante su amplitud).

Para el sensor sometido a mayor nivel de deformación (FBG 1) se aprecia que los valores máximos de los ciclos se encuentran truncados. Esto es debido a la pérdida temporal de la lectura de este sensor a consecuencia del "estrangulamiento" o aplastamiento de la fibra óptica entre las fibras de refuerzo del carbono (mismo efecto que aparecía al final de la fase de rotura del pilar P1).

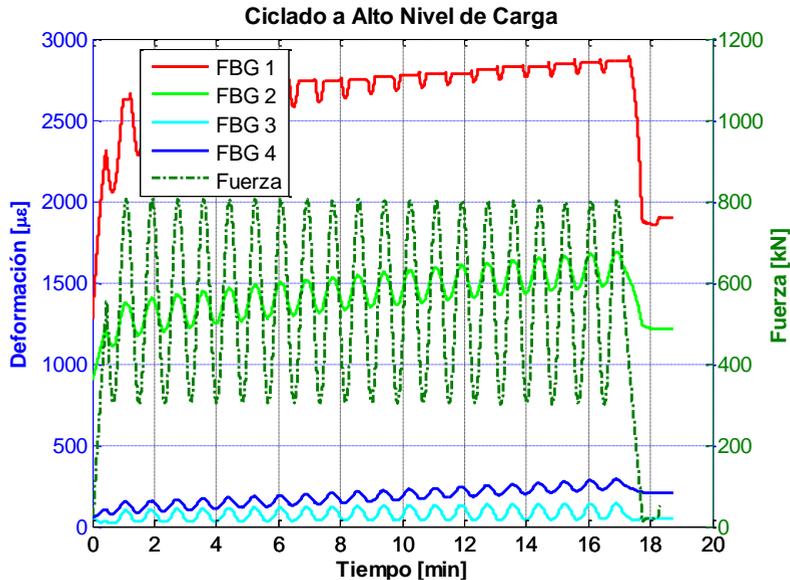


Figura 131. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo III: ciclado a alto nivel de carga.

Las lecturas de las galgas se muestran en el Anexo C "Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono", observándose comportamientos análogos entre las galgas situadas en dirección transversal y las redes de Bragg.

La Tabla 29 recoge el máximo de deformación alcanzado por cada sensor en el ciclo N° 20. Debido a la pérdida de señal en el FBG 1, no es posible conocer el valor máximo registrado por dicho dispositivo. De forma similar a los datos mostrados en la Tabla 27, para conocer la deformación total del pilar mediante las bandas extensométricas sería necesario añadir la deformación residual medida tras la precarga. Las deformaciones residuales se presentan en la Tabla 30.

Tabla 29. Valores máximos de deformación para el ciclo N° 20 registrados durante el ciclado a alto nivel de carga por las galgas extensométricas y las redes de Bragg.

Sensor	N° 1 [$\mu\epsilon$]	N° 2 [$\mu\epsilon$]	N° 3 [$\mu\epsilon$]	N° 4 [$\mu\epsilon$]
Galgas Extensométricas Transversales	1.639	4.164	2.194	777
Galgas Extensométricas Longitudinales	-838	-3.047	-2.685	-663
Redes de Bragg	-	1.690	141	290

Tabla 30. Valores de deformación registrados por las galgas extensométricas y las redes de Bragg al finalizar el ciclado a alto nivel de carga.

Sensor	N° 1 [$\mu\epsilon$]	N° 2 [$\mu\epsilon$]	N° 3 [$\mu\epsilon$]	N° 4 [$\mu\epsilon$]
Galgas Extensométricas Transversales	1.085	3.192	1.541	423
Galgas Extensométricas Longitudinales	-75	-1.915	-1.328	1
Redes de Bragg	1.856	1.213	48	207

Periodo IV: Rotura

En la última fase del ensayo se procede a la rotura del pilar. El perfil de carga aplicado junto con la medida de los sensores de Bragg se muestra en la Figura 132. La carga es elevada desde 0 hasta 860 kN aproximadamente, registrándose un desplazamiento del pistón de 3,35 mm. Superado este punto se aprecia un periodo de fluencia en la estructura, con una respuesta prácticamente constante con ligera pendiente ascendente, hasta alcanzarse el valor máximo de fuerza ejercida, 935 kN para un desplazamiento del pistón de 9,98 mm. Finalmente se produce la descarga de la probeta.

La evolución de las medidas de los FBGs se observa también en esta figura. Se identifica fácilmente el fallo de estos sensores a partir del punto en el que la señal se mantiene constante en un determinado valor. El sensor FBG 1 es el primero que falla, seguido del FBG 2, FBG 3 y por último FBG 4. El orden de fallo de los dos primeros sensores ha sido el esperado, pues en todas las pruebas efectuadas estos dispositivos son los que mayores niveles de deformación registraron.

Puesto que el control del ensayo se efectúa en desplazamiento del actuador de carga, a pesar de las roturas del recubrimiento de fibra de carbono se continúa con la aplicación de carga, dado que la estructura aún mantiene su capacidad portante. Este hecho evita que se produzcan caídas de fuerza abruptas previas a la descarga controlada del espécimen.

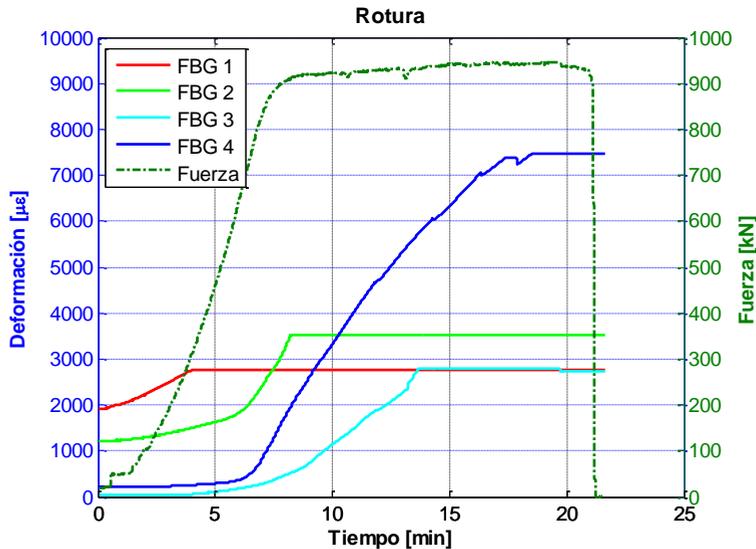


Figura 132. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el periodo IV: rotura.

El registro de las bandas extensométricas se muestra en el Anexo C “Implementación de la Tecnología FBG en Ensayos Estructurales: Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono”. En la Tabla 31 se recogen los valores de deformación registrados por cada uno de los sensores en su momento de fallo:

Tabla 31. Lecturas de las galgas extensométricas y sensores FBGs en su instante de fallo.

Sensor	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]	[$\mu\epsilon$]
Galgas Extensométricas Transversales	6.367	14.570	7.481	4.792
Galgas Extensométricas Longitudinales	-519	-7.637	-8.442	-655
Redes de Bragg	2.776	3.511	2.788	7.463

La diferente localización de las galgas extensométricas y de los FBGs impide la comparación de sus medidas. Ambos tipos de sensores proporcionan medidas muy locales, dependientes de su posición en el pilar y en consecuencia de la irregularidad en la distribución de la carga en la probeta.

De forma análoga al pilar P1, se emplea el sistema PONTOS para analizar los desplazamientos durante la fase de rotura. La medida se realizó sobre la superficie identificada con el número 4 (Figura 133). A diferencia del pilar P1, en este caso el fallo del espécimen se alcanza con control de la máquina en desplazamiento, por lo que el proceso de degradación del pilar es mucho más progresivo. Los desplazamientos mostrados se corresponden con los instantes en los que se aplican (a) 107 kN, (b) 917 kN, (c) 929 kN y (d) 933 kN. El máximo desplazamiento medido es de 9 mm (Figura 133 d), donde se detecta un importante aumento de los desplazamientos respecto a la anterior, en la que el máximo estaba en torno a 5,5 mm (con una diferencia de carga entre ambas de únicamente 4 kN). Estas dos últimas imágenes fueron tomadas con una diferencia temporal de 8 minutos, durante los cuales el pilar perdió su capacidad portante, manifestándose en un considerable aumento de los desplazamientos (y deformaciones) permaneciendo la carga prácticamente constante.

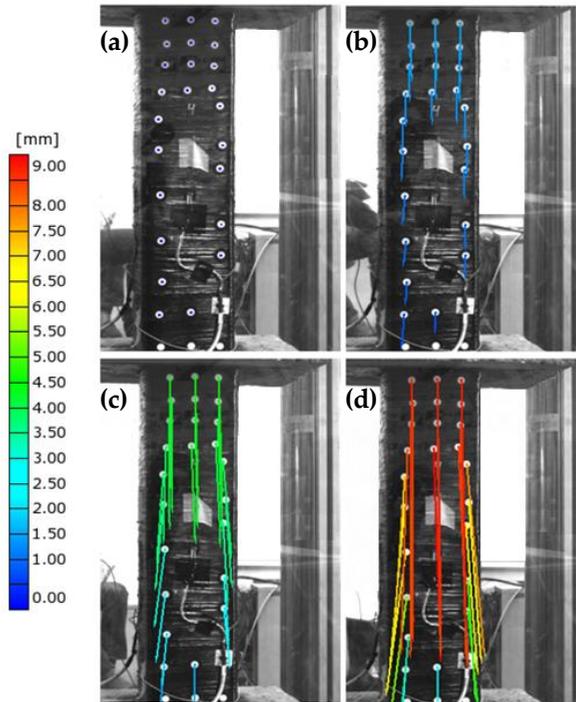


Figura 133. Campos de desplazamientos (mayor displacement) en cuatro instantes del periodo de rotura: (a) 107 kN, (b) 917 kN, (c) 929 kN y (d) 933 kN.

6.3. Monitorización estructural de panel demostrador rigidizado CFRP

La tercera aplicación consiste en la monitorización estructural de un panel rigidizado de fibra de carbono y resina epoxy durante la realización de ensayos de tracción y flexión. Los paneles de fibra de carbono rigidizados son estructuras ampliamente empleadas en la industria aeroespacial. Actualmente, la unión rigidizador-panel se realiza mediante adhesivos. No obstante, la desconfianza en este tipo de uniones derivada de la falta de exactitud de los métodos de inspección para identificar defectos como los *kissing bonds*, hacen necesario la instalación de remaches en la unión. De esta forma se garantiza su integridad estructural, aunque supone un significativo aumento de peso y de coste de fabricación y mantenimiento de las estructuras.

La inspección de las uniones adhesivas se efectúa principalmente mediante ultrasonidos, existiendo otras técnicas como emisiones acústicas, radiografías y termografías. Estas tecnologías permiten la detección de delaminaciones, inclusiones o impactos entre otros, pero presentan una baja tasa de detección en el caso de los *kissing bonds*. El empleo de sensores de fibra óptica en las uniones adhesivas permite tanto monitorizar el curado y verificar si se realiza correctamente, como el seguimiento del estado de la unión durante la vida útil de la estructura, evaluando la aparición de daños o desencolados. Con esta ubicación de las fibras se reducen los problemas derivados de su integración en el material compuesto, quedando protegidas frente a agentes exteriores.

6.3.1. Proceso de fabricación, plan de sensorización e implementación del ensayo

Para el estudio de estructuras rigidizadas y uniones adhesivas se ha fabricado un panel demostrador de fibra de carbono, con tres rigidizadores en forma de L. Las características y dimensiones del panel se presentan en la Figura 134.

Se trata de un panel de $600 \times 600 \text{ mm}^2$, con tres rigidizadores separados entre sí 150 mm. Tanto el panel como los rigidizadores se fabricaron a partir de preimpregnado unidireccional de fibra de carbono y resina epoxy, con la secuencia de apilado $[0,90,0,90,0]$. La geometría de los rigidizadores se muestra en la Figura 135.

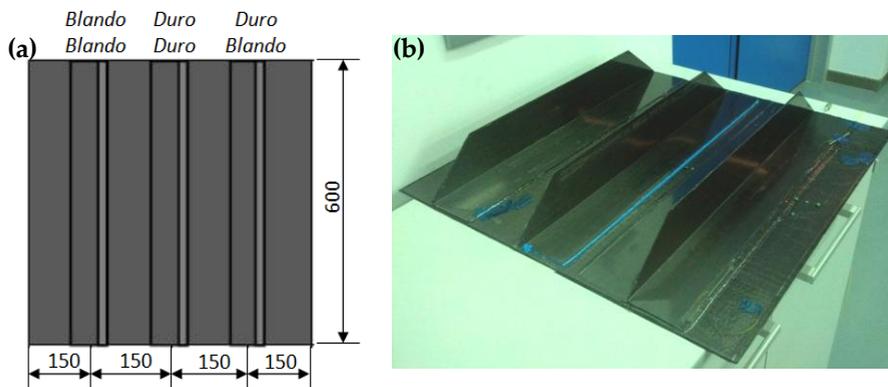


Figura 134. (a) Esquema y (b) panel rigidizado.

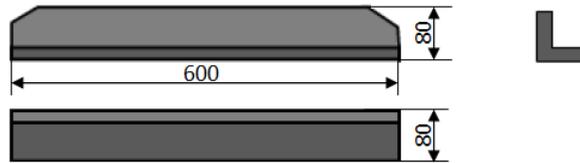


Figura 135. Esquema de los rigidizadores en forma de L.

La unión rigidizador - panel se realiza de tres formas diferentes: (i) unión Blando-Blando o Cocurada: el rigidizador se fija al panel mediante la propia resina del material compuesto durante el curado; (ii) unión Duro-Duro o Co-pegada (o pegada): el panel y el rigidizador se curan previamente y posteriormente se unen mediante un adhesivo film y (iii) unión Duro-Blando: la unión se efectúa durante el curado del rigidizador, estando el panel previamente fabricado.

La fabricación del panel y de los rigidizadores se realizó en las instalaciones de CATEC, mediante *hand lay-up*. El material empleado es el pre-impregnado unidireccional de fibra de carbono y resina epoxy denominado MTM57/T700S, cuyas propiedades se presentan en el en la Tabla 11 del Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto". El curado se realiza mediante temperatura y vacío, sin necesidad de aplicar presión.

La unión de los rigidizadores duro-duro y duro-blando se realiza mediante el adhesivo film MTA240, de *Advanced Composites Group* de Umeco Composites. El curado del adhesivo se ha realizado de forma conjunta a la del material compuesto, dado que el ciclo de este cumple los requisitos mínimos exigidos por la resina MTA240.

El panel se instrumenta con 6 redes de Bragg, los cuales se sitúan en la unión adhesiva entre el pie del rigidizador y el panel. Los sensores se distribuyen en tres fibras ópticas colocadas en sentido longitudinal. Además, se instalan 4 bandas extensométricas en el rigidizador central, dos situadas en el pie y otras dos en el alma (en paralelo a las ubicaciones de los FBGs). La posición de cada sensor se representa en el esquema de la Figura 136.

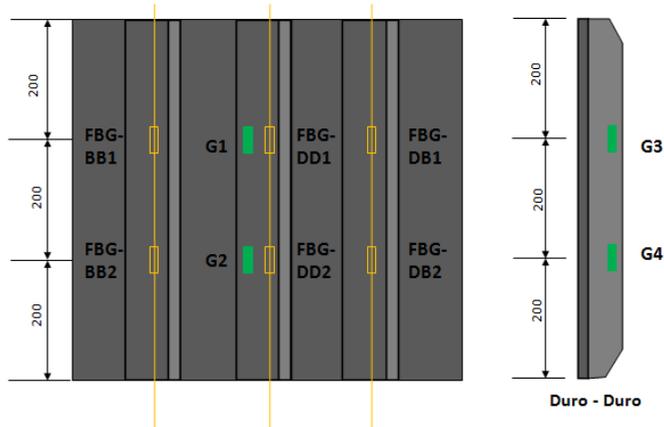


Figura 136. Esquema de la ubicación de los sensores: redes de Bragg (amarillo) y galgas extensométricas (verde).

Para facilitar la manipulación del panel y aumentar la robustez de los sensores de fibra óptica se han empleado los dispositivos protectores de conectores de poliamida desarrollados en el Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto". De esta forma, se evitan tener extremos libres de la fibra, reduciendo la posibilidad de romperlas durante el ensayo del panel o su transporte.

Para la realización de los ensayos de tracción y flexión se ha utilizado la máquina universal de ensayos Zwick Z100.

6.3.2. Resultados

Los ensayos efectuados se clasifican en pruebas de tracción y flexión en tres puntos.

- **Ensayos de Tracción**

Se realizaron un total de cinco ensayos de tracción sobre el panel rigidizado. En estos se mantuvo la velocidad constante en 2 mm/min, aumentando la carga de forma gradual. Los valores máximos de carga aplicada fueron 2, 10, 15, 20 y 27 kN. La fijación del panel a las mordazas se efectuó en los extremos de pie del rigidizador duro-duro, donde se colocaron *tabs* de "emery cloth" para evitar el deslizamiento del panel durante la carga.

La Figura 137 muestra la representación fuerza vs deformación del ensayo realizado hasta 27 kN. Los sensores ubicados en el pie del rigidizador duro-duro (en el que se aplica la carga) son los que experimentan las mayores deformaciones. Se comprueba que las lecturas de las bandas extensométricas G1 y G2 y los sensores de Bragg FBG-DD1 y FBG-DD2 son similares, aunque no son completamente coincidentes detectándose leves diferencias derivadas de problemas de alineamiento en la aplicación de la carga. La deformación máxima se registra en el FBG - DD1, alcanzándose las $1.197 \mu\epsilon$.

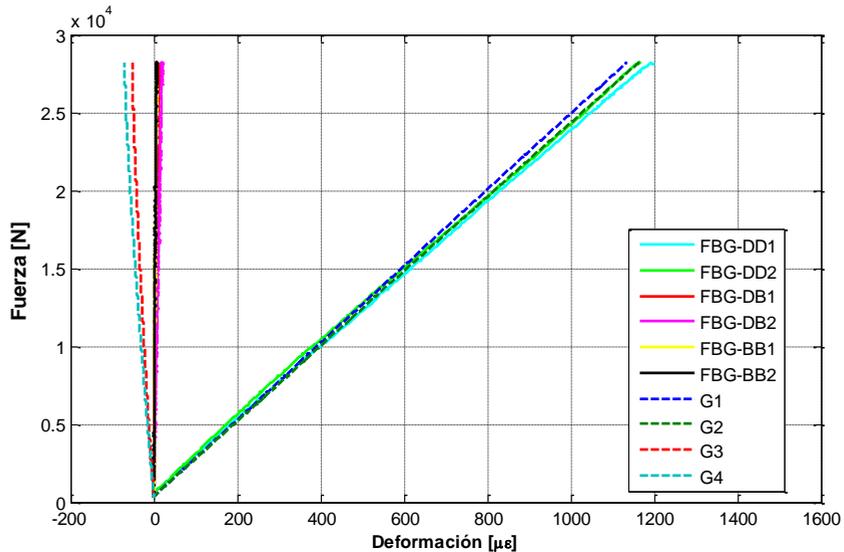


Figura 137. Resultados del ensayo de tracción del panel rigidizado (27 kN).

En el caso de las galgas situadas en el alma del rigidizador las deformaciones registradas son de compresión, siendo estas dos órdenes de magnitud inferiores a las del pie (94%). El origen de dichas deformaciones de compresión se encuentra en la falta de alineamiento de la carga, que induce esfuerzos de flexión en el panel. Según la ubicación de las bandas respecto al eje neutro del perfil, las deformaciones obtenidas serán de tracción o compresión. En la Figura 138 se muestra un esquema de la sección panel-rigidizador donde se identifica la posición del eje neutro. Se aprecia que las bandas adheridas al pie se sitúan por debajo del eje neutro (región traccionada en este ensayo) mientras que las fijadas al alma están por encima y por tanto sometidas a compresión. El resultado de la medida de las galgas es suma de las deformaciones de tracción y flexión.

Las deformaciones medidas por las redes de Bragg embebidas en las uniones de los rigidizadores blando-blando y duro-blando son prácticamente nulas, puesto que únicamente se aplica carga sobre el rigidizador copegado.

Los resultados obtenidos en el resto de los ensayos son análogos a los anteriores, siendo las deformaciones máximas de menor magnitud (como consecuencia de la menor carga aplicada).

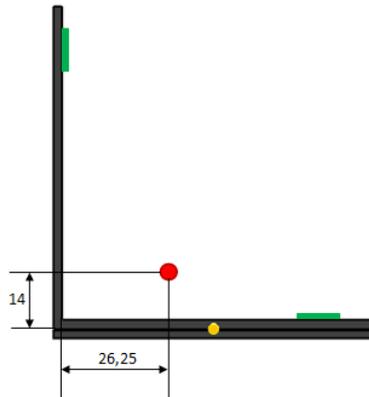


Figura 138. Esquema de la situación del eje neutro.

- **Ensayos de Flexión**

En el caso de las pruebas de flexión se ensayaron tres configuraciones diferentes, aplicando la carga en la parte central del pie de cada rigidizador. Todos los ensayos se efectuaron con control en desplazamiento, manteniendo constante la velocidad en 5 mm/min y aumentando progresivamente la carga máxima con cada prueba. Para cada configuración de ensayo se aplicaron cuatro valores diferentes de carga: 1.000, 1.500, 2.000 y 2.200 N. Los resultados se presentan para el ensayo de mayor carga sobre cada rigidizador (no detectándose cambios con cargas menores).

Flexión en tres puntos sobre el rigidizador Duro-Duro (co-pegado)

Los resultados del ensayo de flexión sobre el rigidizador duro-duro se muestran en la Figura 139. Al tratarse de carga de flexión y no encontrarse los sensores de fibra óptica y las bandas extensométricas a la misma distancia de la línea neutra, no es posible comparar entre sí las medidas de los sensores. Durante la carga se produce

el pandeo local del panel y del rigidizador, lo cual ocasiona que la medida de cada dispositivo dependa fuertemente de su situación en el panel.

Analizando el comportamiento registrado por los distintos elementos de medida (Figura 139), se aprecia el fuerte comportamiento no lineal del panel. En la última fase del ensayo se identifica una caída de fuerza atribuida al acomodo del panel durante el pandeo. Las mayores deformaciones se registran en las galgas situadas en el alma del rigidizador copegado a consecuencia de los grandes desplazamientos inducidos por el pandeo lateral, siendo estas de $1.623 \mu\epsilon$ para G3 y de $-757 \mu\epsilon$ para G4 (se advierte el signo opuesto de las deformaciones en las dos lecturas). El pandeo del rigidizador se presenta en la Figura 140.

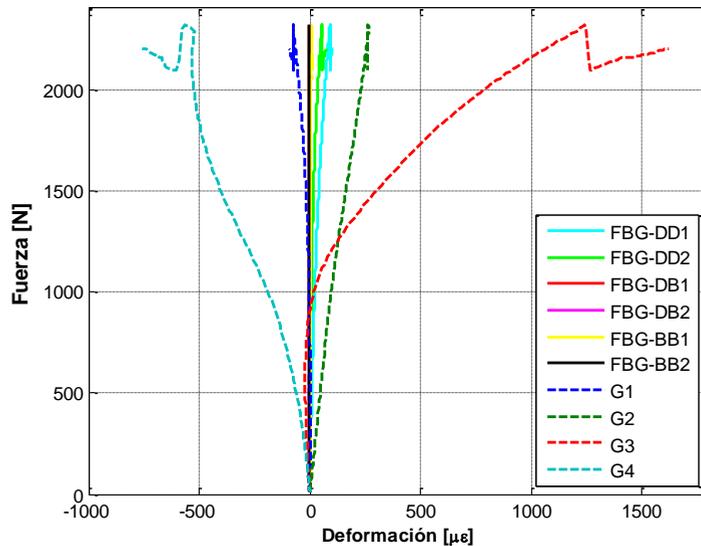


Figura 139. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador duro-duro (2.200 N).

Los valores registrados por los sensores situados en el pie del rigidizador son significativamente menores, $-74 \mu\epsilon$ y $264 \mu\epsilon$ para G1 y G2, respectivamente. En el caso de los FBGs embebidos en la unión las deformaciones son aún menores, $92 \mu\epsilon$ para FBG-DD1 y $56 \mu\epsilon$ para FBG-DD2. Para el resto de redes de Bragg, las deformaciones medidas durante el ensayo son prácticamente nulas.

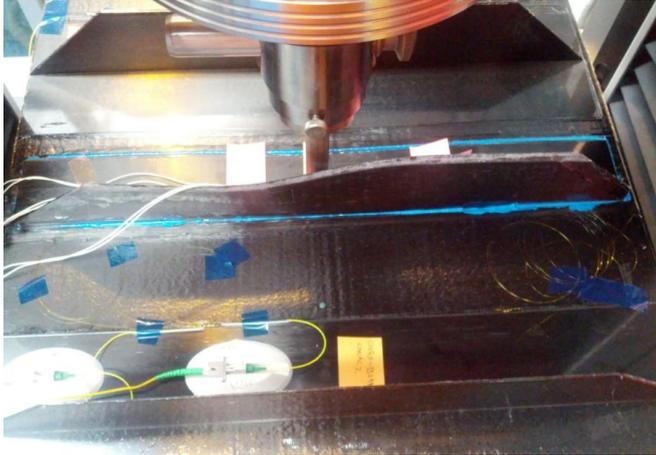


Figura 140. Pandeo del rigidizador duro-duro durante el ensayo de flexión hasta 2.200 N.

Flexión en tres puntos sobre el rigidizador Duro-Blando

El resultado del ensayo de flexión sobre el rigidizador duro-blando se muestra en la Figura 141. El comportamiento registrado es similar al del ensayo anterior, volviendo a producirse la inestabilidad del pandeo, que se manifiesta tanto en la no linealidad de las lecturas como en el cambio de signo de los valores registrados por sensores situados en la misma superficie de la probeta. Las mayores deformaciones se detectan con los sensores de fibra óptica ubicados en el pie del rigidizador cargado (FBG-DB1 $101 \mu\epsilon$ y FBG-DB2 $83 \mu\epsilon$). En el resto de FBGs las deformaciones oscilan alrededor de valores nulos. Las bandas extensométricas presentan diferente comportamiento según su ubicación, estando sometidas a deformaciones positivas aquellas que se sitúan en el pie del rigidizador ($31 \mu\epsilon$ en G1), y a valores negativos las localizadas en el alma del mismo ($-35 \mu\epsilon$ en G3). Al final del ensayo se produce de nuevo una caída de fuerza originada por el acomodo del panel durante el pandeo.

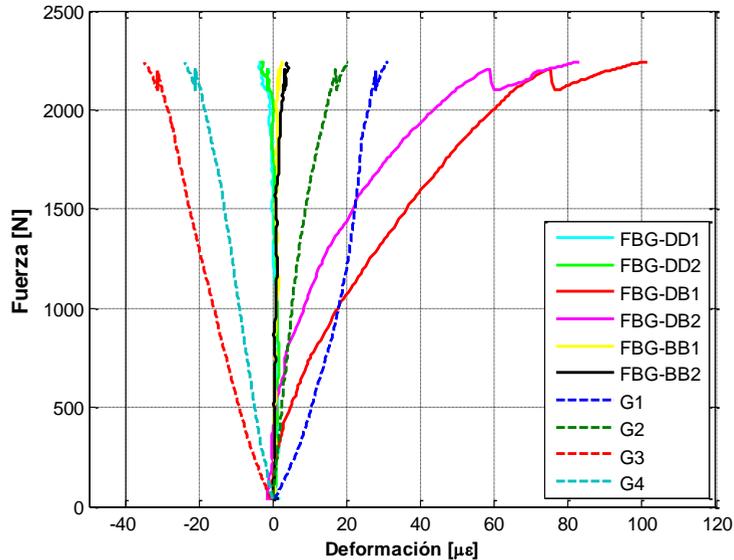


Figura 141. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador duro-blando (2.200 N).

Flexión en tres puntos sobre el rigidizador Blando-Blando (cocurado)

La Figura 142 presenta el resultado del ensayo sobre el tercer rigidizador. La no linealidad de la respuesta del panel queda patente a través de estos resultados. Las medidas de los sensores de fibra óptica son prácticamente nulas durante todo el ensayo (menores a $\pm 10 \mu\epsilon$), salvo para las redes de Bragg situadas bajo el rigidizador ensayado donde se alcanzan las $57 \mu\epsilon$ (FBG-BB2). Las deformaciones registradas por las galgas se encuentran comprendidas entre -10 y $12 \mu\epsilon$. A diferencia de los ensayos efectuados sobre los otros dos rigidizadores, en este caso no aparece un salto en la fuerza motivado por el pandeo del panel.

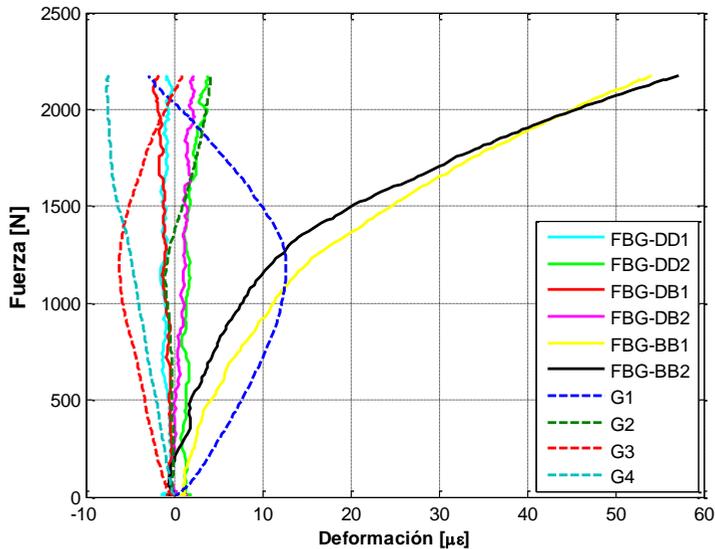


Figura 142. Resultados del ensayo de flexión en tres puntos sobre el pie del rigidizador blando-blando (2.200 N).

6.4. Discusión

El primer caso de estudio del presente capítulo ha sido una cabina de CFRP fabricada a escala real y sometida a dos ensayos de presurización. La cabina fue sensorizada con un total de 24 redes de Bragg distribuidas en cuatro fibras ópticas, así como bandas extensométricas. Las grandes dimensiones de la cabina y la longitud de las fibras aumentaron la complejidad de su proceso de instalación, teniendo que salvarse con el recorrido de la fibra óptica la instalación eléctrica de las bandas. El empleo de la herramienta de colocación de la fibra óptica facilitó dicho proceso, posibilitando un rápido despliegue de la misma y evitando que se produjeran roturas. La instalación de la fibra óptica se efectuó de forma significativamente más rápida que la de las bandas extensométricas, las cuales deben ser situadas una a una y posteriormente realizar el rutado de los cables. Además, la instrumentación con FBGs conlleva una importante reducción de peso respecto a la sensorización convencional [RIC 2012].

La ubicación de los sensores de fibra óptica fue seleccionada de forma que se

registraran las deformaciones en puntos de interés, como concentradores de tensión producidos por esquinas o regiones remachadas y se cubriera la mayor superficie posible de la cabina. Próximos a los puntos elegidos se encontraban instaladas galgas, permitiendo la comparación de los resultados obtenidos con ambos dispositivos.

Los resultados de los ensayos de presurización demuestran la capacidad de las redes de Bragg para monitorizar este tipo de carga, identificándose de forma clara los diferentes incrementos de presión aplicados. La comparación de las lecturas de los dos tipos de sensores no puede realizarse en todos los casos, pues aunque ambos dispositivos se sitúan muy próximos entre sí, el efecto de los concentradores de tensión produce que pequeñas diferencias en posición se manifiesten en importantes discrepancias en deformación.

La robustez de la instalación de fibra óptica se ha validado a través de los dos ensayos realizados. Entre ambos ensayos se produjo el traslado de la cabina desde Sevilla a Madrid. Adicionalmente, previo a este segundo ensayo se ejecutaron trabajos sobre la superficie de la cabina para la instalación de extensometría adicional. Estos trabajos consistían en el lijado de la misma y produjeron la rotura de la primera de las líneas de fibra óptica. Sin embargo, el resto de sensores sobrevivió a dichos trabajos en un entorno industrial y sin sufrir desperfectos. La supervivencia de la fibra óptica se vio potenciada por el empleo de los dispositivos protectores de los conectores, que evitaron la presencia de tramos de fibra óptica sin fijar a la estructura. Estos se situaron en ambos extremos de cada línea de fibra, creando una instalación redundante que permitiera el acceso a uno de los extremos de la fibra en caso de que se produjera una rotura. La geometría de estos dispositivos fue fabricada *ad-hoc* para esta aplicación, logrando una completa adaptación a la superficie.

El segundo caso de estudio fue la monitorización de los ensayos de compresión de dos pilares de hormigón armado. Estos pilares presentaban un recubrimiento exterior de fibra de carbono, cuyo objetivo era aumentar la capacidad portante del pilar tras producirse el fallo del mismo.

La sensorización realizada en ambas estructuras fue análoga, instalando bandas extensométricas y FBGs. Las redes de Bragg fueron ubicadas en las esquinas del pilar, situadas todas en la misma sección transversal (coincidente con las de las galgas), de manera que se tuviera un conocimiento completo de la respuesta de la

estructura ante la carga aplicada. Esto es posible gracias a las reducidas dimensiones de la fibra óptica y a su flexibilidad.

Ambos pilares fueron sometidos a ensayos de compresión. Tanto en la primera como en la segunda probeta la aplicación de carga se produjo de forma no alineada con el eje de la probeta, a consecuencia de la falta de paralelismo de las bases. Esto se aprecia a partir de la lectura de las redes de Bragg. A pesar de la distinta ubicación de las gages y de los FBGs que impiden la comparación de sus medidas, se aprecia coherencia de los resultados.

La novedad más significativa aportada por los pilares es su recubrimiento de fibra de carbono exterior, que pretende extender la resistencia última de los pilares y aumentar su capacidad portante una vez producido el fallo. Puesto de la fibra de carbono es enrollada de forma perpendicular al eje del pilar, la compresión de la probeta ocasiona que la fibra trabaje a tracción. Por este motivo resulta de interés conocer el comportamiento de la fibra de carbono en su dirección de trabajo, dirección en la que se situaron los sensores de fibra óptica. El análisis de los ensayos revela que para valores de la carga superior a 800 kN se produce el "estrangulamiento" de la fibra óptica: el sensor queda confinado entre las fibras de refuerzo del material compuesto, imposibilitando el paso de la luz a través del mismo e impidiendo su lectura.

Se verifica la capacidad de los FBGs para la monitorización de cargas cíclicas, siguiéndose de forma precisa la respuesta de la estructura en toda la amplitud del ciclo.

Una vez más en estos ensayos se valida el uso de los dispositivos de protección de conector, que facilitan el traslado de los pilares y su instalación en la máquina de ensayo, garantizándose la supervivencia de la fibra óptica.

El último caso de estudio ha sido un panel rigidizado de CFRP con tres rigidizadores en forma de L. En este, las fibras fueron ubicadas entre el panel y el pie del rigidizador, alineadas con la dirección longitudinal. Esta localización presenta numerosas ventajas, pues permite que la fibra quede integrada en la estructura sin necesidad de adhesivo adicional y minimizando la interferencia con el proceso de manufactura [DAW 2007, KIM 2011]. Además, las fibras quedan protegidas y es posible monitorizar el estado de la unión, tanto durante el curado del adhesivo como en su vida en servicio.

El panel fue sometido a tracción y flexión. En el caso de la tracción se observa un

buen ajuste entre la medida de las redes de Bragg y las bandas extensométricas instaladas como referencia. Los resultados de los ensayos de flexión muestran un comportamiento fuertemente no lineal, derivado de la aparición de pandeo. Este efecto se identifica en los tres rigidizadores. Un aspecto a considerar en el caso de cargas de flexión es la localización de los sensores embebidos respecto a la línea neutra del perfil. Es necesario evitar que la ubicación de la fibra coincida con la posición de dicha línea neutra, pues en caso contrario se imposibilitaría la monitorización de la estructura.

A través de los ensayos realizados se ha demostrado la validez de la tecnología para la monitorización y seguimiento de prototipos reales en ambientes industriales, verificándose su potencial para su aplicación en entornos industriales y relevantes.

7. SHALM: APLICACIÓN DE SHM A COMPONENTES METÁLICOS FABRICADOS POR AM

EL acrónimo **SHALM** proviene de estudio de viabilidad de integración de la tecnología de *Structural Health Monitoring* con redes de Bragg en componentes fabricados por *Additive Layer Manufacturing*. En los capítulos anteriores, la monitorización de la salud estructural se ha centrado en su aplicación a piezas y estructuras de material compuesto, las cuales, por las características del material y su proceso de fabricación permiten la integración de los sensores tanto encolados en la superficie como embebidos entre las capas del laminado. Las tecnologías convencionales de fabricación de componentes metálicos (esto es, laminación, forja, mecanizado, fundición, entre otras), únicamente admiten el empleo de sensores encolados, adhiriéndolos a la superficie una vez terminados todos los trabajos de conformado. El desarrollo de las diferentes técnicas de fabricación aditiva favorece la producción de geometrías complejas, inviables de obtener por los métodos tradicionales y permitiendo la integración de sensores embebidos. Aprovechando esta ventaja, es posible diseñar las piezas metálicas a sensorizar con conductos internos, que permitan el rutado de los sensores de fibra óptica en su interior. De esta forma, las redes de Bragg quedan embebidas y protegidas frente a posibles golpes que puedan dañarlos o producir su rotura.

El objetivo de este capítulo es demostrar la viabilidad de la fabricación de piezas mediante *Additive Manufacturing* con sensores FBG integrados. Previamente a la sensorización de estructuras, se analiza la geometría óptima de los conductos para introducción de la fibra y el procedimiento de adherencia. Tras seleccionar los parámetros aptos, se procede a la sensorización de un componente fabricado por AM, cuya masa se ha reducido a través de un procedimiento de optimización topológica.

7.1. Materiales y métodos experimentales

Los materiales y equipos empleados para la fabricación y ensayo de los componentes se describen en las siguientes secciones.

7.1.1. Materiales

Las probetas y componentes ensayados se han fabricado en las instalaciones de CATEC a través de la tecnología de fabricación aditiva. El material utilizado es acero inoxidable AISI 316 L, apto para aplicaciones de AM, cuyas propiedades mecánicas se detallan en el Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto".

7.1.2. Equipamiento

Los equipos se clasifican según su finalidad en tres categorías: fabricación, inspección y ensayo de componentes.

- **Sistema de fabricación en metal por Selective Laser Melting (SLM)**

La fabricación de las probetas se realiza mediante la tecnología de fundido selectivo por láser, utilizando el equipo Renishaw AM 250.

- **Sistema de inspección por tomografía computarizada (XCT)**

Esta técnica se basa en la medición de la atenuación de la energía de la radiación ionizante al pasar a través de un material sólido, causado por diferencias de espesor, densidad, presencia de discontinuidades, etc. Las variaciones de atenuación o absorción son registradas por un detector digital, obteniéndose una imagen de la estructura interna de la pieza (Figura 143).

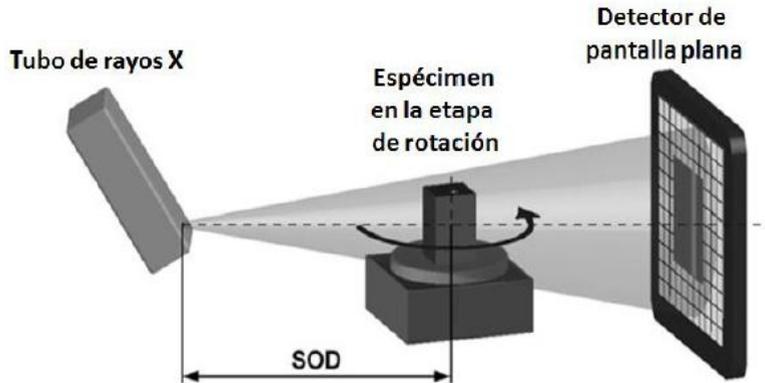


Figura 143. Esquema general de un proceso de inspección mediante XCT.

Como ventajas de la técnica destacan la existencia de un registro de inspección de la condición interna de un material, facilitando la identificación de la naturaleza de la discontinuidad encontrada y revelando problemas estructurales y errores de ensamblaje. Además, puede emplearse tanto en materiales metálicos como no metálicos. Sin embargo, es difícil de aplicar en piezas con geometría compleja o zonas poco accesibles, la región estudiada debe tener acceso en dos lados opuestos, no detecta discontinuidades de tipo laminar y requiere medidas de seguridad para la protección contra la radiación.

El equipo de tomografía utilizado es el sistema XCT modelo VJT-225 μ -CT (Figura 144), desarrollado por VJ Technologies.

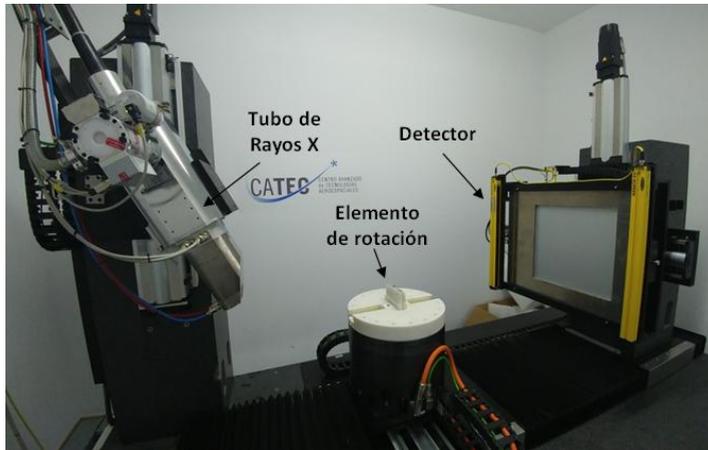


Figura 144. Equipo de Tomografía Computarizada.

- **Ensayos mecánicos**

Las pruebas de caracterización mecánica se realizan por medio de una máquina universal de ensayos Zwick Z100.

7.2. Estudio de geometrías

Para introducir los sensores de fibra óptica en el interior de piezas fabricadas por AM se propone realizar modificaciones sobre su geometría, diseñando en su interior un canal o conducto que recorra los puntos de interés para la medida de deformaciones.

Existen varios aspectos a considerar a la hora de realizar el diseño de dichos canales: diámetro, geometría del trazado, rugosidad interna del conducto y procedimiento de introducción del adhesivo. Por solventar este último punto, adicionalmente al canal para la fibra, es necesario fabricar otros conductos para la inclusión del adhesivo, asegurando que toda la longitud de la fibra queda recubierta por el mismo.

Otros aspectos a considerar son la orientación del conducto respecto al sentido de fabricación de la pieza, ya que se puede ver alterada su geometría interna y la necesidad de extraer el polvo no fundido que queda en el interior del canal durante la fabricación.

Para estudiar estos puntos se ha fabricado una placa con canales de diversas configuraciones en acero inoxidable AISI 316 L. Estos presentan diferentes diámetros, radios de curvatura y orientaciones. En la Figura 145 se muestra un esquema de la configuración de la placa:

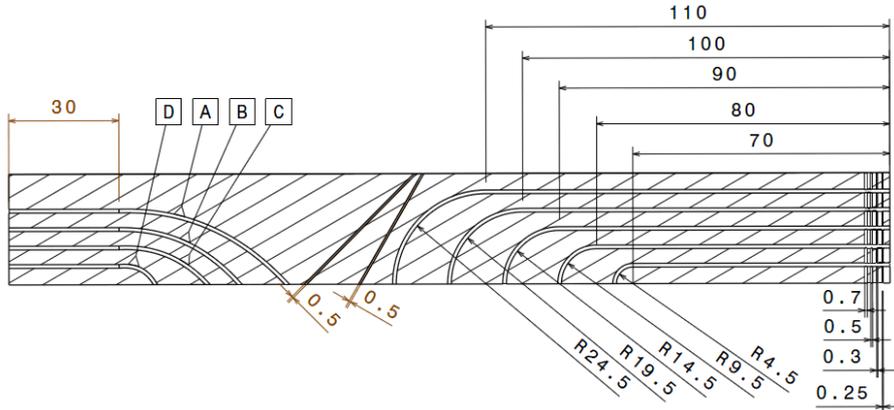


Figura 145. Plano acotado de la configuración de la placa.

El diámetro de los conductos cuyo valor no se ha especificado en el plano es 1 mm (valor 4 veces superior al diámetro de la fibra óptica, 250 μm). Los canales realizados se clasifican en cuatro tipos (enumerados de 1 a 4 de izquierda a derecha de la placa), analizando a continuación los problemas y ventajas encontrados en cada uno tras las pruebas efectuadas:

Conductos tipo 1:

Están formados por dos tramos, una parte recta de 30 mm de longitud y otra curva cuyo radio es variable a lo largo de la misma. El valor del radio de curvatura en cada conducto, para las tres secciones indicadas en la Figura 146 se muestra en la Tabla 32.

En este caso la fibra logra atravesar todos los conductos, independientemente del extremo del mismo por el que se introduzca. En la transición entre el tramo recto y la parte curva, la fibra suele quedarse obstruida a consecuencia del cambio de dirección y de la rugosidad superficial de la pared interna.

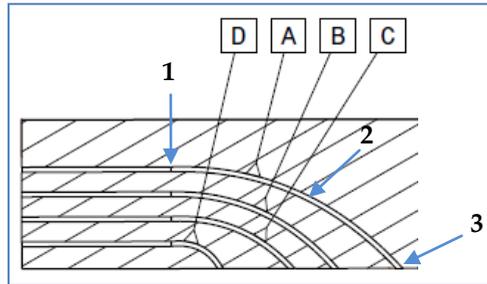


Figura 146. Esquema de los conductos tipo 1.

Tabla 32. Radios de curvatura de los conductos tipo 1.

Conducto	Radio [mm]		
	Sección 1	Sección 2	Sección 3
A	66,2	54,1	79,3
B	47,7	38,8	55
C	36,6	28,7	37,8
D	15,7	8	12,4

Conductos tipo 2:

En la placa se diseñaron dos conductos transversales de 500 μm de diámetro, uno formando 45° con la horizontal y otro 60°. En ninguno de los dos casos se logra la entrada de la fibra óptica. Tras una inspección por radiografía (Figura 147) se comprobó que estos conductos se encontraban obstruidos dado que su diámetro es demasiado pequeño para su correcta fabricación mediante AM. En esta se aprecian los canales tipo 1, los cuales sí se fabricaron adecuadamente.

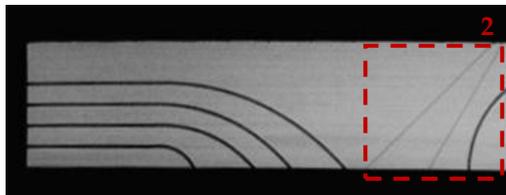


Figura 147. Radiografía de la placa (conductos tipo 1 y 2).

Conductos tipo 3:

Estos canales (Figura 148) presentan un tramo recto (de diferente longitud para cada uno) y una zona curva. A diferencia del tipo 1, en este caso el radio de curvatura es constante en cada canal, siendo el giro a realizar por la fibra óptica más acusado.

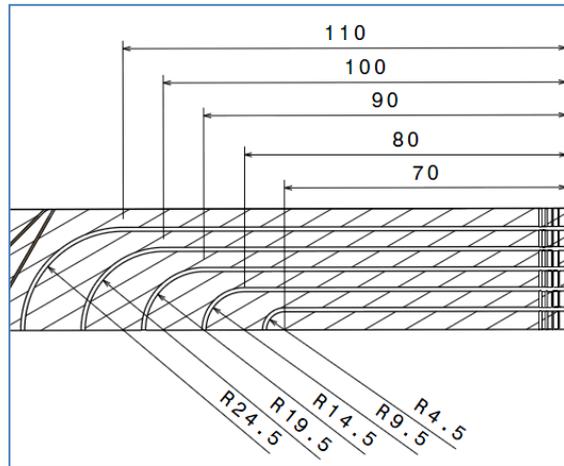


Figura 148. Esquema de los conductos tipo 3.

Se comprueba que la fibra pasa a través de todos los canales, pudiéndose introducir por cualquiera de sus extremos indistintamente. El avance de la fibra se ve dificultado en el tramo curvo al introducirla desde la parte recta. En la radiografía mostrada en la Figura 149 se aprecian los canales fabricados en el interior de la placa.

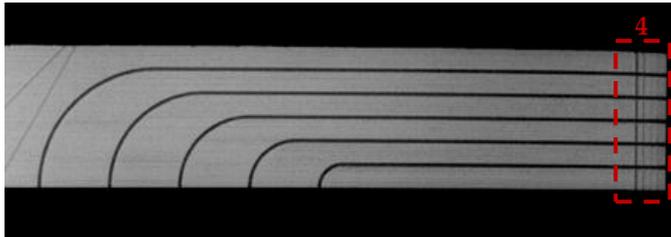


Figura 149. Radiografía de la placa (conductos tipo 3 y 4).

Conductos tipo 4:

El último tipo de canales tenía como objetivo determinar el diámetro mínimo que permitía la entrada de la fibra. Para ello, se diseñaron cuatro conductos transversales en la placa, cuyo diámetro aumentaba desde 250 hasta 700 μm (Figura 150). En la radiografía de la Figura 149 se observa que únicamente se ha logrado fabricar el de mayor diámetro. Para este se ha verificado que la fibra consigue atravesarlo.

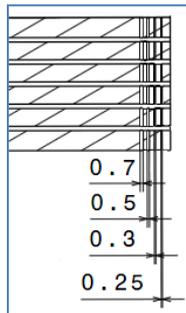


Figura 150. Esquema de los conductos tipo 4.

Todas las pruebas anteriores se efectuaron con hilos de fibra óptica con y sin soldaduras. En este último caso se comprobó que las soldaduras resisten al tirar de ellas pero no al empujarlas (Figura 151).



Figura 151. Esquema de introducción de fibras con soldaduras.

7.3. Ensayos mecánicos

Conocida la geometría interna de los conductos apta para la integración de sensores, se diseñó y fabricó una probeta de tracción en acero inoxidable AISI 316 L mediante AM, con dimensiones según la norma ASTM E8. La geometría interna de

la probeta se muestra en la Figura 152, donde se aprecian los canales existentes en su interior, uno para la fibra óptica y dos para la introducción del adhesivo. El diámetro del conducto de fibra es de 1 mm.

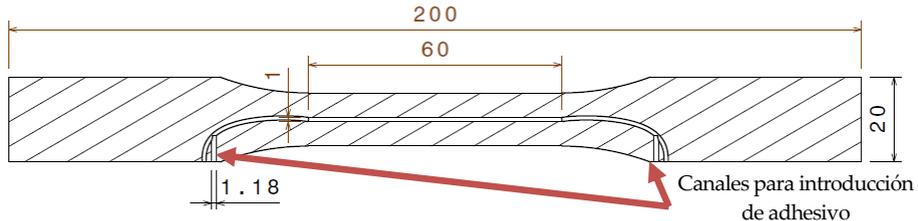


Figura 152. Plano acotado de la probeta PR05.

Todos los conductos se fabricaron correctamente, siendo posible situar el sensor en el interior de la probeta.

El diámetro de los canales para la inclusión del adhesivo es 1,2 mm. Estos se diseñaron simétricos respecto al eje transversal de la probeta, para garantizar que el pegamento logre cubrir por completo la fibra óptica. Para la introducción del mismo se utilizó una aguja de 0,8 mm de diámetro.

La probeta se instrumentó con un sensor de Bragg en su interior (Figura 153). Este se fijó mediante el adhesivo Z70 de HBM.

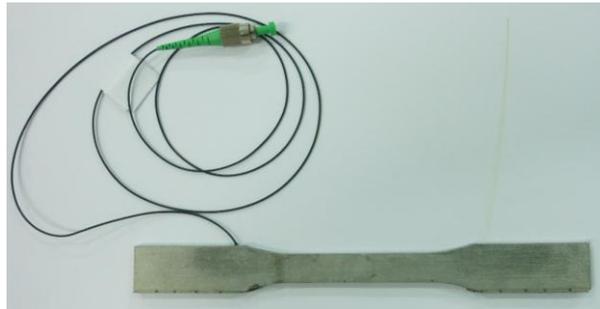


Figura 153. Probeta PR05.

Esta probeta se ensayó a tracción, comparándose la medida del FBG con la de un extensómetro considerado como referencia. Se efectuaron un total de tres ensayos hasta 12.000 N, para analizar la repetibilidad de los resultados. En todos los casos la velocidad se estableció en 2 mm/min.

Los resultados se presentan en la Figura 153 y la Tabla 33. El análisis de estos datos

muestra valores muy similares entre ambos dispositivos de medida, encontrándose sus respuestas prácticamente superpuestas hasta los 8.000 N, punto en el que empiezan a separarse. Esto puede estar ocasionado por la aparición de no linealidades en el comportamiento de la fibra a altas cargas, a consecuencia del despegue o la pérdida de rigidez del pegamento empleado.

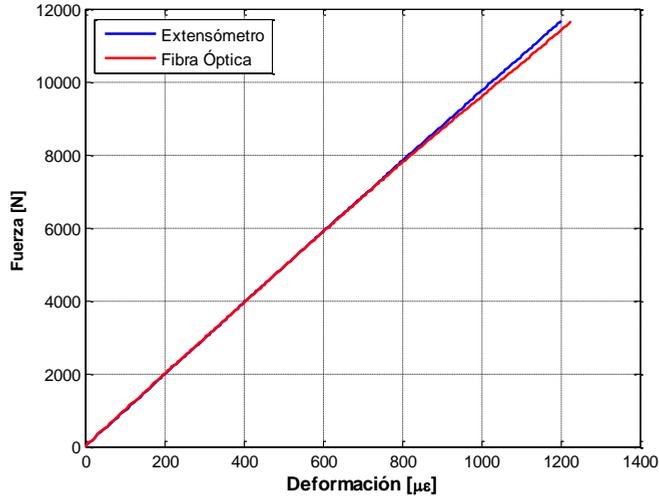


Figura 154. Fuerza vs deformación en el ensayo III (hasta 12.000N).

Tabla 33. Resultados de ensayos de tracción de la probeta PR05.

Ensayo	Deformación		
	Extensómetro [$\mu\epsilon$]	FBG [$\mu\epsilon$]	$\Delta\epsilon$ [%]
I	1.228	1.215	1,06
II	1.223	1.217	0,49
III	1.202	1.225	1,9

Como se aprecia en la Tabla 33, el ensayo III es en el que mayores discrepancias aparecen entre las medidas del extensómetro y la fibra óptica, donde $\Delta\epsilon \sim 2\%$. En los ensayos anteriores, la diferencia entre los dos registros es menor o igual al 1%.

7.4. Caso de estudio: Optimización topológica y sensorización de componente de vehículo lanzador

Las técnicas de optimización estructural han experimentado en la última década un importante crecimiento gracias al desarrollo de los métodos de fabricación aditiva. Dado que las geometrías resultantes de los trabajos de optimización suelen ser complejas, el único procedimiento viable para su fabricación es la tecnología de *Additive Manufacturing*.

En esta sección se presenta el proceso de sensorización con redes de Bragg de un soporte para conector optimizado [BER 2017] situado en el adaptador de carga útil (ACU) del lanzador Vega 937.

7.4.1. Introducción al proceso de optimización topológica

En la industria aeronáutica y el sector aeroespacial, la reducción del peso de las estructuras es un aspecto fundamental. En el caso espacial, el coste de elevar carga al espacio está en torno a 20.000 dólares por kilo [KAK 2011]. Por ello, la reducción del peso estructural supone un ahorro significativo de los costes de operación, permitiendo aumentar la carga de pago.

La optimización topológica consiste en encontrar la distribución de material idónea que satisfaga unas determinadas solicitaciones mecánicas o estructurales con el mínimo peso posible. La tipología de la estructura resultante es desconocida, y en general, completamente diferente a la inicial. Se parte de una pieza cuya geometría y dimensiones iniciales cumplen todos los requisitos exigidos para el componente en una determinada condición de carga. Durante el proceso se definirá la distribución de material, la forma y la tipología de la pieza de manera que se garantice el correcto comportamiento con la mínima cantidad de masa [CHR 2008, OLA 2010]. El modelado matemático del problema de optimización topológica se detalla en [BEN 2004, BRU 2005, PAR 2010 (2)].

El análisis y la implementación de la optimización topológica se realizan mediante el *software* de elementos finitos HyperWorks, de la compañía Altair Engineering HyperWorks 14.0.

7.4.2. Optimización topológica de soporte para conector

Los trabajos de optimización topológica y sensorización se realizan sobre un soporte para conector perteneciente al lanzador espacial Vega, de la Agencia Espacial Europea (ESA). Vega es un cohete desarrollado de forma conjunta por la ESA y la Agencia Espacial Italiana (ASI) desde 1.998, diseñado para poner en órbitas bajas y polares satélites de entre 300 y 2.500 kg para misiones científicas y de observación de la Tierra (Figura 155 a).

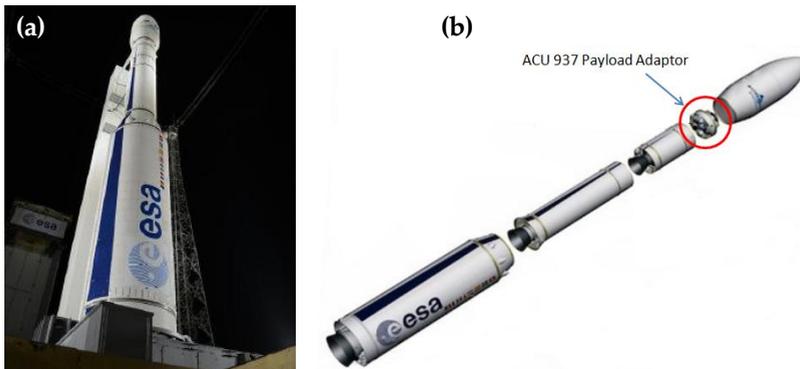


Figura 155. (a) Lanzador Vega en la plataforma de lanzamiento previo al despegue [ESA 2016] y (b) Etapas estructurales del Lanzador Vega [LAG 2013].

El cohete consta de varias etapas, las cuales se muestran en la Figura 155 b. El módulo superior es el de liberación de carga útil, en el que se encuentra el Adaptador de Carga Útil ACU (*Payload Adaptor*). Está compuesto por un carenado que protege la carga útil durante el despegue y la interfaz de carga útil-lanzador (Figura 156 a). Sobre el ACU se sitúan los soportes para conectores.

El diseño original del soporte para conector consta de 4 piezas (Figura 156 b). La parte superior o torreta se conforma a partir de una lámina, mientras que la parte inferior o base se compone de tres chapas. La unión de la torreta a la base se efectúa a través de tres puntos. Las dos chapas laterales se conectan con la central por ocho puntos cada una. Por último, la fijación de la estructura con la interfaz del ACU se realiza mediante seis puntos.

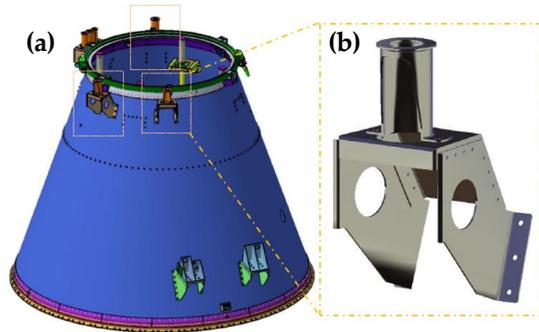


Figura 156. (a) ACU Vega 937 en configuración estándar y (b) diseño original del soporte para conector [LAG 2013].

El objetivo del proceso de optimización topológica fue minimizar la masa del componente, verificando que todas las frecuencias naturales fueran superiores a los 100 Hz y que la geometría resultante mantuviese la simetría respecto al plano longitudinal de la pieza.

El resultado de la optimización se muestra en la Figura 157. El componente presenta una reducción de peso respecto a la geometría original del 56,5%, donde además, se ha eliminado un punto de fijación del soporte, suponiendo una reducción de peso extra al no ser necesarios los tornillos ni demás elementos de unión.

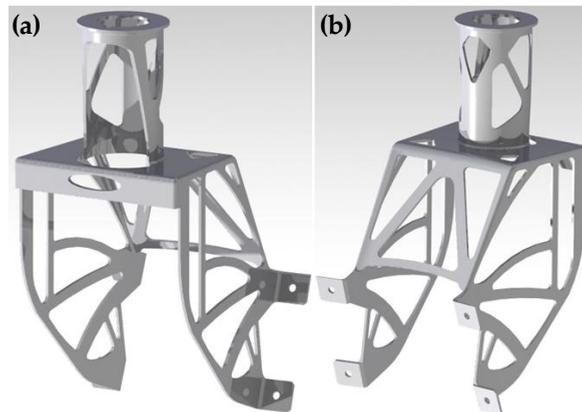


Figura 157. Vista (a) frontal y (b) posterior del soporte conector optimizado.

7.4.3. Fabricación y sensorización

La pieza se ha fabricado mediante la tecnología de *Additive Manufacturing* en la aleación de acero inoxidable AISI 316 L a escala 1:2. Con objeto de evitar situar soportes para la fabricación de los huecos creados en las paredes, se ha introducido una estructura de rejilla (Figura 158 a), la cual supone una leve penalización de la masa pero simplifica tanto la fabricación como el post-procesado requerido. En la Figura 158 b se presenta la pieza con los soportes necesarios para la fabricación.

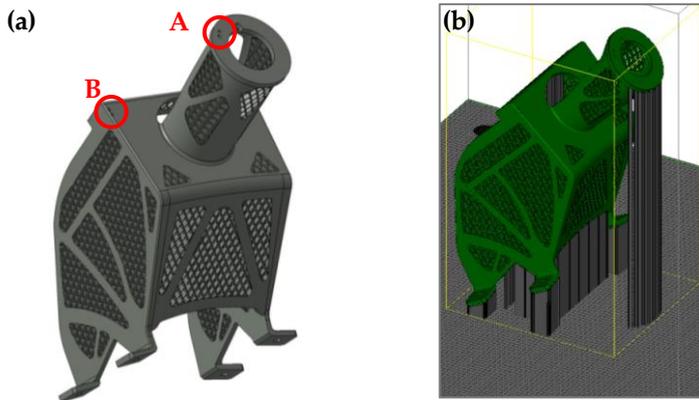


Figura 158. (a) Geometría optimizada con rejilla y (b) pieza con soportes para su fabricación mediante AM.

La Figura 159 muestra imágenes del soporte para conector optimizado tras su fabricación.

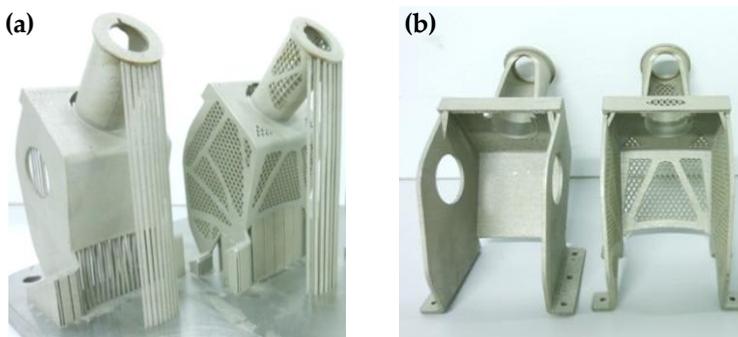


Figura 159. Soporte original y optimizado fabricado mediante AM en AISI 316 L (a) adheridos a la placa de fabricación y (b) extraídos de la placa.

Para la introducción de los sensores de fibra óptica en el interior del componente se han diseñado dos canales de diámetro 1 mm, uno en la torreta y otro en la base, cuyos orificios de entrada se identifican en la Figura 158 a con las letras A y B, respectivamente. Los recorridos de estos conductos se aprecian en la radiografía del componente mostrado en la Figura 160. La ubicación y trayectorias han sido seleccionadas atendiendo a diversos aspectos. En primer lugar, tras el análisis del campo de deformaciones de la pieza, se verifica que en estas regiones se alcanzan los valores máximos. Asimismo, estas trayectorias garantizan la viabilidad del proceso de sensorización mediante fibra óptica. Junto a los canales para la fibra óptica, se fabrican pequeños conductos para la introducción del adhesivo, de diámetro 1,2 mm.

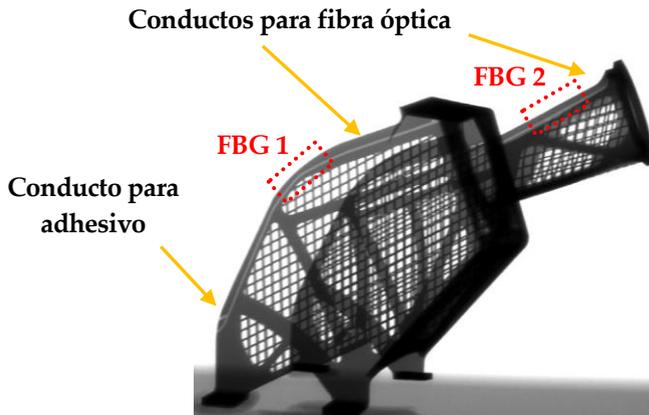


Figura 160. Radiografía del soporte para conector optimizado, con canales internos para la integración de fibra óptica.

La estructura se instrumentó con dos redes de Bragg, marcadas en dos fibras ópticas independientes. La localización de los FBGs se indica en la Figura 160. El adhesivo empleado para la fijación de la fibra fue Loctite 401, el cual se introdujo en el interior del componente mediante una aguja de diámetro de 0,8 mm. En la Figura 161 se presentan imágenes del elemento tras la instalación de las fibras.

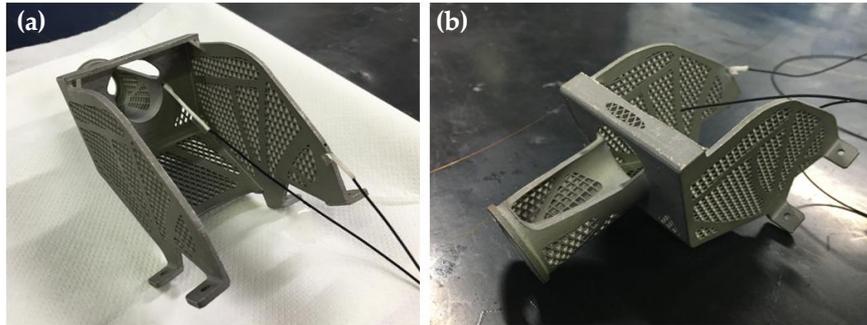


Figura 161. Imágenes del soporte para conector tras la instalación de las redes de Bragg.

7.4.4. Ensayos mecánicos

Para evaluar la correcta lectura de las redes de Bragg instaladas, el soporte para conector se sometió a una serie de ensayos mecánicos de compresión. Con el fin de garantizar la adecuada introducción de la carga en el elemento, se diseñó un útil de ensayo en el que la estructura se fija mediante las cuatro uniones atornilladas de la base, de forma que la superficie superior de la torreta queda paralela al plano horizontal (Figura 162 a).

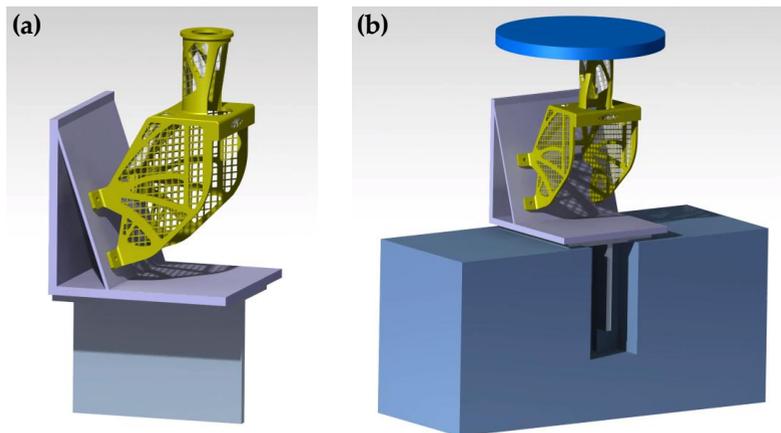


Figura 162. Modelo del (a) utillaje y (b) set-up para el ensayo del soporte para conector.

La carga se aplica en dirección normal a la superficie superior de la torreta (Figura 162 b). Para favorecer el correcto apoyo entre el plato compresión y la estructura, entre ambos elementos se situaron dos capas de neopreno de 3 mm de espesor cada una, eliminando así el efecto de posibles irregularidades superficiales existentes en la pieza a consecuencia de la rugosidad resultante del proceso de fabricación.

La configuración real del ensayo se muestra en la Figura 163, donde se aprecian diversos instantes previos a la ejecución del ensayo.

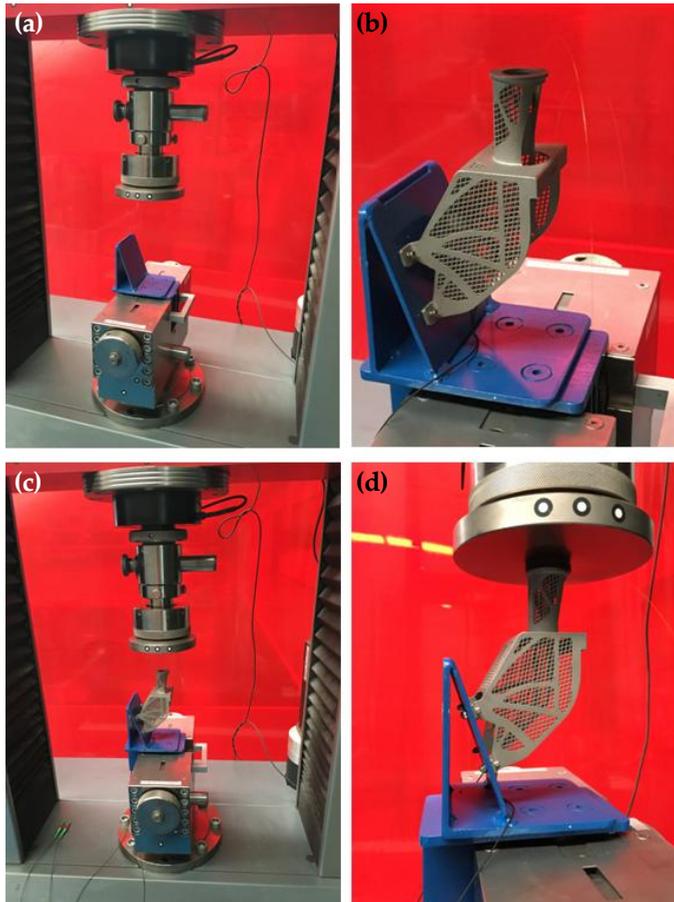


Figura 163. Set-up de ensayo del soporte para conector.

La estructura se sometió a un total de 15 ensayos, aumentando de forma progresiva el límite superior de carga en el rango de valores comprendido entre 50 y 1.500 N. En todos los casos, el control del ensayo se efectuó en desplazamiento, estableciéndose la velocidad en 1 mm/min.

La Figura 164 muestra los resultados del ensayo realizado a 1.500 N. El análisis de estos datos revela una respuesta no lineal de la estructura durante prácticamente la totalidad del ensayo y registrada por los dos sensores, aunque el efecto es más acusado en el FBG localizado en la base. El origen de este comportamiento puede ser el deslizamiento de los tornillos de la base, o bien, el desplazamiento de la línea de acción de la carga aplicada sobre la torreta, no siendo totalmente paralela al eje longitudinal de la pieza. Los máximos alcanzados son de $151 \mu\epsilon$ en el sensor situado en la torreta y $119 \mu\epsilon$ en el FBG de la base. En torno a los 125 N se aprecia un cambio de comportamiento tanto de la lectura de las redes de Bragg como en la medida de la carga aplicada, motivado por el acomodo de los tornillos que fijan la estructura al útil de ensayos empleado. Este efecto se aprecia en todos los ensayos realizados en los que la carga máxima aplicada excede los 125 N.

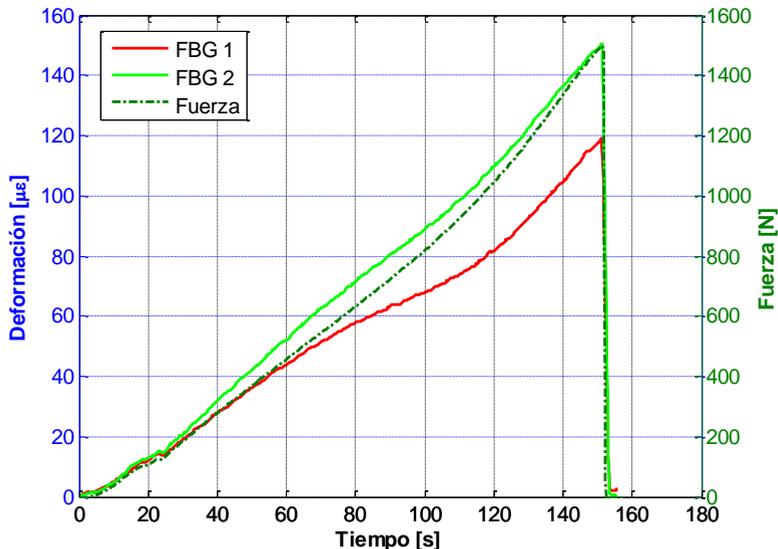


Figura 164. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 1.500 N.

Para evaluar la repetibilidad de la respuesta de los sensores, se han realizado tres ensayos para el mismo valor máximo de carga, presentándose las deformaciones máximas alcanzadas por cada sensor en la Tabla 34. Los datos muestran una buena repetibilidad en las medidas, siendo las deformaciones obtenidas con el FBG 2 coincidentes en los tres ensayos, mientras que las diferencias máximas registradas en el sensor de la base son de $6 \mu\epsilon$ (5%).

Cabe indicar que aunque las deformaciones y la carga aplicada son de compresión, tanto en la Figura 164 como en la Tabla 34 estos valores se presentan con signo positivo por claridad de la representación.

Tabla 34. Resultados de ensayos de compresión del soporte para conector (1.500 N).

Ensayo	Deformación	
	FBG 1 (Base) [$\mu\epsilon$]	FBG 2 (Torreta) [$\mu\epsilon$]
I	119	151
II	122	150
III	116	151

Finalmente, se muestra la evolución durante el ensayo del pico característico del sensor de la base (Figura 165) y del situado en la torreta (Figura 166). En ambos casos se aprecia el desplazamiento experimentado por la longitud de onda característica hacia valores menores que el original, como consecuencia de la carga de compresión aplicada. Tras la descarga, la longitud de onda vuelve a su valor original, como se distingue en la última componente de las representaciones tridimensionales mostradas.

Resultados análogos a los presentados se han obtenido en todos los ensayos efectuados.

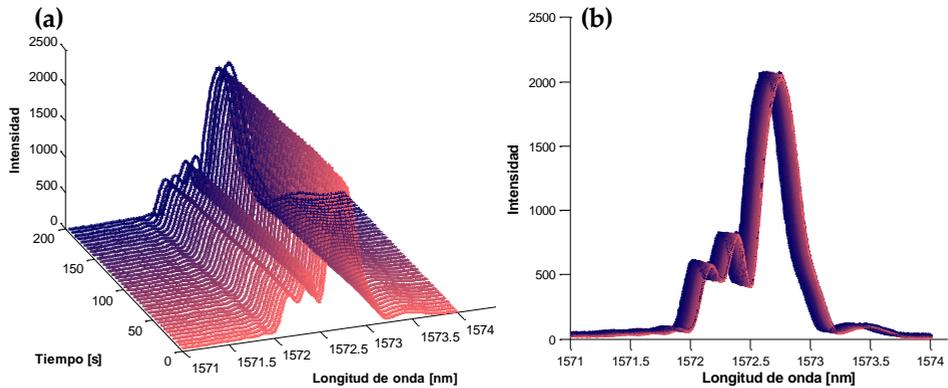


Figura 165. Representación (a) 3D y (b) plana de la longitud de onda reflejada por el sensor de la base (FBG 1) durante el ensayo hasta 1.500 N.

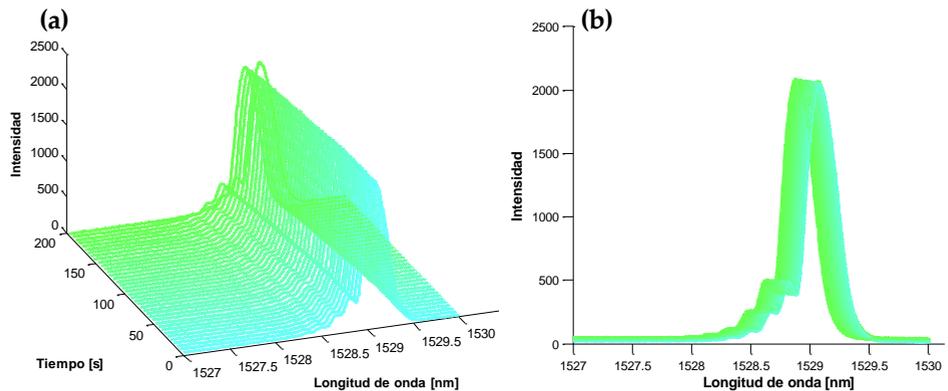


Figura 166. Representación (a) 3D y (b) plana de la longitud de onda reflejada por el sensor de la torreta (FBG 2) durante el ensayo hasta 1.500 N.

7.4.5. Análisis de elementos finitos

Para comprobar la validez de la lectura de los sensores integrados en la estructura, se realiza un análisis de elementos finitos de la misma, simulando las condiciones de carga y de contorno aplicadas en los ensayos.

El *software* utilizado ha sido HyperWorks (OptiStruct). Se ha efectuado un análisis elástico lineal, considerando un único caso de carga en el que una fuerza de 1.500 N se aplica en dirección normal a la interfaz superior de la torreta. Esta fuerza se

distribuye uniformemente sobre la superficie (mediante una red de elementos rígidos RBE2), representado así la acción que el plato de compresión superior ejerce sobre la torreta del soporte para conector. Las uniones de la base se modelan como empotramientos. El mallado se realiza con elementos CTETRA de 1 mm. La pieza modelada para el análisis se muestra en la Figura 167, en la que es posible apreciar los orificios de entrada de los conductos que alojan la fibra óptica (letras A y B en Figura 167 b).

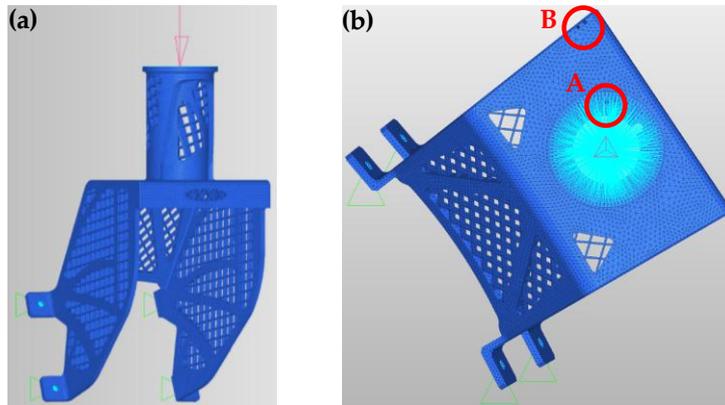


Figura 167. (a) Perspectiva y (b) vista superior del mallado del soporte para conector optimizado con conductos para alojar los sensores de fibra óptica.

Los resultados del análisis en tensión muestran que los valores máximos se sitúan en 497 MPa, inferior a los 529 MPa correspondientes al límite de fluencia del material. Dichos máximos se alcanzan en los cuatro puntos de fijación del componente al resto de la estructura, coincidente con la presencia de concentradores de tensión. La unión de la torreta a la base es otra zona donde las tensiones se elevan, encontrándose en torno a 245 MPa, a causa de las esquinas reentrantes que provocan la existencia nuevamente de una zona de concentración de tensiones. En el resto de la estructura, las tensiones no exceden los 150 MPa, no apareciendo concentradores de tensión derivados de la presencia de los canales para la fibra óptica.

El campo de deformación resultante se muestra en la Figura 168. Los máximos se producen en los cuatro puntos de fijación de la pieza, donde se registran $3.100 \mu\epsilon$, seguido de la zona circundante a las esquinas en las que se unen la torreta y la base ($1.520 \mu\epsilon$).

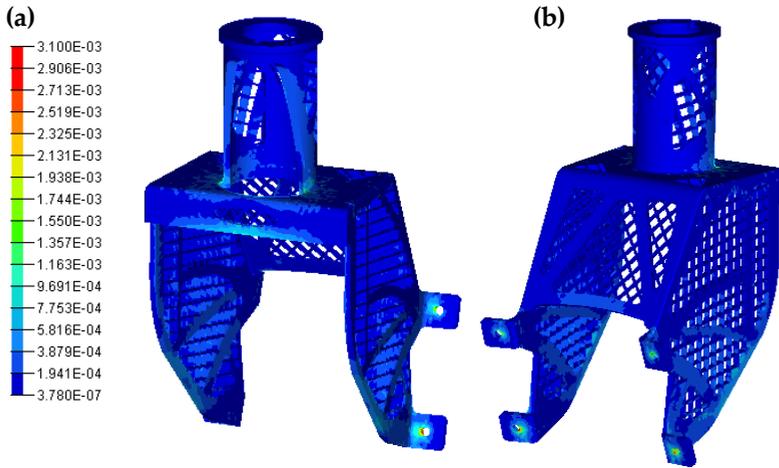


Figura 168. Distribución de deformaciones en el soporte para conector: perspectiva (a) frontal y (b) posterior.

Para comparar los valores de deformación obtenidos de forma numérica y experimental, se realizan dos cortes en la estructura, paralelos a la dirección longitudinal de los conductos situados en la base y la torreta (Figura 169). A partir de estas imágenes se determinan los valores de deformación que se registran en las paredes del conducto adyacentes a la localización de los sensores y a las cuales se encuentran unidos de forma solidaria por la acción del pegamento. Aunque se extremó la precaución durante la instalación de las redes de Bragg, la posición real de los sensores puede diferir de la teórica. Asimismo, el valor de la deformación proporcionado por la red de Bragg es la media en toda su longitud. Por ello, el cálculo de la deformación numérica se realiza a través de una media aritmética de diez puntos localizados alrededor de la región de interés.

La deformación obtenida de forma numérica para la ubicación del sensor FBG-1, a una carga de 1.500 N, es de $126 \mu\epsilon$, mientras que para el FBG-2 se obtienen $162 \mu\epsilon$. Los datos determinados de forma experimental se presentaron en la Tabla 34, siendo los valores medios de $119 \mu\epsilon$ para FBG-1 y $150 \mu\epsilon$ para FBG-2. Se aprecia una buena correspondencia entre los valores numéricos y experimentales, obteniéndose deformaciones similares y del mismo orden de magnitud por ambos procedimientos. En ambos casos, las diferencias entre los datos procedentes de las simulaciones y los ensayos no superan el 8%, garantizándose la validez de los datos medidos con los FBGs. Las diferencias detectadas tienen su origen en la posible

discrepancia entre la ubicación real y teórica del sensor y a posibles pequeñas diferencias entre las condiciones de contorno del ensayo real y la simulación.

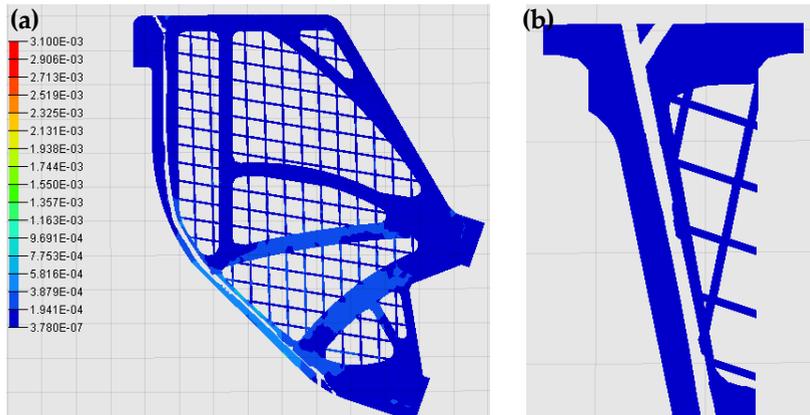


Figura 169. Distribución de deformaciones en la sección del soporte para conector que contiene (a) el sensor FBG-1 y (b) el sensor FBG-2.

Para cuantificar la influencia de los conductos sobre el campo de tensiones de la estructura, se realizó un nuevo análisis en el que dichos conductos se eliminaron. La distribución de tensiones resultantes no registra diferencias ni en la distribución ni en su valor máximo respecto al de la pieza con conductos.

7.5. Discusión

El presente capítulo se ha centrado en el estudio de la integración de redes de Bragg en estructuras metálicas. Un nuevo procedimiento, análogo a la técnica de embebido en los materiales compuestos, se ha propuesto y evaluado su viabilidad.

Dadas las propiedades físicas y mecánicas de la fibra óptica, es necesario el diseño de conductos en los cuales la fibra quede integrada de forma solidaria a la estructura, introduciendo la menor perturbación posible y evitando las pérdidas en la señal óptica. Como resultado del estudio se han extraído las siguientes reglas de diseño que se deben satisfacer:

- Diámetro del conducto: este valor debe ser de 1 mm, de forma que se garantice que el conducto se logra fabricar correctamente, independientemente de su orientación respecto a la dirección de fabricación. Este tamaño permite absorber las

tolerancias de fabricación propias de la tecnología, además de la rugosidad resultante en el interior del conducto, que con valores menores a dicho diámetro pueden impedir la introducción de la fibra.

- Geometría: aunque durante las pruebas efectuadas se ha logrado la introducción de la fibra óptica en todos los canales fabricados, incluso en aquellos con radios de giro de 4,5 mm, para evitar pérdidas de señal el radio mínimo se establece en 17 mm. Es de especial relevancia intentar evitar radios de giro acusados en el punto de introducción de la fibra en el componente, pues dicho proceso se dificulta, así como la extracción del polvo no fundido del interior del conducto.
- Fijación de fibra óptica: para la unión solidaria de la fibra a la pieza se propone la fabricación de un pequeño conducto adicional, de diámetro 1,2 mm por el cual introducir un adhesivo con la ayuda de una aguja de 0,8 mm instalada en una jeringuilla. La acción de la jeringuilla permite introducir el adhesivo en el interior de todo el conducto, bañando por completo la fibra y fijándola a la estructura.
- Fibras con soldaduras: para minimizar el riesgo de roturas la fibra debe introducirse en el componente por el extremo opuesto al que se encuentra la soldadura.

El procedimiento propuesto se ha aplicado a un componente real. Se trata de un herraje metálico del lanzador Vega, el cual ha sido sometido a un proceso de optimización topológica. En la geometría optimizada se han introducido dos canales adicionales para incluir dos redes de Bragg: una paralela a la dirección longitudinal de la torreta y una segunda localizada en la base de la pieza. La estructura fue ensayada a compresión, simulando las condiciones de operación real de la pieza.

En los ensayos realizados, se aprecia una respuesta no lineal de las deformaciones ante la carga aplicada, en especial en el sensor situado en la base. El origen de esto puede ser un cambio en las condiciones de contorno, debido al deslizamiento de los tornillos. Asimismo, es posible que durante la ejecución del ensayo se haya producido algún tipo de distorsión o alabeo lateral de la superficie como consecuencia del tipo de amarre de la estructura. El ensayo se ha repetido en tres ocasiones, evaluando así la repetibilidad de los datos, la cual queda garantizada.

El análisis numérico de la pieza con los conductos para fibra permitió por un lado corroborar la medida extraída con las redes de Bragg, apreciándose una buena correlación entre ambos sets de datos. Las diferencias detectadas (del 6% en el

FBG-1 y del 8% en el FBG-2) se deben a discrepancias entre la localización real y teórica de los sensores, a pequeñas diferencias en las condiciones de contorno y a la aparición de la no linealidad durante la ejecución de los ensayos.

Se verifica que dadas las reducidas dimensiones de los conductos y a su orientación respecto a la carga aplicada en la estructura (alineados con la dirección de las tensiones), estos no afectan a las propiedades mecánicas de la estructura, no apreciándose alteraciones en el campo de tensiones ni en su valor máximo motivadas por la presencia de dichos canales. El diseño de los conductos debe realizarse basándose en análisis previos de elementos finitos del componente, de forma que se evite introducir concentradores de tensión en la estructura a consecuencia de la red de canalizaciones.

De forma análoga a las estructuras de material compuesto, el punto de salida de la fibra óptica del componente es una región crítica, que debe ser tratada con especial atención. Mediante el componente evaluado en esta sección se ha demostrado la viabilidad del procedimiento y su potencial, introduciendo una nueva línea de desarrollo para la creación de estructuras metálicas sensorizadas, con un procedimiento que hace posible monitorizar su estado durante toda su vida útil. Para aumentar la robustez de la salida de la fibra se propone la fabricación de las piezas a instrumentar con conectores adheridos (análogos a los desarrollados en el Capítulo 4 "Manipulación de Fibra Óptica e Integración en Material Compuesto"). Así, no se tendrían secciones de fibra sin adherir a la estructura y la salida de la misma quedaría protegida frente a sollicitaciones externas. Dicho conector no formaría parte de la estructura del componente, siendo un elemento adicional que no afectaría a sus propiedades mecánicas. Su geometría podría ser miniaturizada, reduciendo el incremento de peso producido e incluyendo los conductos para la introducción del adhesivo en el conector, de forma que se minimizase su influencia sobre la integridad del componente.

Como alternativa a la integración de conductos, se podrían fabricar hendiduras en la superficie de la pieza a monitorizar, en los que se integrarían los sensores de fibra óptica gracias a la acción de un adhesivo. Esta metodología permitiría facilitar el proceso de integración de los sensores, quedando las fibras protegidas en el componente y pudiendo situar los FBGs de forma precisa, lo cual facilitaría su localización y ubicación.

8. CONCLUSIONES

AUNQUE en su origen los FBGs se desarrollaron como sensores de deformación, una de sus principales ventajas es la posibilidad de medir distintas magnitudes físicas. En esta tesis se ha evaluado la funcionalidad de estos sensores para la medida de deformación, temperatura y para la monitorización simultánea de ambas magnitudes durante el proceso de curado de estructuras de material compuesto.

El crecimiento experimentado por las estructuras de material compuesto hace necesario desarrollar herramientas que permitan evaluar tanto su proceso de fabricación como su comportamiento durante su vida en servicio. El trabajo realizado ha demostrado la validez de las redes de Bragg para caracterizar ambas etapas. La integración de FBGs embebidos en la estructura durante la fabricación del laminado posibilita el análisis del proceso de curado, determinando aspectos críticos como el instante en el que finaliza la polimerización de la resina o las deformaciones residuales de la pieza resultantes, ambas magnitudes de gran interés puesto que permiten optimizar dicho proceso y minimizar sus efectos negativos.

Dentro del marco de la industrialización, el objetivo principal de esta tesis ha sido aumentar la robustez de la instalación de fibra óptica, abordando sus principales puntos débiles que limitan su empleo en aplicaciones reales. Las soluciones de integración desarrolladas facilitan y mejoran el proceso de colocación e integración de la fibra óptica en grandes estructuras. La complejidad del proceso de instalación de la fibra se reduce de forma significativa permitiendo una mejor manipulación y pudiendo situar los sensores en las localizaciones deseadas. Su eficacia en entornos

industriales se ha demostrado, reduciendo de forma drástica la mortandad de sensores durante la instalación.

Las mejoras implementadas se han empleado durante la monitorización de los ensayos estructurales de componentes representativos de los principales campos de aplicación de las redes de Bragg, esto es, la industria aeroespacial, la ingeniería civil y las estructuras de material compuesto, verificándose la aptitud de los sensores para su monitorización.

De la investigación realizada con sensores de Bragg puede concluirse:

- Las redes de Bragg garantizan el seguimiento y medida de deformaciones tanto estáticas como dinámicas (térmicas y/o mecánicas).
- Estos sensores, además, permiten registrar y detectar la aparición de inestabilidades locales y globales en la estructura (pandeo).
- Posibilitan la completa caracterización del curado de material compuesto, pudiéndose realizar el análisis en tiempo real.
- El uso de los diversos dispositivos de protección de fibra óptica desarrollados favorece la supervivencia de los sensores, permitiendo el seguimiento y análisis de ensayos y convirtiendo a los sensores de fibra óptica en una alternativa factible a los sensores tradicionales de medida.
- El empleo de sensores ópticos permite reducir de forma significativa el tiempo requerido para la instalación y comprobación de la instrumentación de una estructura, así como los elementos auxiliares necesarios (p.e. cables para las instalaciones de sensores óhmicos).
- La ubicación de sensores embebidos en estructuras de material compuesto entre el revestimiento y los elementos rigidizadores representa una solución de gran interés en la industria aeronáutica, donde dichas estructuras son características. Las ventajas aportadas por esta localización de la fibra son numerosas, quedando protegida ante sollicitaciones externas y siendo posible monitorizar el proceso de curado y el estado de la unión adhesiva, aspecto crítico en el sector.
- La libertad geométrica que proporciona la tecnología de *Additive Manufacturing* permite desarrollar un nuevo método de integración de sensores de

fibra óptica en estructuras metálicas, donde el FBG se introduce en la pieza a través de un conducto de reducidas dimensiones diseñado en su interior y que recorre los principales puntos de interés. Dicho conducto debe diseñarse sin perjudicar la resistencia de la pieza. Este procedimiento proporciona una nueva vía de integración de sensores de fibra óptica en componentes metálicos, siendo la única alternativa existente al procedimiento de encolado.

El trabajo realizado en la presente tesis doctoral ha permitido el desarrollo y la implementación de soluciones que ayudan a convertir a las redes de Bragg en herramientas versátiles, funcionales y de gran potencial para su aplicación en entornos industriales en el campo de los ensayos mecánicos y la monitorización de la salud estructural.

REFERENCIAS

[ADA 1991] M. E. Adams, G. A. Campbell, A. Cohen: Thermal Stress Induced Damage in a Thermoplastic Matrix Material for Advanced Composites, *Polymer Engineering and Science* 31 (1991) 18, 1337–1343.

[ADU 2010] X. A. Aduriz, C. Lupi, N. Boyard, J. L. Bailleul, D. Leduc, V. Sobotka, N. Lefevre, X. Chapeleau, C. Boisrobert, D. Delaunay: Quantitative Control of RTM6 Epoxy Resin Polymerisation by Optical Index Determination, *Composites Science and Technology*, 67 (2007) 3196-3201.

[AIR 2007] Airbus Composite training, VPD Conference, Frankfurt, Germany (2007).

[AKS 2003] N. V. Akshantala, L. C. Brinson: Experimental Study of Viscoelastic Effects and Aging on Elevated Temperature Damage and Failure in Polymer Composites, *Mechanics of Time-Dependent Materials* 7 (2003) 1, 1–19.

[ANN 2008] V. G. M. Annamdas, Y. Yang, H. Liu: Current Development in Fiber Bragg Grating Sensors and their Applications, In *Proc. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, San Diego, USA, SPIE Proceedings (2008).

[BAL 2006] D. Balageas, C. Fritzen, A. Guemes: *Structural Health Monitoring*, Wiley-ISTE, London/Newport Beach, Great Britain/USA (2006).

[BAR 1994] J. A. Barnes, G. E. Byerly: The Formation of Residual Stresses in Laminated Thermoplastic Composites, *Composite Science and Technology* 51 (1994) 4, 479–494.

[BAR 2007] D. Barrera, C. Silvestre, M. Cruz, R. García-Olcina, S. Sales: Development of a Multi-Point Multi-Parametric Sensor for Structural Health Monitoring, In *Proc. Sensor Technologies and Applications (SensorComm)*, Valencia, España, IEEE Proceedings (2007).

[BAR 2008] D. Barrera: Diseño de Sensores Ópticos Avanzados basados en FBGs,

Universidad Politécnica de Valencia (2008).

[BEN 2004] M. P. Bendsoe, O. Sigmund: *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*, Springer Science & Business Media, 1st Ed. (2003).

[BER 2017] L. Berrocal, R. Fernández, S. González, A. Perrián, J. Vilanova, L. Rubio, J. M. Martín, J. Guerrero, F. Lasagni: *Topology Optimization of Aerospace Parts for Additive Manufacturing*, *Progress in Additive Manufacturing* (2017).

[BET 2000] D. Betz, M. N. Trutzel, L. Staudigel, W. Martin, O. Krumpholz: *Fiber Optic Smart Sensing of Component Deformation un Adaptive Wings*, In Proc. 22th International Congress of Aeronautical Science (ICAS), Harrogate, Reino Unido; Proceedings (2000).

[BET 2006] D.C. Betz, G. Thursby, B. Culshaw, W.J. Staszewski: *Advanced Layout of a Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette*, *Journal of Lightwave Technology* 24 (2006), 1019–1026.

[BEU 2012] R. P. Beukema: *Embedding Technologies of FBG Sensors in Composites: Technologies, Applications and Practical Use*, In proc. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), Dresden, Germany, NDT Proceedings (2012).

[BHA 1996] M. S. Bhalerao: *On Process-Induced Fiber Waviness in Composites: Theory and Experiments*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas, Austin, USA (1996).

[BLA 2010] W. Błażejowski, A. Czulak, P. Gasior, J. Kaleta, R. Mech: *SMART Composite High Pressure Vessels with Integrated Optical Fiber Sensors*, In Proc. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, San Diego, EEUU 7647, SPIE Proceedings (2010).

[BLA 2011] W. Błażejowski, P. Gasior, J. Kaleta: *Application of Optical Fibre Sensors to Measuring the Mechanical Properties of Composite Materials and Structures*, *Advances in Composites Materials - Ecodesign and Analysis*, Brahim Attaf, Wroclaw, Poland, 1st Edition (2011), 221-246.

[BRU 2005] T. E. Bruns: *A Reevaluation of the SIMP Method with Filtering and an Alternative Formulation for Solid-Void Topology Optimization*, *Structural Multidisciplinary Optimization*, 30 (2005) 428-436.

[CAL 1994] W. D. J. Callister: *Materials Science and Engineering: An Introduction*.

John Wiley & Sons; USA, 1st Edition (1994).

[CAS 2017] <https://www.castrocompositesshop.com/es/preimpregnados/1231-prepreg-carbono-epoxi-unidireccional-para-piezas-mtm57t700s-24k-300-35rw.html>

[CER 2012] I. Cerny, G. Jeronimidis, J. Hou, R. M. Mayer, A. Bruns E. Voet: Verifying the Potential of Fibre Optic Sensors to Monitor Strains and Cracks in Fibre Composites, In Proc. 15th European Conference on Composite Materials, Venecia, Italia, Proceedings (2012).

[CHI 2011 a] C. C. Chiang: Curing Monitoring of Composite Material Using Embedded Fiber Bragg Grating Sensors, *Advances in Composite Materials* (2011) 345-360.

[CHI 2011 b] C. C. Chiang: Investigation of the Residual Stress in Gr/Epoxy Laminated Composites by using Embedded Fiber Bragg Grating Sensor, *Advanced Materials Research* 287-290 (2011) 357-363.

[CHR 2008] P. W. Christensen, A. Klarbring: *An Introduction to Structural Optimization*, Springer Science & Business Media, Netherland, 1st Ed. (2008).

[COL 2006] F. Colpo: Residual Stress Characterization in a Single Fibre Composite Specimen by Using FBG Sensor and the OLCR Technique, Ph.D. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland (2006).

[COL 2007] F. Collombet, M. Mulle, H. Hernández, B. Douchin, R. Zitounne, P. Olivier, Y. H. Grunevald: On the use of Optical Fibres with Bragg Gratings for the Identification of Process-Properties Relations of Composite Structures, In Proc. 16th International Conference on Composite Materials, Kioto, Japón; Proceedings (2007).

[COR 2010] P. Corredera: *Sensores de Fibra Óptica y sus Aplicaciones en IO-CSIC*, Instituto de Óptica "Daza de Valdés", CSIC, Madrid (2010).

[COW 1997] K. D. Cowley, P. W. R. Beaumont: The Measurement and Prediction of Residual Stresses in Carbon-Fibre/Polymer Composites, *Composite Science and Technology* 57 (1997) 11, 1445–1455.

[DAM 1993] A. D'Amore, G. Caprino, L. Nicolais, G. Marino: Long-Term Behaviour of PEI and PEI-Based Composites Subjected to Physical Aging, *Composite Science and Technology* 59 (1999) 13, 1993–2003.

[DAW 2007] T. A. Dawood, R. A. Sheno, M. Sahin: A Procedure to Embed Fibre

Bragg Grating Strain Sensors into GFRP Sandwich Structures, Composites:Part A 38 (2007), 217-226.

[DEG 2001] J. Degrieck, W. De Waele, P Verleysen: Monitoring of Fibre Reinforced Composites with Embedded Optical Fibre Bragg Sensors, with Application to Filament Wound Pressure Vessels, NDT&E International 34,(2001) 289-296.

[DES 1996] A. P. Deshpande, J. C. Seferis: Processing Characteristics in Different Semi-Crystalline Thermoplastic Composites Using Process Simulated Laminate (PSL) Methodology, Journal of Thermoplastic Composite Materials 9 (1996) 2, 183-198.

[DUN 1990] J. R. Dunphy, G. Meltz, F. P. Lamm, W. W. Morey: Multifunction, Distributed Optical Fiber Sensor for Composite Cure and Response Monitoring, In Proc. Fiber Optic Smart Structures and Skins III, San José, Estados Unidos, SPIE Proceedings (1990).

[EAT 1992] N. C. Eaton, M. J. Curran, J. P. Dakin, H. Geiger: Factors Affecting the Embedding of Optical Fibre Sensors in Advanced Composite Structures, In Proc. Conference on Smart Structures for Aircraft and Spacecraft, Lindau, Germany, Proceedings (1992).

[EMM 2009] M. C. Emmons, G. P. Carman, K. P. Mohanchandra, W. L. Richards: Characterization and Birefringence Effect on Embedded Optical Fiber Bragg Gratings, Health Monitoring of Structural and Biological Systems, SPIE 7295 (2009).

[ESA 2016] www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/El_lanzador_Vega_de_la_ESA_completa_con_exito_el_lanzamiento_de_Proba-V

[EU 2017]<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/jti-cs2-2016-cfp04-lpa-01-23.html>.

[FAR 2001] C. R. Farrar, S. W. Doebling, D. A. Nix: Vibration-Based Structural Damage Identification, A Philosophical Transactions of the Royal Society 359 (2001), 131–149.

[FAR 2006] C. R. Farrar, K. Worden: An Introduction to Structural Health Monitoring, A Philosophical Transactions of the Royal Society 365 (2006), 303-315.

[FAR 2013] C. R. Farrar, K. Worden: Structural Health Monitoring - A Machine Learning Perspective, John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, First Edition (2013).

[FAV 1988] J. P. Favre: Residual Thermal Stresses in Fibre Reinforced Composite Materials—A Review, *Journal of the Mechanical Behavior of the Materials* 1 (1988) 1–4, 7–53.

[FBG 2015] <http://www.FBGs.com/references/transport-1/>

[FBG 2015 (2)] <http://www.FBGs.com/referencesadv/ben>

[FEN 2012] J. Feng: A 99 Line Topology Optimization Code Ole Sigmund in Matlab, School of Soft Matter Research Freiburg Institute for Advanced Studies, University of Freiburg, Germany (2012).

[FER 2005] S. Ferguson, T. W. Graver, A. Méndez: *Advances in Temperature Compensation of Fiber Optic Strain Sensors*, Structural Health Monitoring, FK Chang, Lancaster, Reino Unido, 1st Edition (2005).

[FER 2002] C. Fernández-Valdivielso, I. R. Matías, F. J. Arregui: Simultaneous Measurement of Strain and Temperature using a Fiber Bragg Grating and a Thermochromic Material, *Sensors and Actuators A* 101 (2002), 107-116.

[FOE 1999] R. Foedinger, D. Rea, J. Sirkis, C. Baldwin, J. Troll, R. Grande: Embedded Fiber Optic Sensor Arrays for Structural Health Monitoring of Filament Wound Composite Pressure Vessels, In *Proc. Smart Structures and Materials: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, Newport Beach, USA, SPIE Proceedings(1999), 289-301.

[FRI 2010] C. Frias, H. Faria, O. Frazão, P. Vieira, A. Marques: Manufacturing and Testing Composite Overwrapped Pressure Vessels with Embedded Sensors, *Materials and Design* 31, (2010) 4016–4022.

[FRO 2006] M. Frovel: *Sensores de Fibra Óptica Tipo Redes de Bragg Embebidos en Material Compuesto para Medir Deformaciones y Temperaturas Criogénicas*, Tesis Doctoral, ETSI Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, España (2006).

[FRO 2009] M. Frovel, G. Carrión, C. Gutiérrez, C. Moravec, J. M. Pintados: Temperature and Humidity Dependent Performance of FBG-Strain Sensors Embedded in Carbon/Epoxy Composites, *Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems* 7293 (2009).

[GAF 2000] R. Gafsi, M. A. El-Sherif: Analysis of Induced-Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings, *Optical Fiber Technology* 6 (2000) 299-323.

[GAT 1999] T. S. Gates, M. A. Grayson: On the Use of Accelerated Aging Methods for Screening High Temperature Polymeric Composite Materials, In Proc. AIAA Structures, Dynamics and Materials Conference, St. Louis, USA, Proceedings (1999) 925–935.

[GER 2005] F. Gerard: Fibre Optic Sensor Systems for Monitoring Composite Structures, Reinforced Plastics 49 (2005) 11.

[GIU 2014] V. Giurgiutiu: Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors, Academic Press, Elsevier, USA, 2nd Edition (2014).

[GLI 2004] B. Glisic, D. Inaudi: Health Monitoring of a Full Composite CNG Tanks Using Longgage Fiber Optic Sensors, In Proc. 11th SPIE's Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, EEUU, SPIE Proceedings (2004) 5384-5387.

[GLI 2007] B. Glisic, D. Inaudi: Fibre Optics Methods For Structural Health Monitoring, John Wiley & Sons, West Sunsex, United Kingdom, 1st Edition (2007).

[GRA 2010] I. Grabovac, T. Nuyens, C. Davis: Packaging and Mounting of In-Fibre Bragg Grating Arrays for Structural Health Monitoring of Large Structures, Technical Report, Department of Defence, Australian Government, DSTO Publications (2010).

[GRE 1999] A. K. Green, E. Shafir: Termination and Connection Methods for Optical Fibres Embedded in Aerospace Composite Components, Smart Materials and Structures 8 (1999), 269-273.

[GRE 2000] A. K. Green, M. Zaidman, E. Shafir, M. Tur, S. Gali: Infrastructure Development for Incorporating Fibre-Optic Sensors in Composite Materials, Smart Materials and Structures 9 (2000), 316-321.

[GRO 2000] A. Del Grosso, D. Inaudi, K. Bergmeister, U. Santa: Monitoring of Bridges and Concrete Structures with Fibre Optic Sensors in Europe, Smartec S.A. Manno, Switzerland (2000).

[GUE 1996] A. Guemes, J. M. Menendez: Fatigue Strength of Glass Reinforced Polyester (GRP) Laminates with Embedded Optical Fibers, In Proc. 3th International Conference on Intelligent Materials, Lyon, France, SPIE Proceedings 2779 (1996) 217-221.

[GUE 2013] A. Güemes, J. Sierra-Pérez: Fiber Optics Sensors, New Trends in

Structural Health Monitoring, CISM International Centre for Mechanical Science, W. Ostachowics and J. Guemes, Udine, Italia, 1st Edition (2013).

[GUI 2002] J. F. Guillen, W. J. Cantwell: The Influence of Cooling Rate on the Fracture Properties of a Thermoplastic-Based Fibre-Metal Laminate, *Journal of Reinforced Plastic Composites* 21 (2002) 8, 749–772.

[HAR 1998] F.M. Haran, J.K. Rew, P.D. Foote: Fiber Bragg Grating Strain Gauge Rosette with Temperature Compensation, In *Proc. Smart Structures and Materials: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, San Diego, USA, SPIE Proceedings 3330 (1998) 220–230.

[HAR 1999] B. Harris: *Residual Strains, Engineering Composite Materials*. London, United Kingdom, IOM Communications (1999) 79–83.

[HAR 2012] R. Hardis: *Cure Kinetics Characterization and Monitoring of an Epoxy Resin for Tick Composite Structures*, Ph.D. Dissertation, Iowa State University, USA (2012).

[HBM 2017] https://www.hbm.com/index.php?id=1629&L=2&utm_source=global_newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=NL_ESA_2017_01_ES&utm_marketing-project-id=U-00109415.

[HEL 2014] G. Hellard: *Composites in Airbus, A long Story of Innovations and Experiences*, Airbus (2014).

[HER 2009] H. Hernández-Moreno, F. Collombet, B. Douchin, D. Choqueuse, P. Davies: Entire Life Time Monitoring of Filament Wound Composite Cylinders Using Bragg Grating Sensors III In-Service External Pressure Loading, *Applied Composite Materials* 16 (2009) 135–147.

[HON 1998] C. S. Hong, C. Y. Ryu, C. G. Kim: Strain Measurement of Composite Laminates using Fiber Bragg Grating Sensors, In *Proc. 1st Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM)*, Osaka, Japan, Proceedings (1998).

[HON 1998] C. S. Hong, J. W. Park, C. Y. Ryu, H. K. Kang: Signal Characteristics of EFPI in the Delaminated Composites, In *Proc. 13th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-13)*, Tokyo, Japan, (1998) 192–195.

[HSI 1990] A. J. Hsieh, N. S. Schneider, J. F. Mandell: Solvent Stress Cracking and Failure Mechanisms in Polyetherimide Composites, *Polymer Composites* 11 (1990) 4, 240–249.

[IHN 2016] J. B. Ihn: Structural Health Monitoring - Overview and Aerospace Applications, Lecture series for ME/MSE 568: Active Sensing Materials and their Devices, University of Washington (2016).

[IND 2013] <http://www.indracompany.com/sostenibilidad-e-innovacion/proyectos-innovacion/newind-tecnologias-avanzadas-en-generacion-eolica-d>

[IST 2015] www.ist.cea.fr/fr/programmes/capteurs/docs/fibre_optique/fiche_produit_rosette_bragg1.pdf

[JAR 2004] I. Jaramillo, C. Morales, A. Betancur, J. Cruz, P. Gañán: Estudio del curado de resinas epoxicas empleando espectroscopía infrarroja, *Dyna* 71 (2004) 67-80.

[JEN 1992] D. W. Jensen, J. Pascual, J. A. August: Performance of a Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers, Part I: Uniaxial Tension, *Smart Materials and Structures* 1 (1992), 24-30.

[JEN 1992 (2)] D. W. Jensen, J. Pascual, J. A. August: Performance of a Graphite/Bismaleimide Laminates with Embedded Optical Fibers, Part II: Uniaxial Compression, *Smart Materials and Structures* 1 (1992), 31-35.

[JEN 1995] D. W. Jensen, J. S. Sirkis: Integrity of Composite Structures with Embedded Optical Fibers, *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, New York, USA, (1995) 109-129.

[JON 2003] F. R. Jones: The Effects of Aggressive Environments on Long-Term Behaviour, Harris B, editor, *Fatigue in Composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited (2003) 117-46.

[JUN 2007] K. Jung, T. J. Kang: Cure Monitoring and Internal Strain Measurement of 3-D Hybrid Braided Composites using Fibber Bragg Grating Sensor, *Journal of Composite Materials* 41 (2007) 1499-1519.

[KAK 2011] M. Kaku: La Física del Futuro: Cómo la Ciencia Determinará el Destino de la Humanidad y Nuestra Vida Cotidiana en el Siglo XXII, Penguin Random House, Grupo Editorial España, 1st Ed. (2011).

[KAN 2000] H. K. Kang, J. W. park, C. Y. Ryu, C. S. Hong, C. G. Kim: Development of Fibre Optic Ingress/Egress Methods for Smart Composite Structures, *Smart Materials and Structures* 9 (2000) 149-156.

- [KAN 2002] H. K. Kang, D. H. Kang, H. J. Bang, C. S. Hong, C. G. Kim: Cure Monitoring of Composite Laminates using Fiber Optic Sensors, *Smart Materials and Structures* 11 (2002) 279-287.
- [KAN 2003] H. K. Kang, D. H. Kang, C. S. Hong, C. G. Kim: Simultaneous Monitoring of Strain and Temperature during and after Cure of Unsymmetric Composite Laminate using Fibre-Optic Sensors, *Smart Materials and Structures* 12 (2003) 29-35.
- [KAN 2006] D. Kang, C. Kim, C. Kim: The Embedment of Fiber Bragg Grating Sensors into Filament Wound Pressure Tanks Considering Multiplexing, *NDT&E International* 39 (2006) 109-116.
- [KIM 1989] K. S. Kim, H. T. Hahn, R. B. Croman: The Effect of Cooling Rate on Residual Stresses in a Thermoplastic Composite, *Journal of Composite Technology and Research* 11 (1989) 2, 47-52.
- [KIM 1998] J. K. Kim, Y. W. Mai: *Residual Stresses, Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, Oxford: Elsevier Science (1998) 308-320.
- [KIM 2011] S. Kim, S. Yoo, E. Kim, I. Lee, I. Kwon, D. Yoon: Embedding Techniques of FBG Sensors in Adhesive Layers of Composite Structures and Applications, In Proc. 18th International Conference on Composite Materials, Jeju Island, Korea (2011).
- [KIN 2014] D. Kinet, P. Mégret, K. W. Goossen, L. Qui, D. Heider, R. Caucheteur: Fibre Bragg Gratings Sensors Toward Structural Health Monitoring in Materials: Challenges and Solutions, *Sensors* 14 (2014) 7394-7419.
- [KRE 2007] M. Kreuzer: *Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors*, HBM (2007).
- [LEV 2008] K. Levin: *Durability of Embedded Fibre Optic Sensors in Composites*, Ph.D. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden (2008).
- [KUA 2001] K. S. C. Kuang, R. Kenny, M. P. Whelan, W. J. Cantwell, P. R. Chalker: Embedded Fibre Bragg Grating Sensors in Advanced Composite Materials, *Composite Science and Technology* 61 (2001) 1379-1387.
- [KUG 2002] D. Kugler, T. J. Moon: Identification of the Most Significant Processing Parameters on the Development of Fiber Waviness in Thin Laminates, *Journal of Composite Materials* 36 (2002) 12, 1451-1479.

[LAG 2013] R. Laga, I. González, J. Vilanova: Additive Layer Manufacturing. Trade Off de Tecnologías (2013).

[LAN 2016] B. Lange: The Market, Long and Short Term Outlook, Global Market Forecast, Airbus (2016).

[LEN 2002] J. S. Leng, A. Asundi: Real-Time Cure Monitoring of Smart Composite Materials using Extrinsic Fabry-Perot interferometer and Fiber Bragg Grating Sensors, Smart Materials and Structures 11 (2002) 249-255.

[LI 2000] T. Q. Li, M. Q. Zhang, K. Zhang, H. M. Zeng: The Dependence of the Fracture Toughness of Thermoplastic Composite Laminates on Interfacial Interaction, Composites Science and Technology 60 (2000) 3, 465-476.

[LIG 1999] J. J. Liggat, G. Pritchard, R. A. Pethrick: Temperature - Its Effects on the Durability of Reinforced Plastics: Physical Mechanisms, Pritchard G, editor, Reinforced plastics durability. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd (1999) 115-125.

[LUY 2010] G. Luyckx, E. Voet, N. Lammens, J. Degrieck: Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research, Sensors 11 (2011) 384-408.

[MAN 1992] J. A. E. Manson, J. C. Seferis: Process Simulated Laminate (Psl): A Methodology to Internal Stress Characterization in Advanced Composite Materials, Journal of Composite Materials 26 (1992) 3, 405-431.

[MAR 2011] F. Martínez: Sensores de Fibra Óptica como Instrumentos de Monitorización en Estructuras en Condiciones de Servicio, Universidad Carlos III de Madrid, España (2011).

[MEG 2007] R. Megret, S. Bette, C. Crunelle, C. Caucheteur: Fibre Bragg Gratings: Fundamentals and Applications, Doctoral School (2007).

[MIK 1985] Y. Mikata, M. Taya: Stress Field in a Coated Continuous Fiber Composite Subjected to Thermo-Mechanical Loading, Journal of Composite Materials 19 (1985) 554-579.

[MOL 2005] S. Moloney, M. J. Connelly, P. A. Butler: Strain Sensing in Carbon Composite Material using Embedded Fibre Bragg Grating Sensors, In Proc. Opto-Ireland: Optical Sensing and Spectroscopy, Dublin, Ireland, SPIE Proceedings 5826 (2005), 645-653.

[MON 2007] R. Montanini, L. D'Acquisto: Simultaneous measurement of Temperature and Strain in Glass Fiber/Epoxy Composites by Embedded Fiber Optic Sensors: I. Cure Monitoring, *Smart Materials and Structures* 16 (2007) 1718-1726.

[MUL 2007] M. Muller, R. Zitoune, F. Collombet, P. Olivier, Y. H. Grunevald: Thermal Expansion of Carbon-Epoxy Laminates Measured with Embedded FBGS- Comparison with other Experimental Techniques and Numerical Simulation, *Composites: Part A* 38 (2007), 1414-1424.

[MUR 2000] V. M. Murukeshan, P. Y. Chan, L. S. Ong, L. K. Seah: Cure Monitoring of Smart Composite using Fiber Bragg Grating based Embedded Sensors, *Sensors and Actuators* 79 (2000) 153-161.

[NAI 1985 (1)] J. A. Nairn, P. Zoller: The Development of Residual Thermal Stresses in Amorphous and Semicrystalline Thermoplastic Matrix Composites, In Proc. Toughened Composites Conference, Houston, USA, Proceedings (1985) 328-341.

[NAI 1985 (2)] J. A. Nairn, P. Zoller: Matrix Solidification and the Resulting Residual Thermal Stresses in Composites, *Journal of Material Science* 20 (1985) 1, 355-367.

[NEA 2016] <http://nea.educastur.princast.es>

[NI 2011] <http://www.ni.com/white-paper>.

[NIE 1998] A. S. Nielsen, R. Pyrz: The Effect of Cooling Rate on Thermal Residual Strains in Carbon/Polypropylene Microcomposites, *Science and Engineering of Composite Materials* 7 (1998) 1-2, 1-22.

[OGA 1991] A. A. Ogale: Creep Behavior of Thermoplastic Composites, *Thermoplastic Composite Materials*, Elsevier Science, Amsterdam, Holland (1991) 205-232.

[OLA 2010] A. Oladson, D. Tidman: Methodology for Topology Optimization in the Design Process, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (2010).

[PAL 2008] J. Palaniappan: The Use of CFBG Sensor for Detecting Damage in Composite Laminates and Adhesively Bonded Joints, Ph.D. Dissertation, University of Surrey, United Kingdom (2008).

[PAR 2005] P. P. Parlevliet, H. E. N. Bersee, A. Beukers: Residual Stresses in

Thermoplastic Composites-a Study of the Literature. Part I: Formation of Residual Stresses, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2005) 11, 1847-1857.

[PAR 2007] P. P. Parlevliet, H. E. N. Bersee, A. Beukers: Residual Stresses in Thermoplastic Composites-a Study of the Literature. Part III: Effects of Thermal Residual Stresses, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 38 (2007), 1581-1596.

[PAR 2010] P. P. Parlevliet, H. E. N. Bersee, A. Beukers: Measurement of (Post-) Curing Strain Development with Fibre Bragg Gratings, Polymer Testing 29 (2010) 6, 291-301.

[PAR 2010 (2)] J. París, S. Martínez, F. Navarrina, I. Colominas, M. Casteleiro: Topology Optimization of Aeronautical Structures with Stress Constraints: General Methodology and Applications, Universidade da Coruña (2010).

[PER 2001] A. Pérez: Fibre Optic Sensors- Application to the Long Term Monitoring of Civil Engineering Structures, Tesina de Especialidad, Universidad Politécnica de Cataluña, España (2001).

[PER 2013] G. Pereira, C. Frias, H. Faria, O. Frazao, A. T. Marques: On the Improvement of Strain Measurements with FBG Sensors Embedded in Unidirectional Composites, Polymer Testing 31 (2013) 99-105.

[QUE 2004] M. Y. Quek: Analysis of Residual Stresses in a Single Fibre-Matrix Composite, International Journal of Adhesion and Adhesives 24 (2004), 379-388.

[RAD 2012] L.W.M.M. Rademakers, T.W. Verbruggen: Fiber Optic Blade Load Monitoring (FOBM), Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) (2012).

[RAM 2011] C. A. Ramos, R. de Oliveira, A. T. Marques, O. Frazao: Design and Experimental Evaluation of a Composite Strain Rosette using Fiber Bragg Grating, Microwave and Optical Technologies Letters 53 (2011) 1853-1858.

[RAO 1997] R. A. Raouf: A Study of the Effects of Fiber Waviness on the Buckling Characteristics of Laminated Plates, Journal of Reinforced Plastic Composites 16 (1997) 17, 1591-1598.

[REN 2016] www.renishaw.com/additive

[RIC 2012] W. L. Richards, A. Parker, W. Ko, A. Piazza, P. Chan: Application of

Fiber Optic Instrumentation, Flight Test Instrumentation Series, North Atlantic Treaty Organization 22 (2012).

[RIV 2005] E. Rivera, D. J. Thomson, A. A. Mufti: Comparison of Recoated fiber Bragg Grating Sensors under Tension on a Steel Coupon, In Proc. Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV, SPIE Proceedings 5767 (2005) 163-174.

[ROA 2011] D. Roach, S. Neidigk: Aviation Industry View Regarding SHM Integration into Aircraft Maintenance Programs, In Proc. 8th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford, USA, proceedings (2011).

[ROC 2004] M. G. Roca: Development of New Thermoplastic Composites. Delft: Aerospace Engineering, Delft University of Technology (2004).

[RYT 1993] A. Rytter: Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures, Ph.D. Dissertation, Aalborg University, Denmark (1993).

[SAT 2001] K. Saton, K. Fukuchi, Y. Kurosawa, A. Hongo, N. Takeda: Polyimide-Coated Small-Diameter Optical Fiber Sensors for Embedding in Composite Laminate Structures, In Proc. Smart Structures and Materials: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation, Newport Beach, USA, SPIE Proceedings 4328 (2001) 285-294.

[SCH 2002] L. Schulz, S. Udd, G. McGill: Advanced Fiber Grating Strain Sensor System for Bridges, Structures and Highways, In Proc. The International Society for Optical Engineering, Perth, Australia, SPIE Proceedings 3325 (2002).

[SCH 2010] V. G. Schluter, N. Kusche, W. R. Habel: How Reliable do Fibre Bragg Grating Patches Perform as Strain Sensors?, In Proceedings 4th European Workshop on Optical Fibre Sensors, Porto, Portugal, SPIE Proceedings 7653 (2010).

[SHE 1996] D. D. Shepard, B. Twombly: Simultaneous Dynamic Mechanical Analysis and Dielectric Analysis of Polymers, *Tenmochimica Acta*, 272 (1996) 125-129.

[SHE 2011] X. Shen: Cure Monitoring of Composites Based on Embedded Fiber Bragg Gratings, *Advanced Materials Research* 211-212 (2011) 585-589.

[SHI 2004] K. Shivakumar, L. Emmanwori: Mechanics of Failure of Composite Laminates with an Embedded Fiber Optic Sensor, *Journal of Composite*

Materials 38 (2004) 669-680.

[SJO 1999] A. Sjögren, R. Joffe, L. Berglund, E. Mader: Effects of Fibre Coating (Size) on Properties of Glass Fibre Vinyl Ester Composites, Composites Part A – Applied Science and Manufacturing 30 (1999) 8, 1009–1015.

[SJO 2000] A. Sjögren: Manufacturing Technique for Embedding Detachable Fibre-Optic Connections in Aircraft Composite Components, Smart Materials and Structures 9 (2000) 855-858.

[SJO 2001] B. A. Sjögren: Static Strength of CFRP Laminates with Embedded Fiber Optic Edge Connectors, Composites Part A 32 (2001) 189-196.

[SKO 1999] A. Skontorp: Effect of Embedded Optical Fibers on the Structural Integrity of Composites, In Proc. 12th International Conference on Composite Materials (ICCM12), Paris, France, Proceedings (1999).

[SKO 2000] A. Skontorp: Structural Integrity of Quasi-Isotropic Composite Laminates with Embedded Optical Fibers, Journal of Reinforced Plastic and Composites 19(2000), 1056-1077.

[SMA 2015] www.smartec.ch

[SIN 2005] N. Singh, S. C. Jain, A. K. Aggarwal, R. P. Bajpai: Fibre Bragg Grating Writing Using Mask Technology, Journal of Scientific and Industrial Research 64 (2005) 108-115.

[SON 1997] M. Song, S. B. Lee, S. S. Choi, B. Lee: Simultaneous Measurement of Temperature and Strain using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube, Optical Fiber Technology 3 (1997) 194-196.

[SON 2011] H. Song, W. Wang, Y. Zhou, G. Zhou: Mechanical Properties of Composites with Embedded FBG Sensors in Different Layer, IEEE (2011) 52-57.

[SOR 2005] L. Sorensen, T. Gmür, J. Botsis: Residual Strain Development in an AS4/PPS Thermoplastic Composite Measured using Fibre Bragg Grating Sensors, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006) 2, 270-281.

[SOR 2006] L. Sorensen: The Response of Embedded FBG Sensors to Non-Uniform Strains in CFRP Composites During Processing and Delamination, Ph.D. Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland (2006).

[SUL 2010] M. Sulatisky, B. Hay, D. Mourre: Damage Detection in High-Pressure

Cylinders, In Proc. 18th World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2010), Essen, Germany, Proceedings (2010).

[STR 2017] <http://www.stratasy.com/es/materiales/fdm/ultem-1010>.

[SUN 2011] J. Sun, Y. Ji, Y. Yin, J. Wang: Research on Optic Fiber Coatings and Curing Process Monitoring of Composite Based FBG, *Advanced Materials Research* 189-193 (2011) 1184-1187.

[SUR 1992] S. Suriñach, M. D. Baro, S. Bordas, N. Clavaguera, M. T. Clavaguera-Mora: La Calorimetría Diferencial de Barrido y su Aplicación a la Ciencia de los Materiales, *Boletines de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 31 (1992) 11-17.

[SUS 1994] I. Susuki, P. Sindelar, K. Levin: Static and Fatigue Strength Properties of Graphite/Epoxy Laminates with Embedded Optical Fibers, *The Aeronautical Research Institute of Sweden, Bromma* (1994).

[TAI 2016] <http://www.tainstruments.com/>

[TAN 2003] N. Tanaka, Y. Okabe, N. Takeda: Temperature-Compensated Strain Measurement using Fiber Bragg Grating Sensors Embedded in Composite Laminates, *Smart Materials and Structures* 12 (2003) 940-946.

[TOR 2009] B. Torres: Estudio Experimental de Sensores Ópticos Tipo FBG para Medir Deformaciones y Temperaturas en Estructuras, Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Valencia, España (2009).

[TSA 2009] L Tsai, T.C. Cheng, C.L. Lin, C. C. Chiang: Application of the Embedded Optical Fiber Bragg Grating Sensors in Curing Monitoring of Gr/Epoxy Laminated Composites, In Proc. Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks and Systems, San Diego, USA, SPIE Proceedings 7293 (2009).

[UDD 1995] E. Udd: *Fiber Optic Smart Structures*, IEEE, Troutdale, USA, 1st Edition (1995).

[UDD 2005] E. Udd, M. Winz, S. Kreger, D. Heider: Failure Mechanisms of Fiber Optic Sensors Placed in Composite Materials, In Proc. Smart Structures and Materials: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, San Diego, EEUU, SPIE Proceedings 5758 (2005) 409-416.

[UNG 1998] W.J. Unger, J.S. Hansen: Method to Predict the Effect of Thermal Residual Stresses on the Free-Edge Delamination Behavior of Fibre Reinforced

Composite Laminates, *Journal of Composite Materials* 32 (1998) 5, 431–459.

[VAL 2011] A. Vallinas: *Sensores de Fibra Óptica: Fundamentos de Medida y Análisis de la Oferta Comercial*, Universidad Pública de Navarra, España (2011).

[VOE 2010] E. Voet, G. Luyck, W. De Waele, J. Degrieck: Multi-axial Strain Transfer from Laminated CFRP Composites to Embedded Bragg Sensor:II- Experimental Validation, *Smart Materials and Structures* 19 (2010).

[WER 2013] M. M. Werneck, R. C. S. B. Allil, B. A. Ribeiro, F. V. B. de Nazaré: *A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors, Current Trends in Short and Long Period Fiber Gratings*, Intech, 1st Edition (2013).

[WHI 2000] S. R. White: *Processing Induced Residual Stresses in Composites, Processing of Composites*, Hanser Publishers, Munich, Germany (2000) 239–271.

[WOR 2004] K. Worden, J. M. Dulieu-Barton: An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures, *International Journal of Structural Health Monitoring* 3 (2004), 85–98.

[WOS 2011] H. Woschitz: Development of a Rail-Strain-Pad using FBG Sensors, In Proc. 5th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Cancún, México, Proceedings (2011).

[YAM 2011] H. Yamada, Y. Tanaka, M. Ogata, K. Mizuno, K. Nagashima, S. Okumura, Y. Terada: Measurement and Improvement of the Characteristics using Optical Fiber Temperature Sensors at Cryogenic Temperatures, *Physica C* 471 (2011) 1570-1575.

[YAN 2011] Z. Yang, H. Xu, K. Ni, X. Dong: Simultaneous Measurement of Force And Temperature with a Single FBG Partially Encapsulated with a Metal Cannula, *Microwave and Optical Technology Letters* 53 (2011) 1656-1659.

[YE 2014] X. W. Ye, Y. H. Su, J. P. Han: Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure using Optical Fiber Sensing Technology: A Comprehensive Review, *The Scientific World journal* 2014 (2014).

[ZHA 2005] L. G. Zhao, N. A. Warrior, A. C. Long: A Micromechanical Study of Failure and Damage of Unidirectional Fibre-Reinforced Polymer Matrix Composites: Effect of Residual Stress, In Proc. Composites Europe Conference, Barcelona, Spain, Proceedings (2005) 6–7.

[ZHA 2007] H. Zhao, B. Zhang, Z. Wu, D. Wang, F. Dai: Monitoring and Controlling Manufacturing for Composite Using Fiber Bragg Grating, , In Proc. International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, Harbin, China, SPIE Proceedings 6423 (2007).

[ZSE 2016] https://www.zse.de/FBGS_strain_gauge_technology

ANEXO A: COMPENSACIÓN Y MEDIDA DE TEMPERATURA

Medida de temperatura

- Temperatura máxima: 100°C

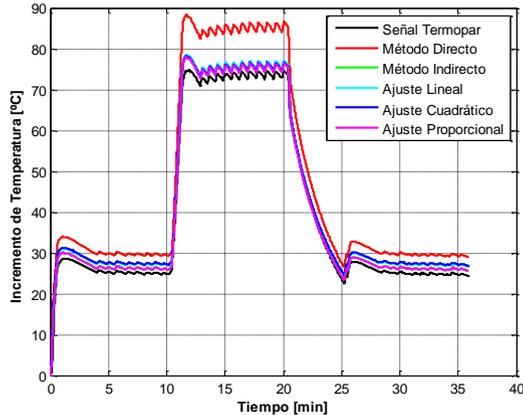


Figura 170. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 1 T_{máx.}=100°C).

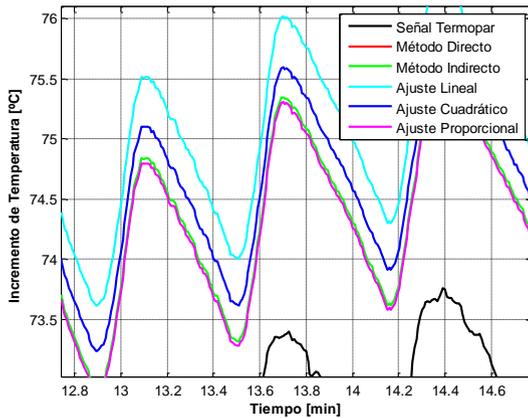


Figura 171. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 1 T_{máx.}=100°C).

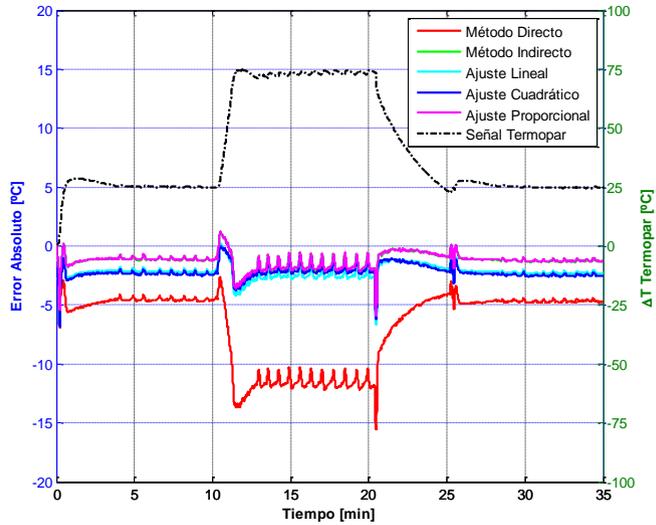


Figura 172. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N^o 1 T_{máx.} =100°C).

- Temperatura máxima: 105°C

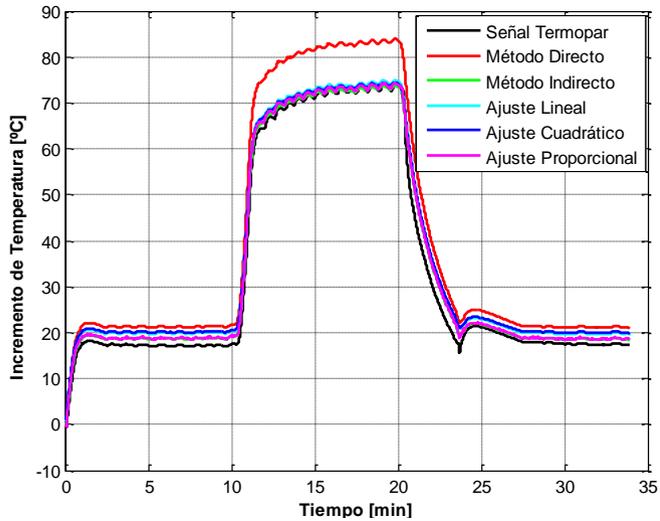


Figura 173. Cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 6 $T_{máx.}=105^{\circ}\text{C}$).

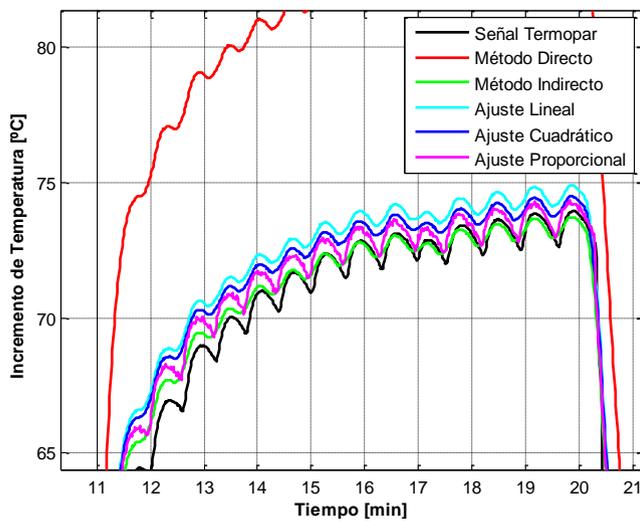


Figura 174. Detalle del cálculo de temperatura por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N° 6 $T_{máx.}=105^{\circ}\text{C}$).

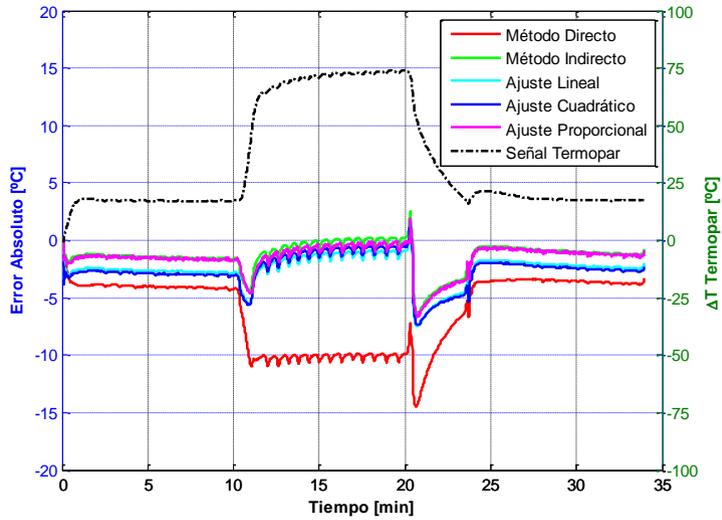


Figura 175. Error absoluto cometido por los métodos Directo, Indirecto, Lineal, Cuadrático y Proporcional (ensayo N^o 6 T_{máx.}=105°C).

- **Error relativo medio**

Tabla 35. Error relativo medio cometido por los métodos de medida de temperatura en los ensayos N° 1-5 (T_{máx.}=100°C).

Ensayo 100°C N°	Error relativo medio [%]				
	M. Directo	M. Indirecto	A. Lineal	A. Cuadrática	A. Proporcional
1	17,4	3,8	7	7,4	3,8
2	15	4,8	9	9,2	4,7
3	27,2	12,9	19	19	13,5
4	31,6	17,3	55,6	65,4	17,2
5	4	9,9	7,7	7,6	9,8

Tabla 36. Error relativo medio cometido por los métodos de medida de temperatura en los ensayos N° 6-10 (T_{máx.}=105°C).

Ensayo 105°C N°	Error relativo medio [%]				
	M. Directo	M. Indirecto	A. Lineal	A. Cuadrática	A. Proporcional
6	20,7	6,1	11,2	12	6,7
7	21	7,3	12,5	13,3	7,8
8	11,5	4,9	4,9	5,3	4,3
9	30,6	17,8	22,1	22,8	17,7
10	19,3	7,4	16,4	18,8	7,4

Tabla 37. Error relativo medio cometido por los métodos de medida de temperatura en los ensayos N° 11-15 (T_{máx.}=110°C).

Ensayo 110°C N°	Error relativo medio [%]				
	M. Directo	M. Indirecto	A. Lineal	A. Cuadrática	A. Proporcional
11	13,8	2,3	8,9	10,7	2,3
12	17,1	8,6	10	10,8	8,6
13	23,7	11,8	16,3	17,2	12,3
14	27,3	13	35,9	41,7	13
15	25,6	12,7	43,8	52	12,7

Compensación de temperatura

- CT-01

Incremento de temperatura de 50°C (T_{máx.}=100°C)

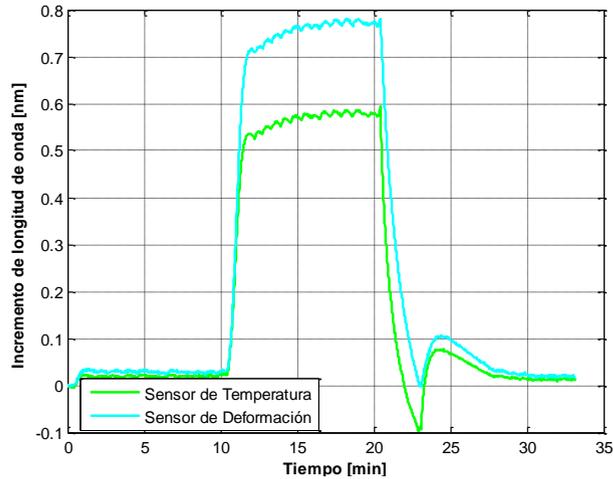


Figura 176. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 1, Probeta CT-01 (T_{máx.}=100°C).

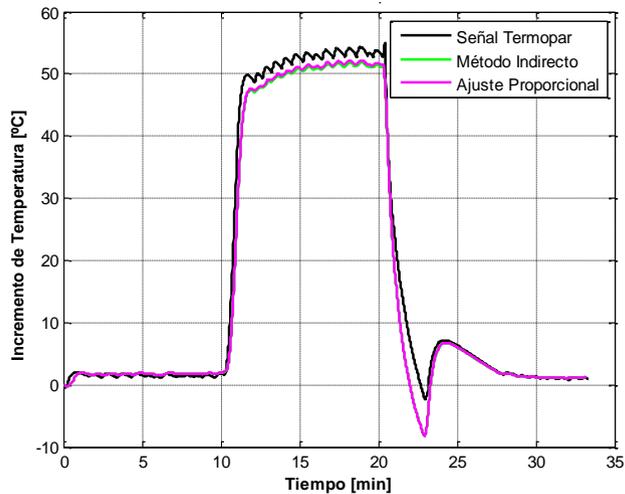


Figura 177. Medida de temperatura en el ensayo N° 1 (T_{máx.}=100°C).

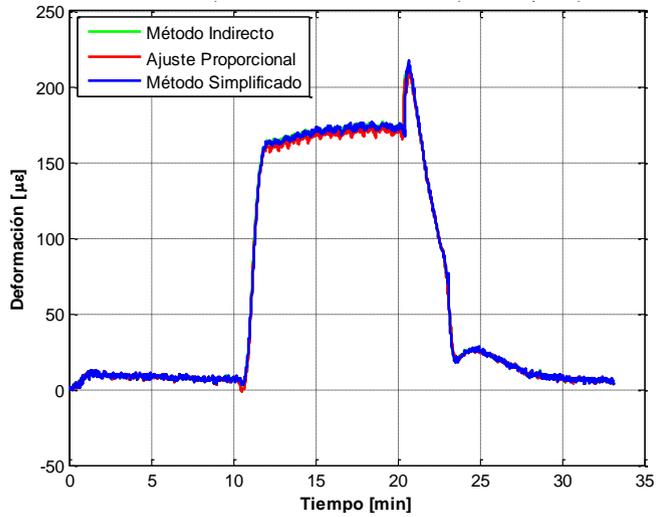


Figura 178. Medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).

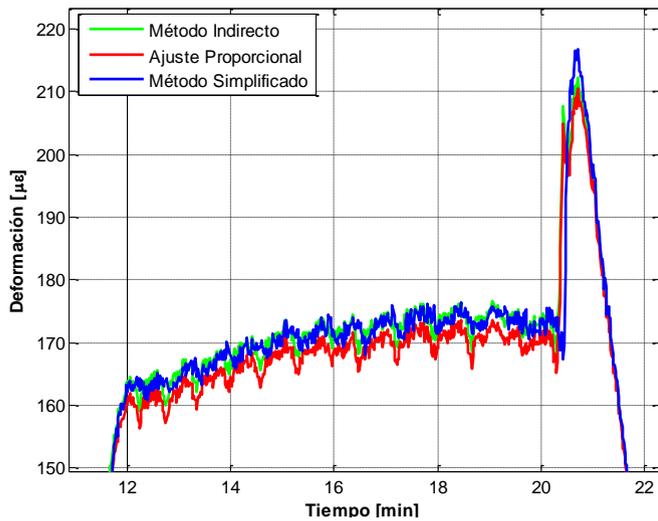


Figura 179. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=100^{\circ}\text{C}$).

Incremento de temperatura de 55°C (T_{máx.}=105°C)

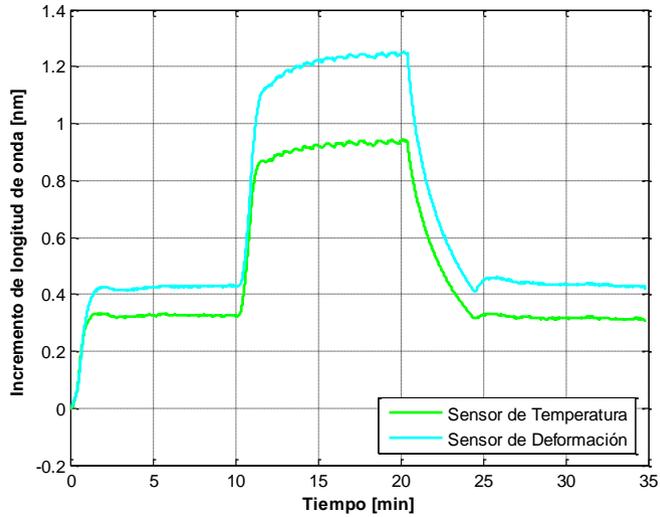


Figura 180. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N^o 4, Probeta CT-01 (T_{máx.}=105°C).

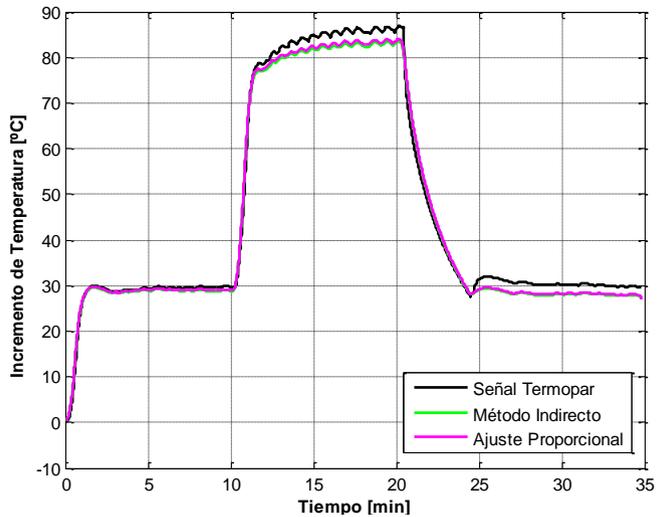


Figura 181. Medida de temperatura en el ensayo N^o 4 (T_{máx.}=105°C).

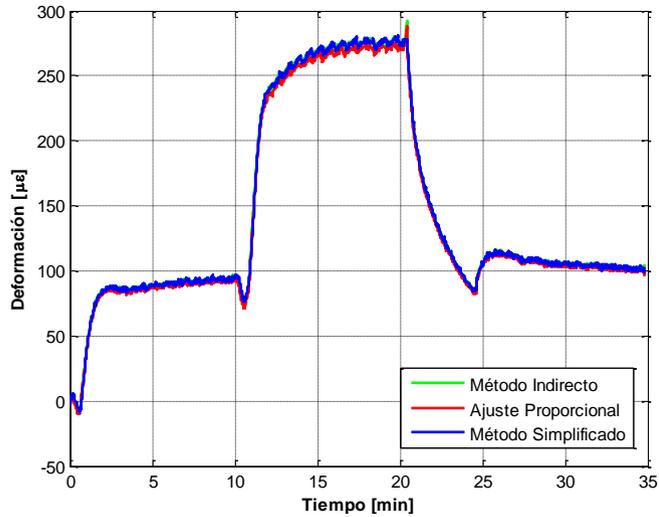


Figura 182. Medida de deformación durante el ensayo N° 4, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).

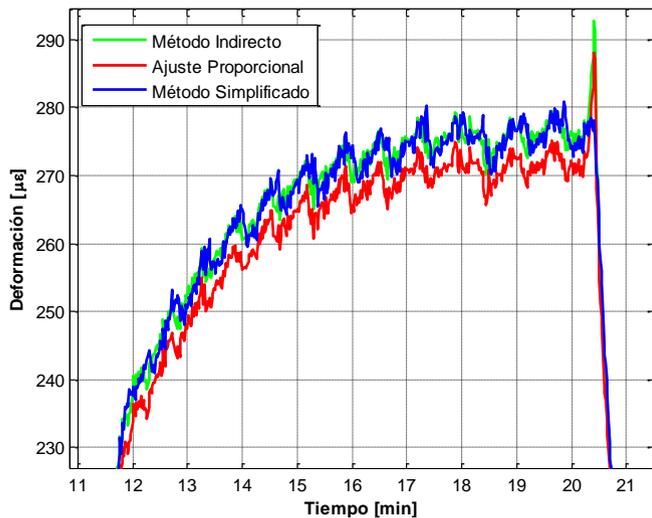


Figura 183. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N° 4, Probeta CT-01 ($T_{\text{máx.}}=105^{\circ}\text{C}$).

- CT-02

Incremento de temperatura de 50°C (T_{máx.}=100°C)

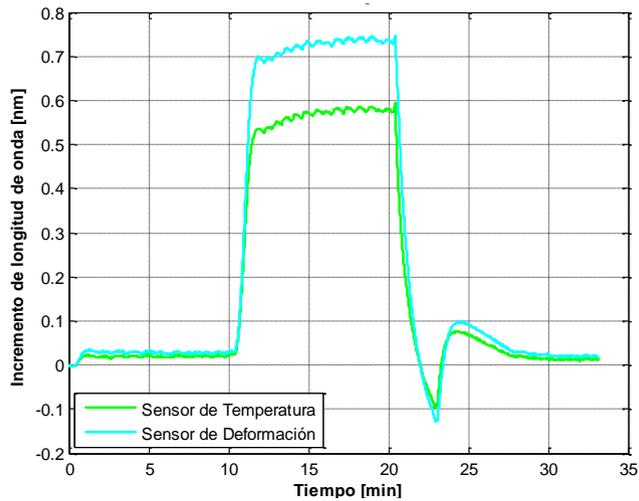


Figura 184. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 1, Probeta CT-02 (T_{máx.}=100°C).

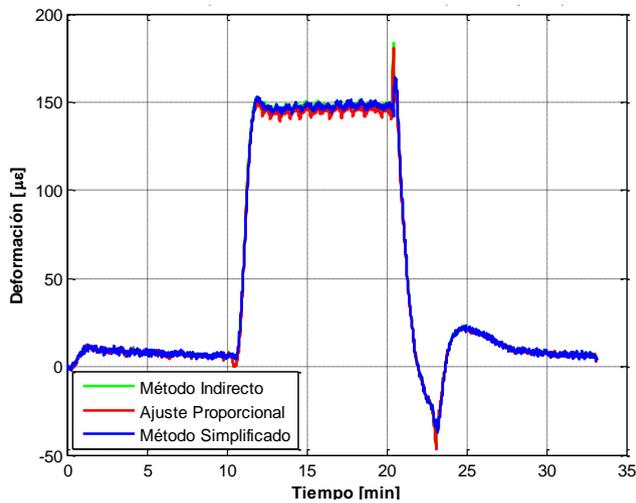


Figura 185. Medida de deformación durante el ensayo N° 1, Probeta CT-02 (T_{máx.}=100°C).

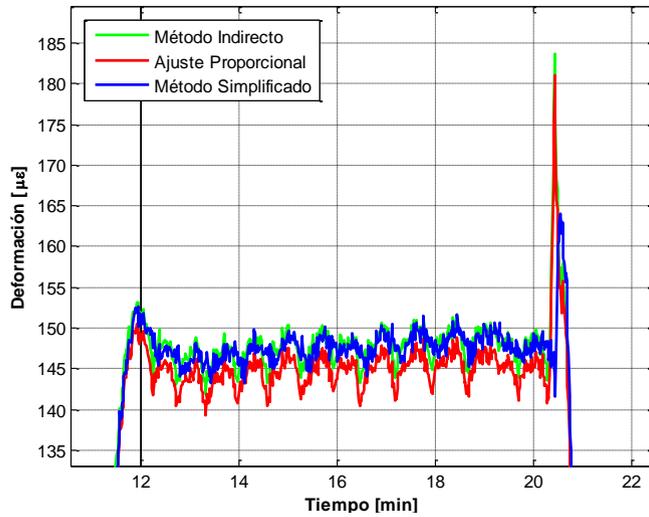


Figura 186. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N^o 1, Probeta CT-02 (T_{máx.}=100°C).

Incremento de temperatura de 55°C (T_{máx.}=105°C)

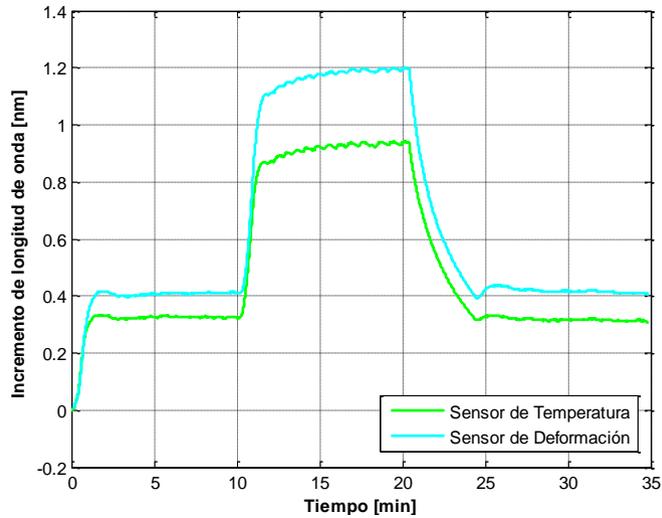


Figura 187. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N^o 4, Probeta CT-02 (T_{máx.}=105°C).

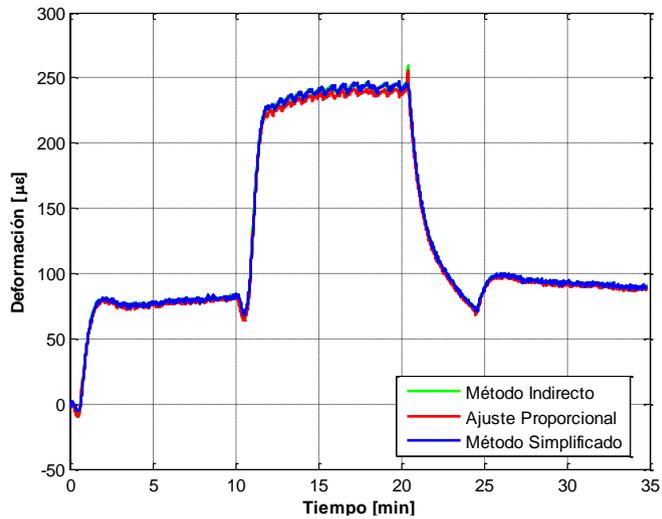


Figura 188. Medida de deformación durante el ensayo N^o 4, Probeta CT-02 (T_{máx.}=105°C).

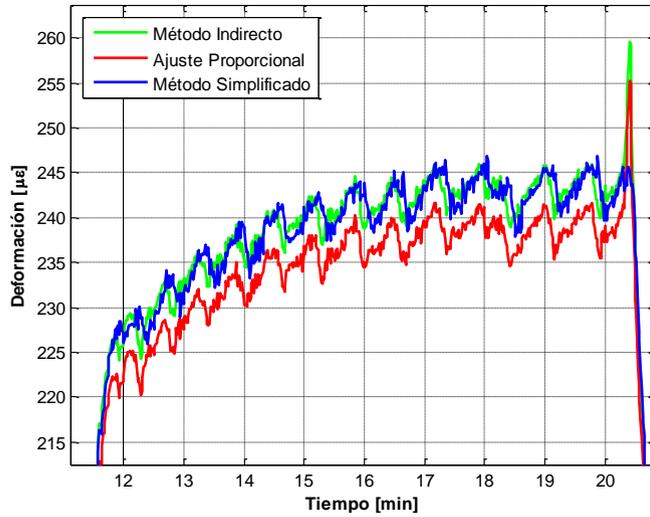


Figura 189. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N^o 4, Probeta CT-02 (T_{máx.}=105°C).

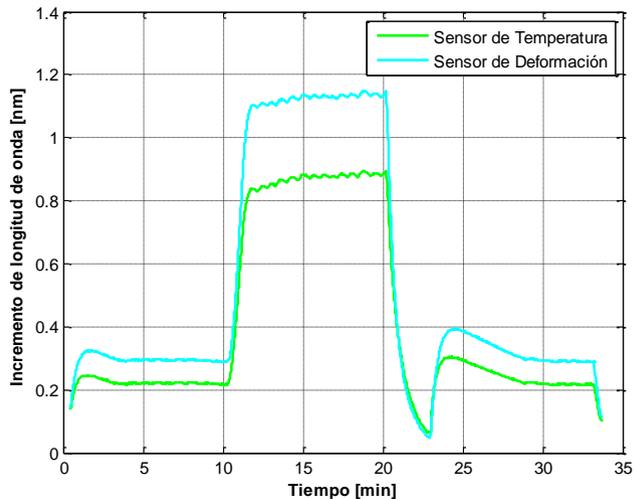
Incremento de temperatura de 60°C ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$)

Figura 190. Variación de longitud de onda de los sensores de Bragg del ensayo N° 7, Probeta CT-02 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

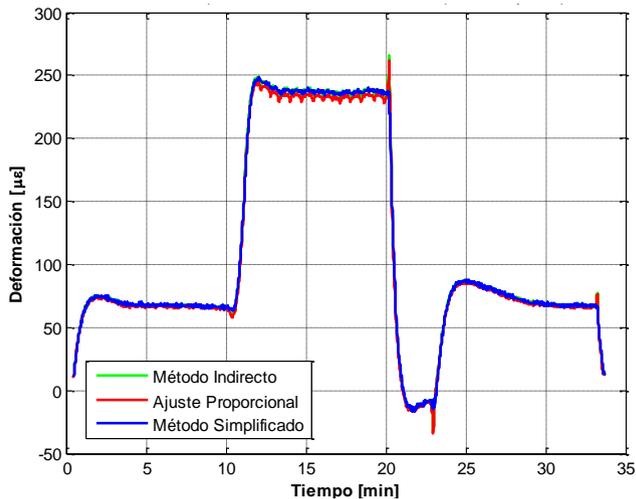


Figura 191. Medida de deformación durante el ensayo N° 7, Probeta CT-02 ($T_{\text{máx.}}=110^{\circ}\text{C}$).

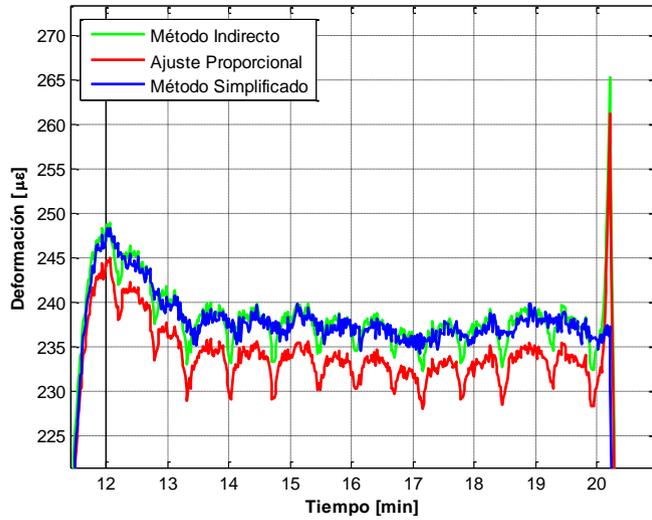


Figura 192. Detalle de la medida de deformación durante el ensayo N^o 7, Probeta CT-02 ($T_{m\acute{a}x.}=110^{\circ}C$).

Ciclado térmico

- FT-02

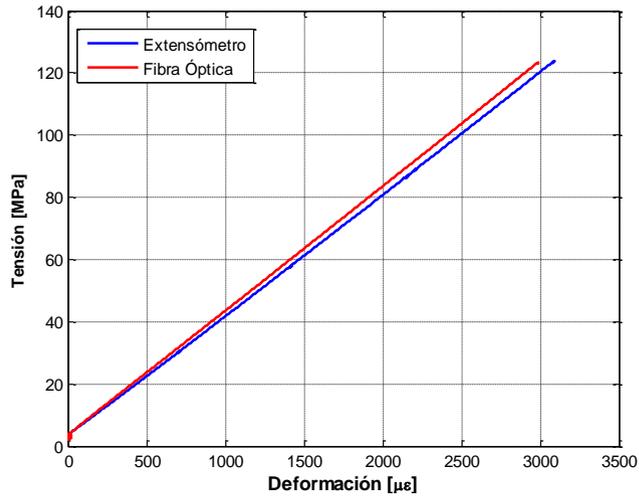


Figura 193. Resultados del ensayo de tracción previo al ciclado térmico de la probeta FT-02.

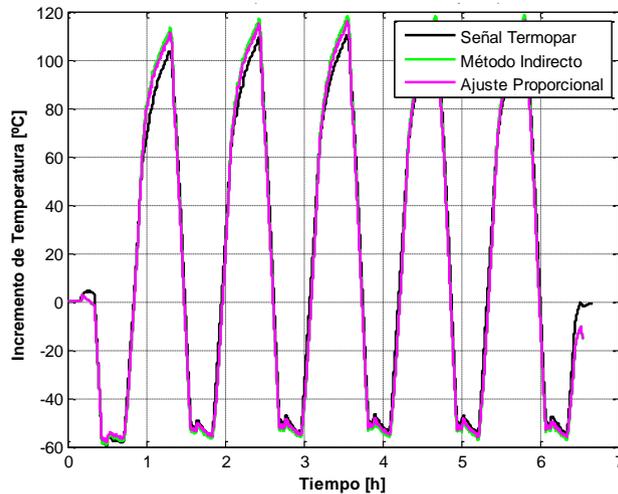


Figura 194. Medida del incremento de temperatura durante los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).

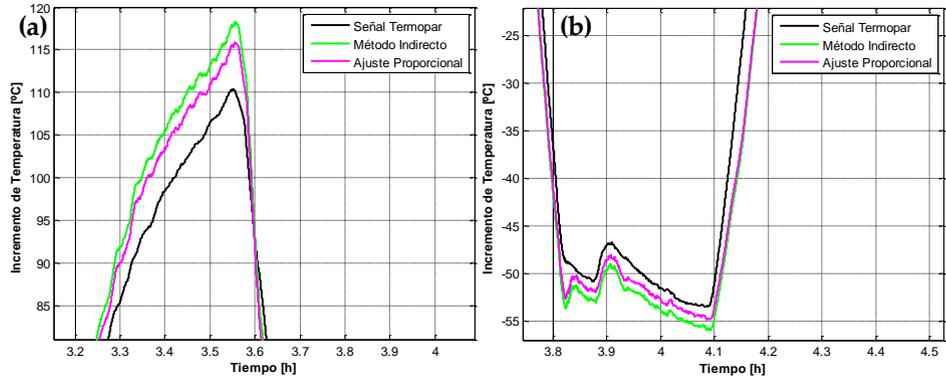


Figura 195. Detalle de la medida del incremento de temperatura en el ciclo N°3: (a) alta temperatura y (b) baja temperatura (Probeta FT-02).

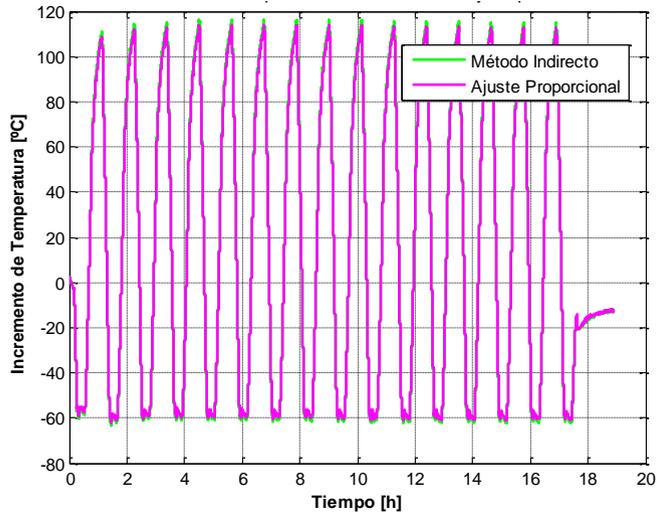


Figura 196. Medida del incremento temperatura durante la aplicación de los ciclos N° 6-20 (Probeta FT-02).

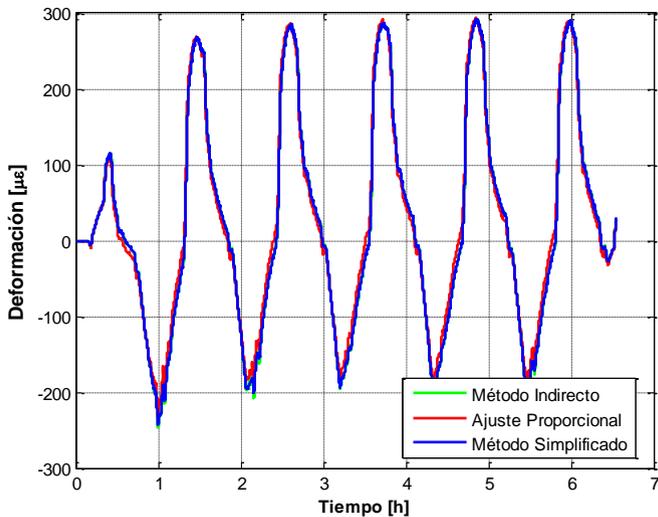


Figura 197. Deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).

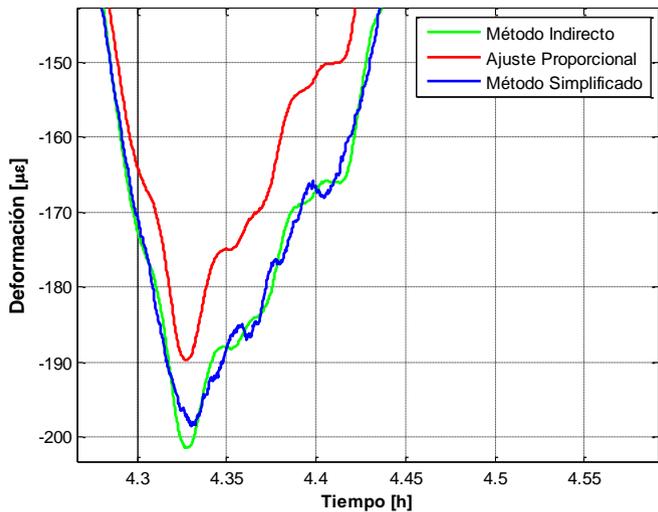


Figura 198. Detalle de las deformaciones medidas durante la aplicación de los 5 primeros ciclos (Probeta FT-02).

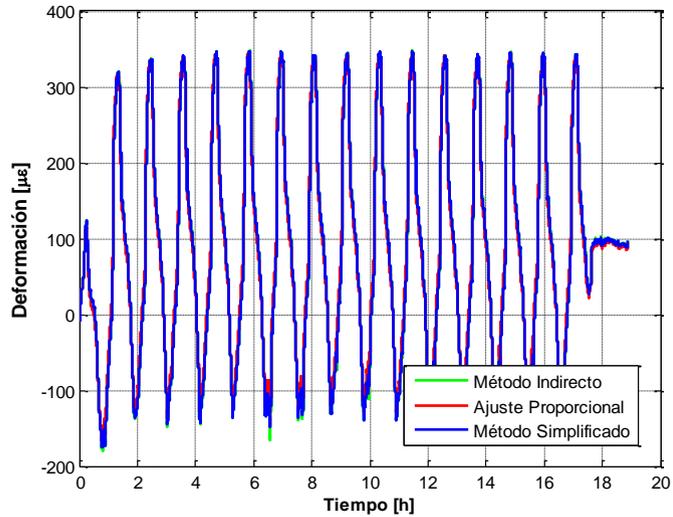


Figura 199. Deformaciones medidas durante la aplicación de los ciclos N^o 6-20 (Probeta FT-02).

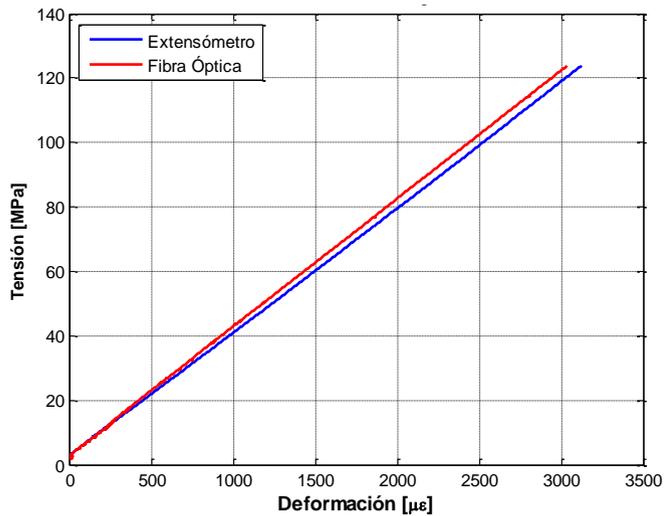


Figura 200. Resultados del ensayo de tracción tras la aplicación de 20 ciclos térmicos (probeta FT-02).

ANEXO B: MONITORIZACIÓN DEL CURADO

Resultados de ensayos con material MTM57/T700S

- Primer proceso de manufactura y curado de paneles

Panel N^o 2

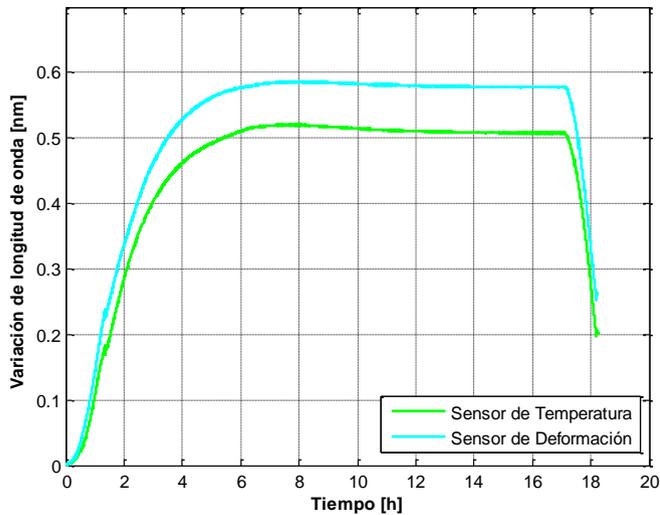


Figura 201. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación (panel N^o 2) y temperatura (panel N^o 1).

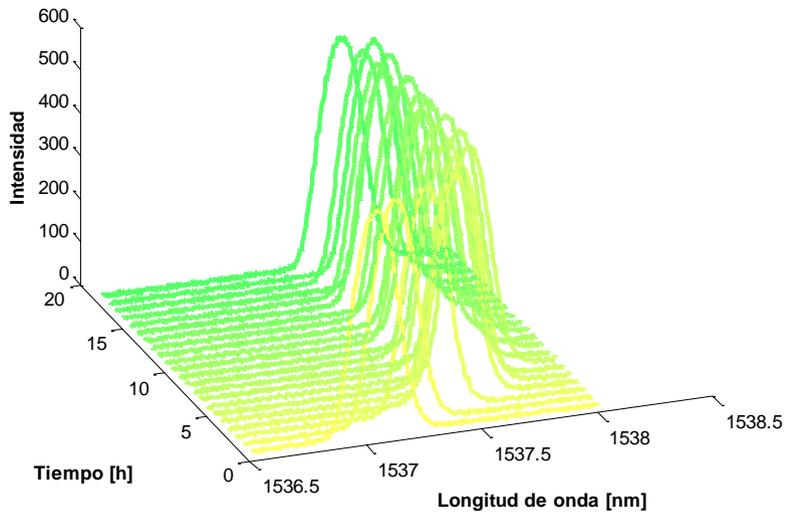


Figura 202. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 2).

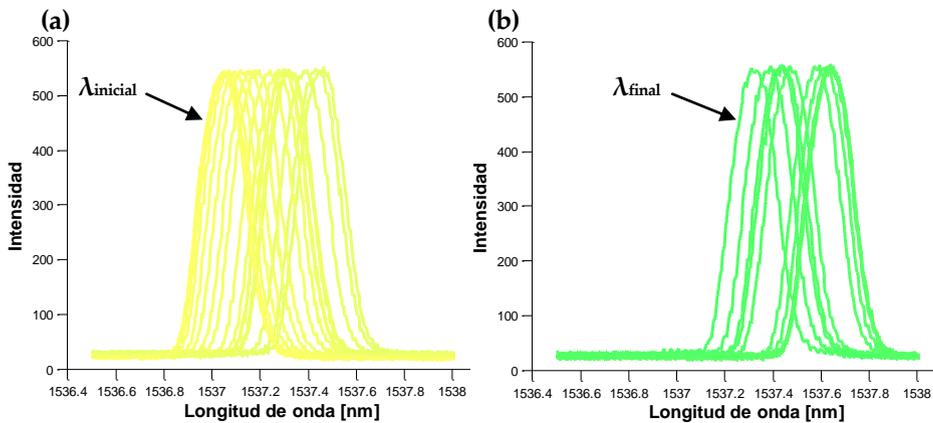


Figura 203. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 2).

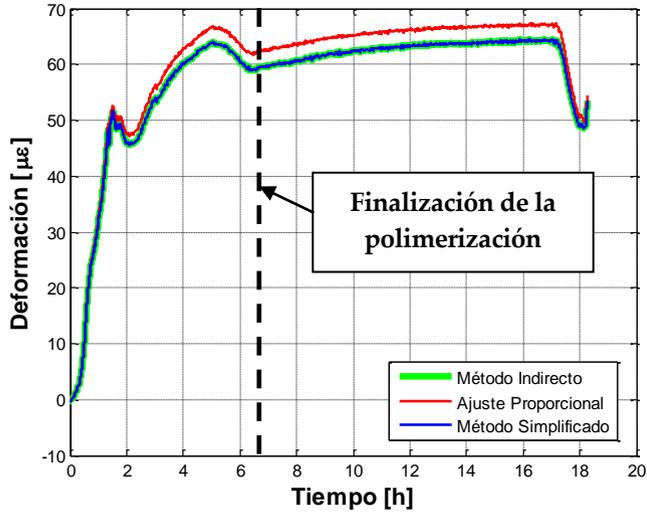


Figura 204. Medida de deformaciones en el panel N^o 2.

- Segundo proceso de manufactura y curado de paneles

Panel N^o 4

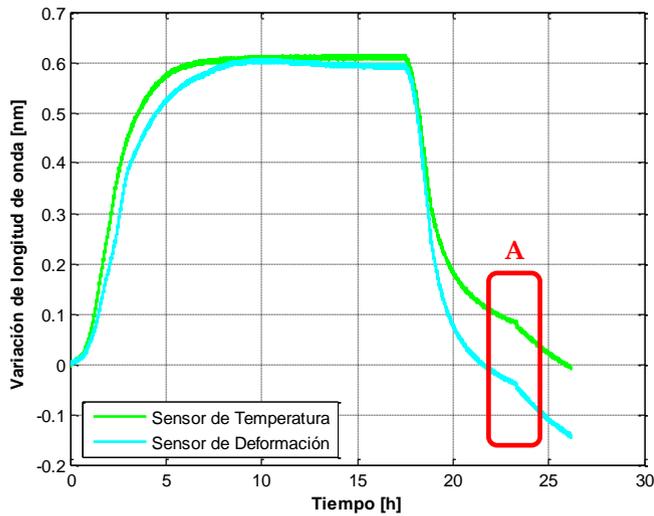


Figura 205. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N^o 4.

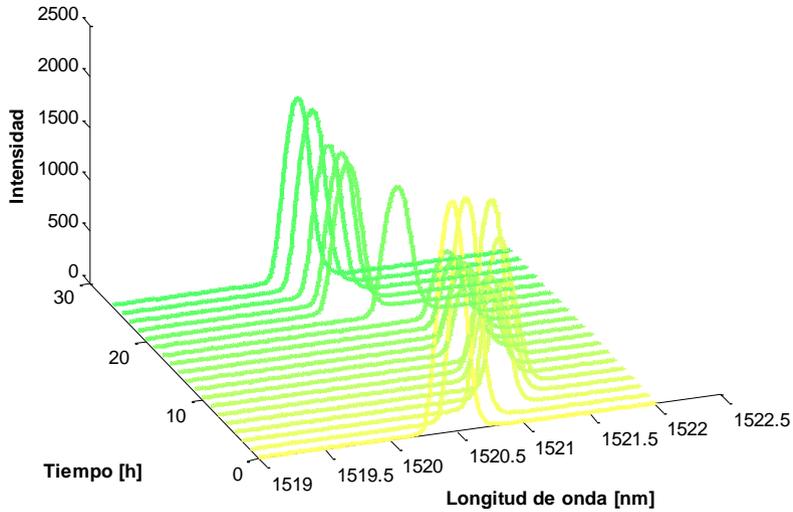


Figura 206. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N° 4).

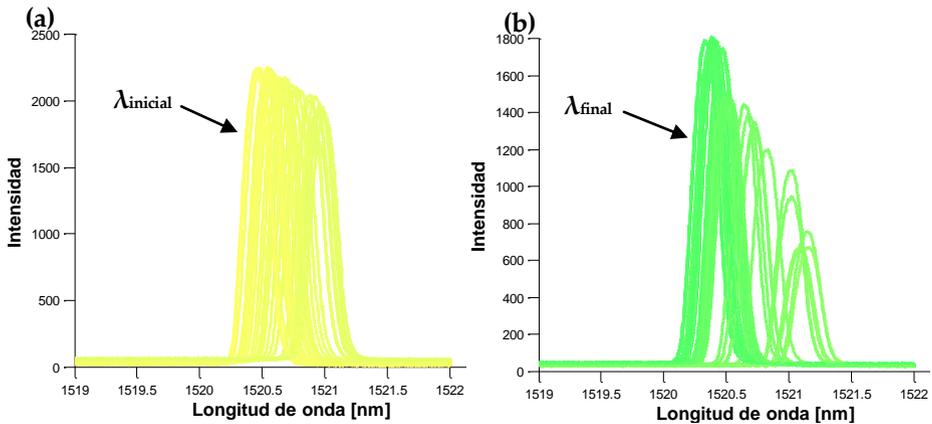


Figura 207. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 4).

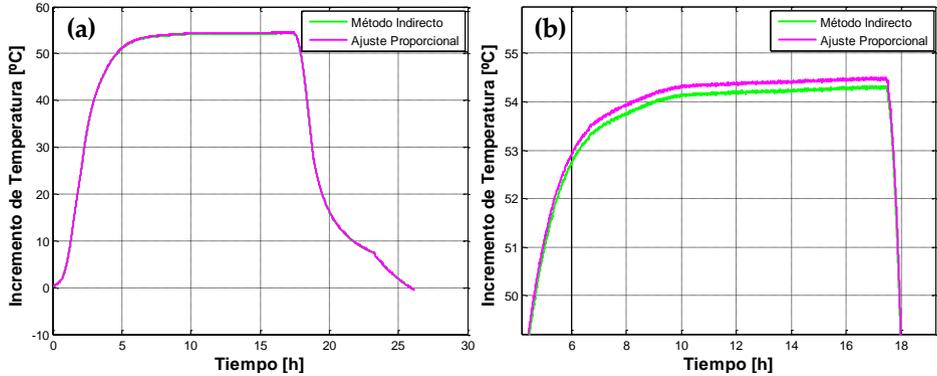


Figura 208. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a .

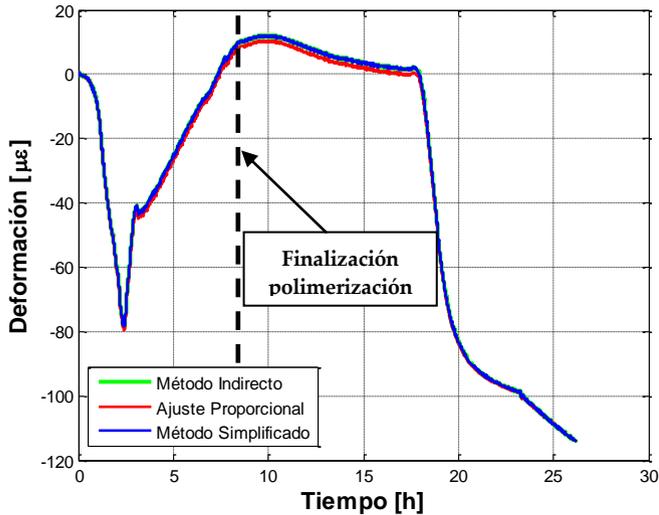


Figura 209. Medida de deformaciones en el panel Nª4.

Panel N^o 5

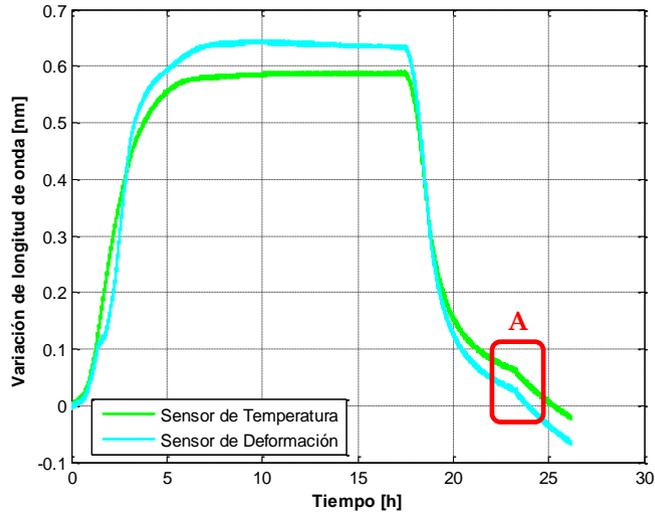


Figura 210. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura embebidos en la probeta N^o 5.

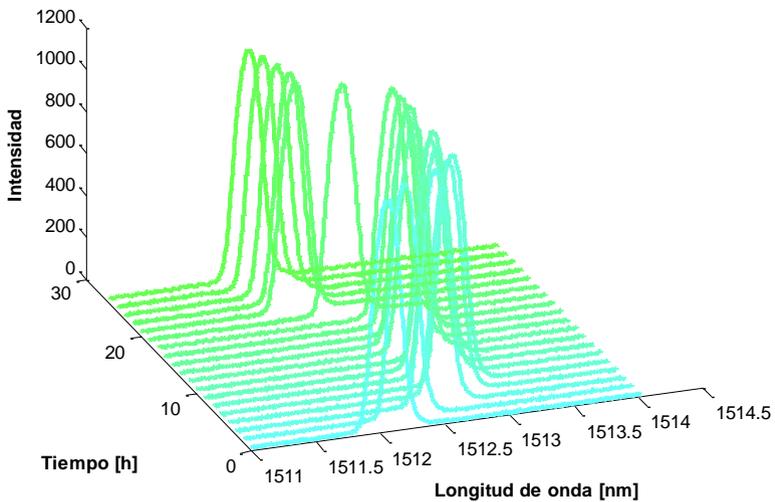


Figura 211. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N^o 5).

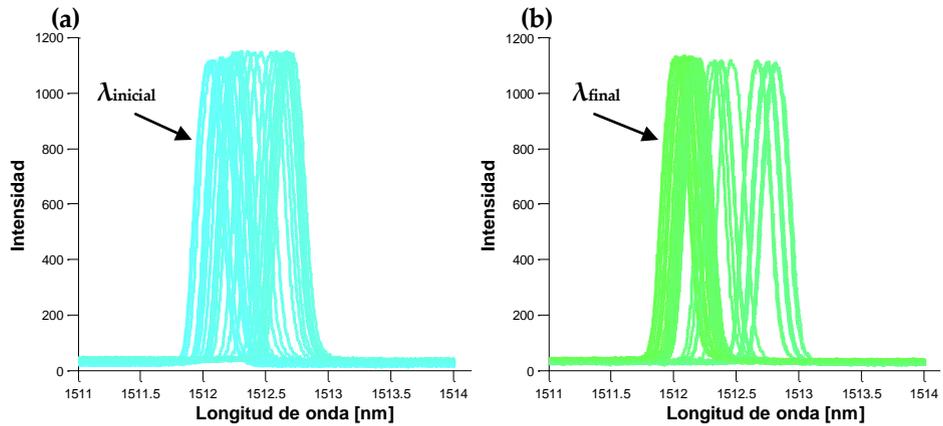


Figura 212. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N° 5).

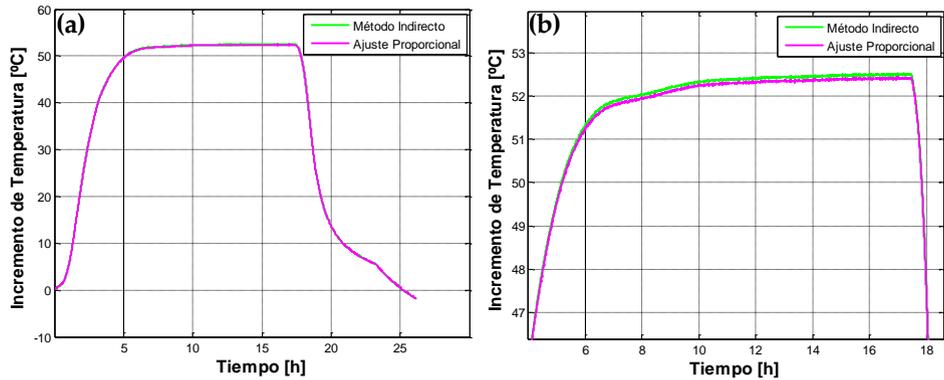


Figura 213. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 25°C): (a) registro completo y (b) detalle de fase a alta T^a .

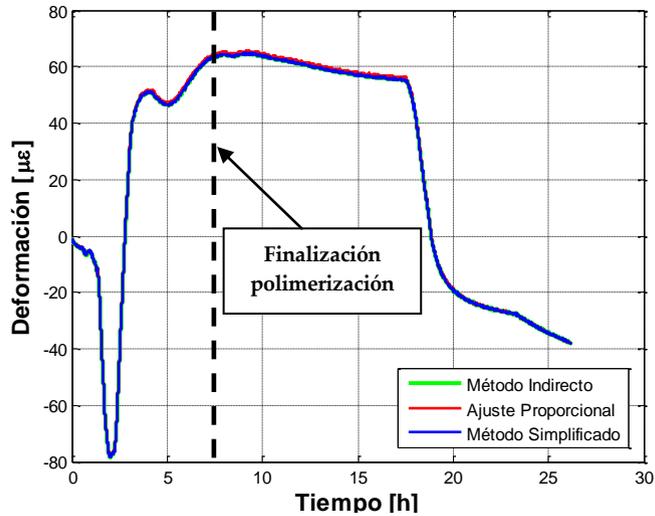


Figura 214. Medida de deformaciones en el panel N^o 5.

Resultados de ensayos con material Z19.732

Panel N^o 7

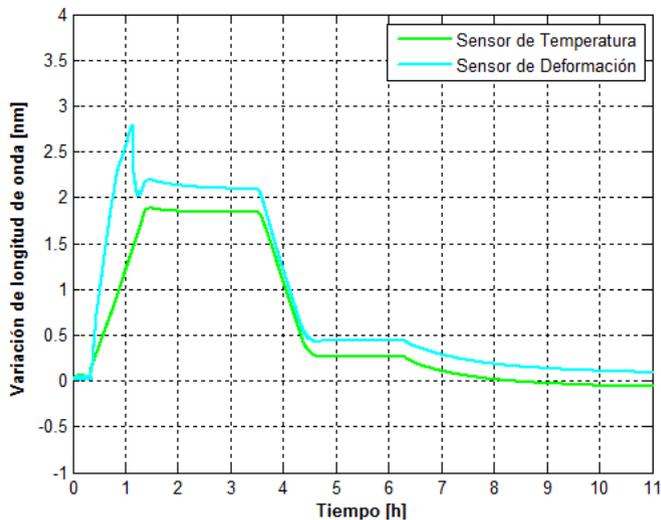


Figura 215. Cambio de longitud de onda de los sensores de deformación y temperatura (panel N^o 7).

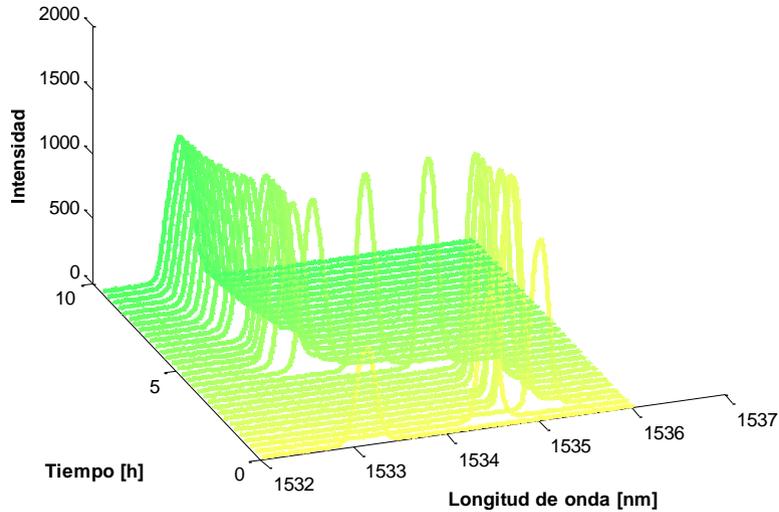


Figura 216. Representación 3D de la longitud de onda reflejada por el sensor de deformación durante el curado (Panel N^o 7).

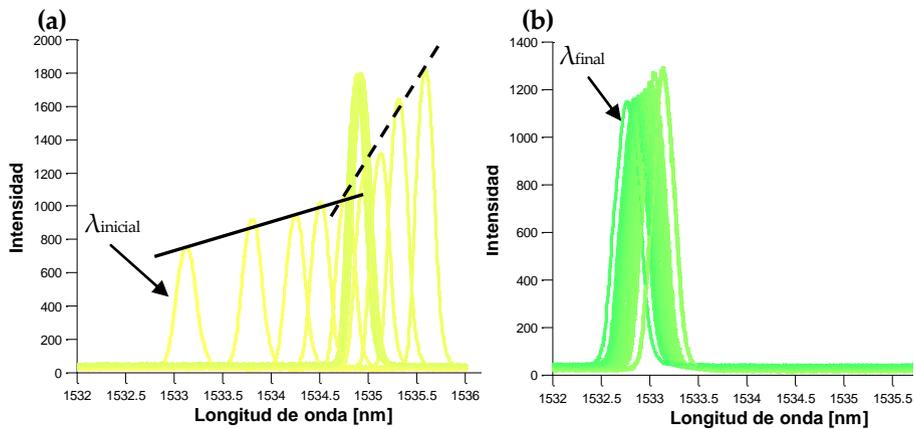


Figura 217. Señal reflejada por el sensor de deformación durante las fases de (a) calentamiento y (b) enfriamiento (panel N^o 7).

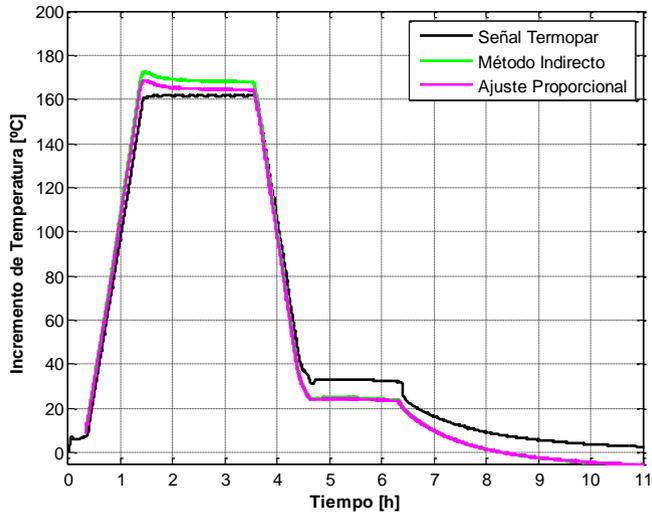


Figura 218. Incremento de temperatura obtenido con el sensor de Bragg por el método indirecto y el de ajuste proporcional (T^a de referencia = 18,5°C).

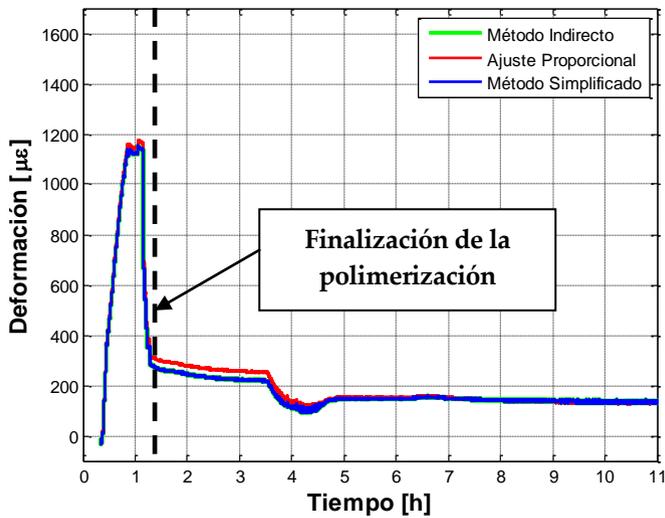


Figura 219. Medida de deformaciones en el panel N° 7.

ANEXO C: IMPLEMENTACIÓN DE LA TECNOLOGÍA FBG EN ENSAYOS ESTRUCTURALES

Monitorización estructural de cabina CFRP

- Ensayo hasta 3 psi (20684,3 Pa)

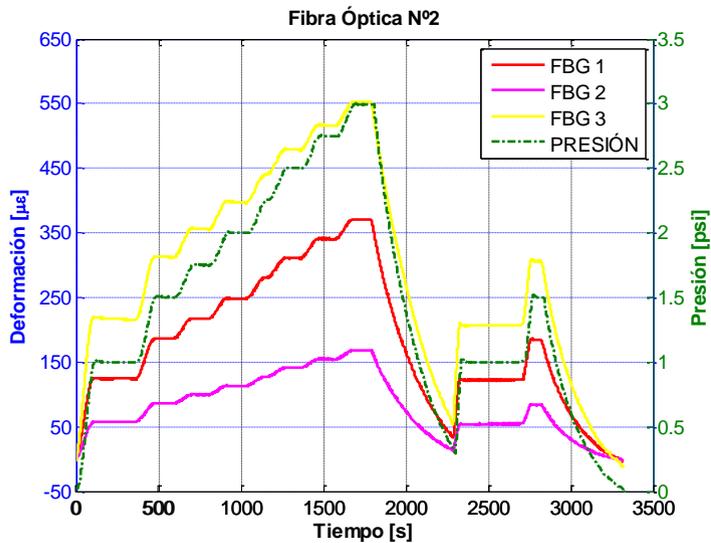


Figura 220. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 2).

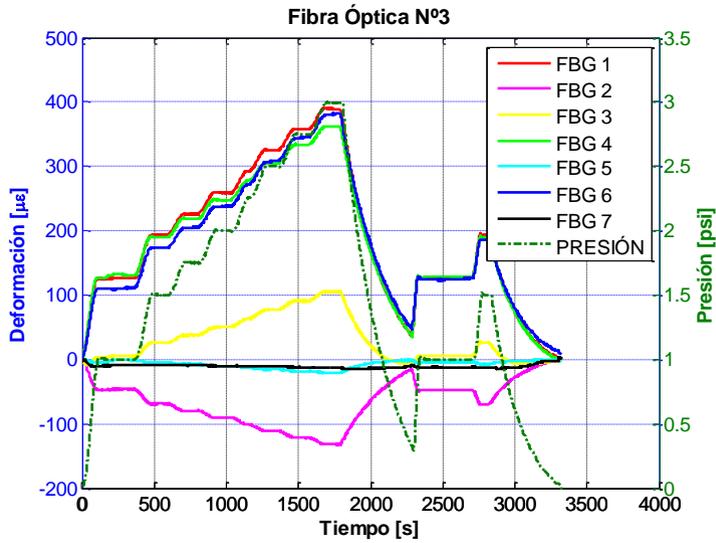


Figura 221. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 3).

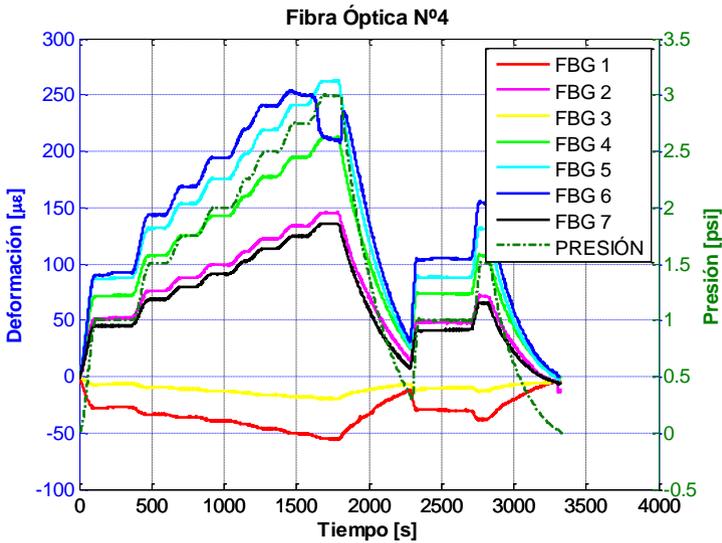


Figura 222. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 3 psi (línea N° 4).

- Ensayo hasta 7 psi (53089,6 Pa)

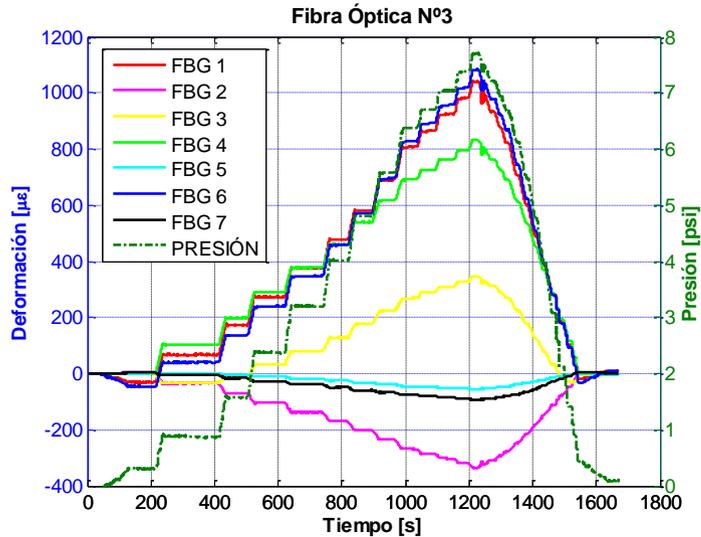


Figura 223. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 3).

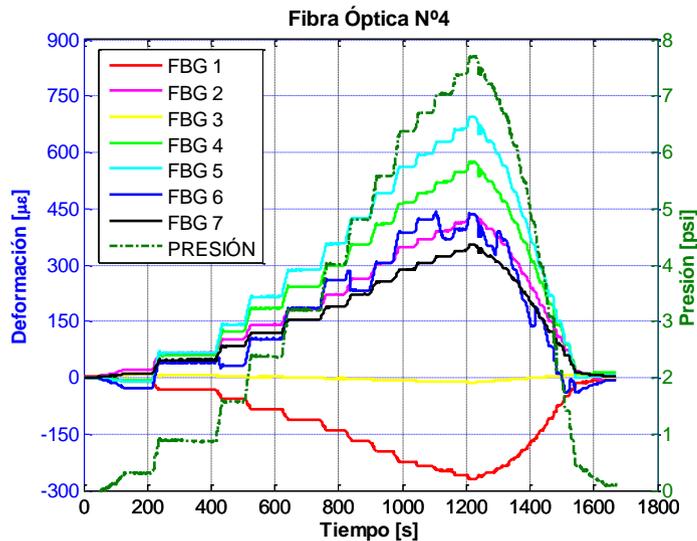


Figura 224. Medidas de deformación de los sensores FBG durante el ensayo hasta 7,7 psi (línea N° 4).

Monitorización estructural de pilares de hormigón armado reforzados con fibra de carbono

- Pilar P1

Periodo I: Precarga

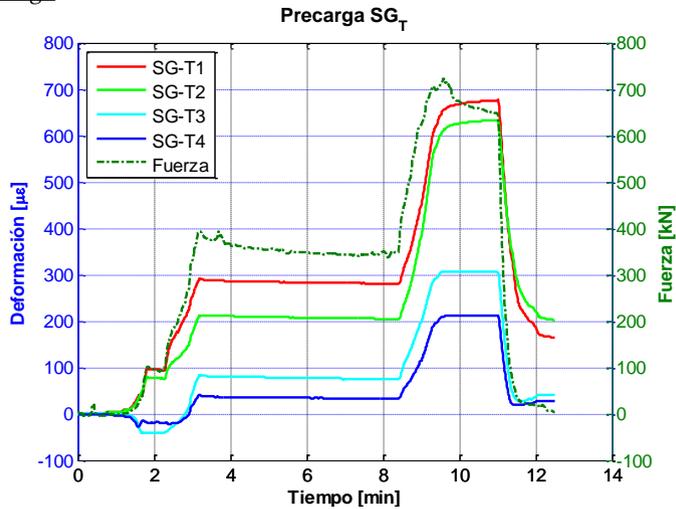


Figura 225. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo I: precarga.

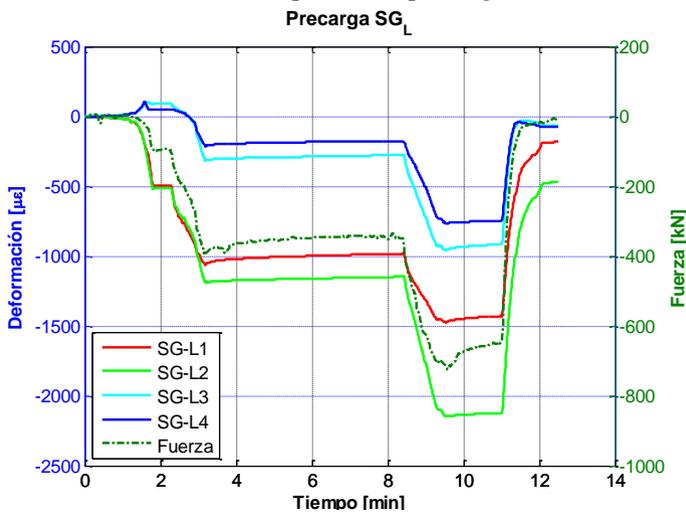


Figura 226. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo I: precarga.

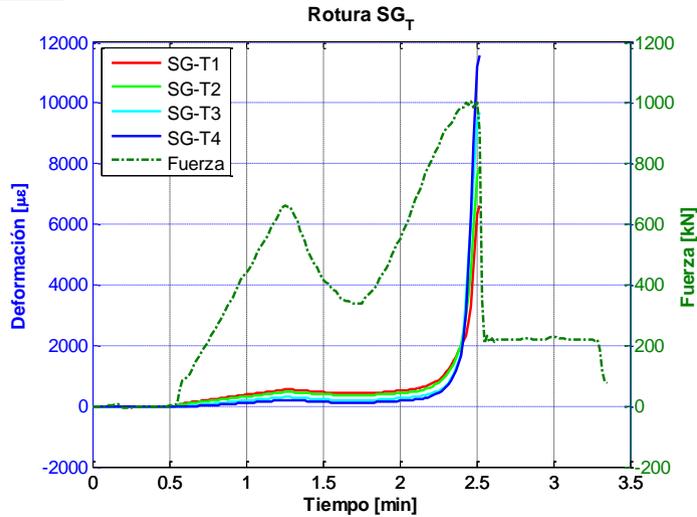
Periodo II: Rotura

Figura 227. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo II: rotura.

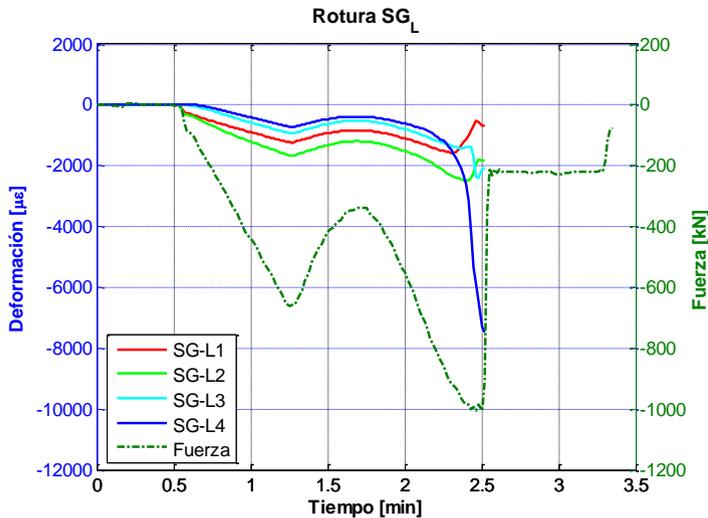


Figura 228. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo II: rotura.

• **Pilar P2**

Periodo I: Precarga

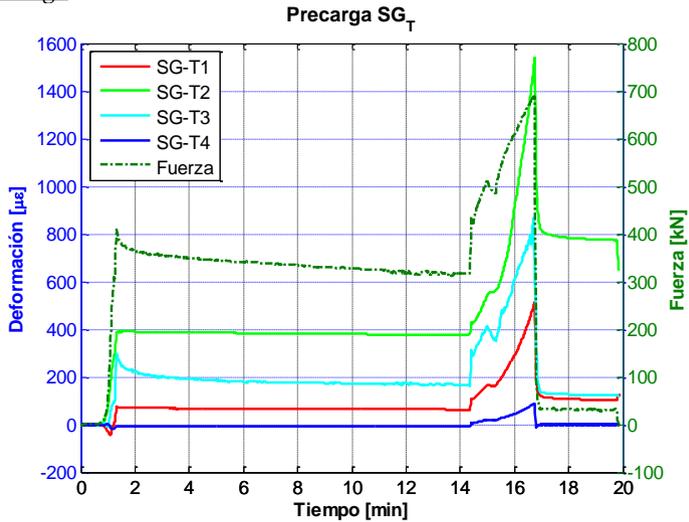


Figura 229. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo I: precarga.

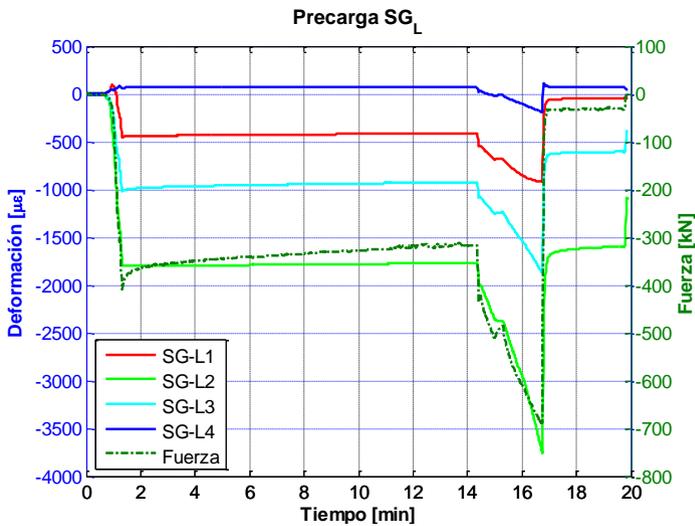


Figura 230. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo I: precarga.

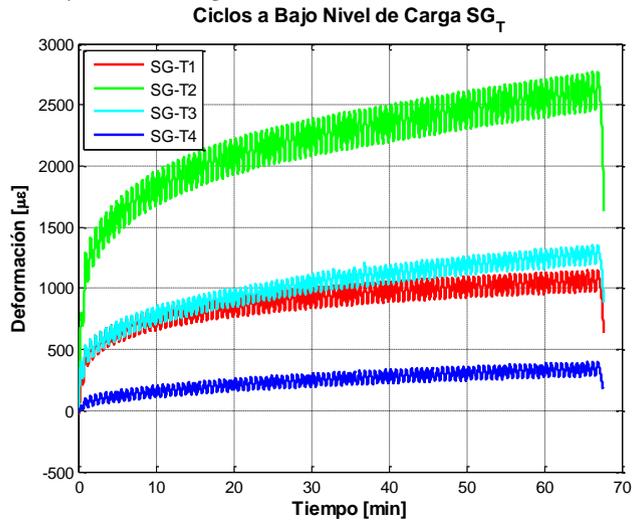
Periodo II: Ciclos a bajo nivel de carga

Figura 231. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.

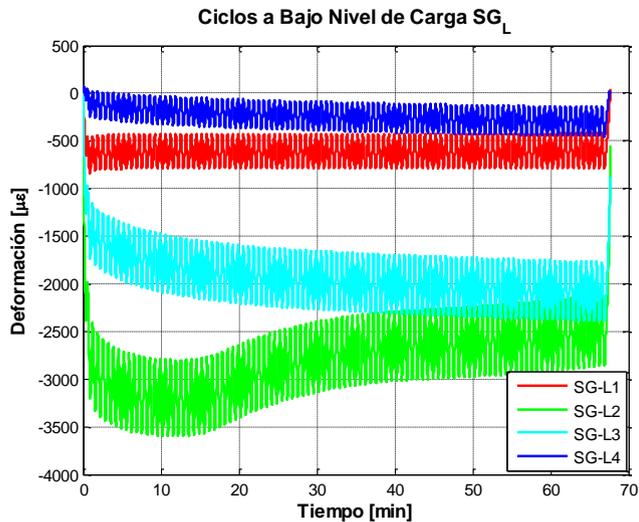


Figura 232. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo II: ciclado a bajo nivel de carga.

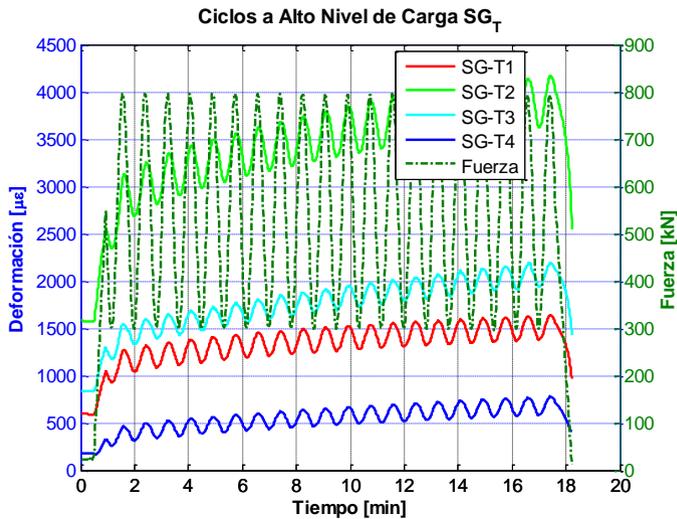
Periodo III: Ciclos a alto nivel de carga

Figura 233. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo III: ciclado a bajo nivel de carga.

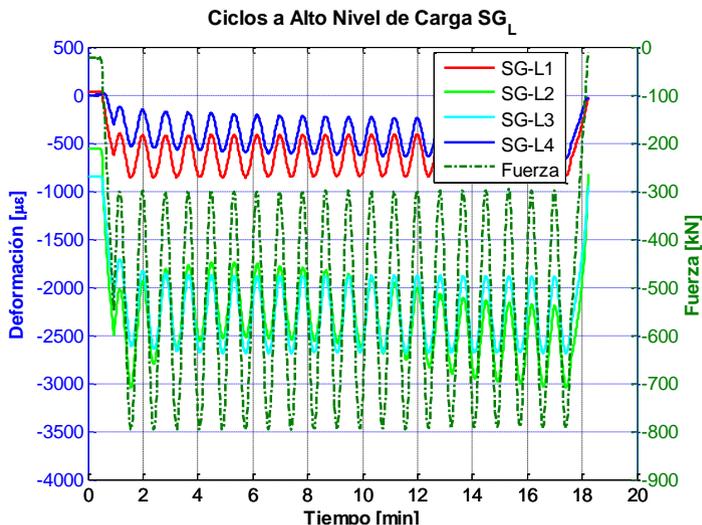


Figura 234. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo III: ciclado a alto nivel de carga.

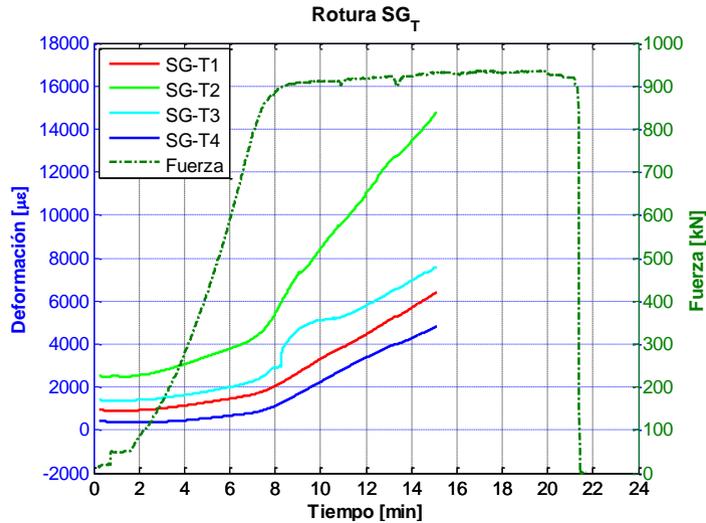
Periodo IV: Rotura

Figura 235. Medidas de deformación de las galgas extensométricas transversales durante el periodo IV: rotura.

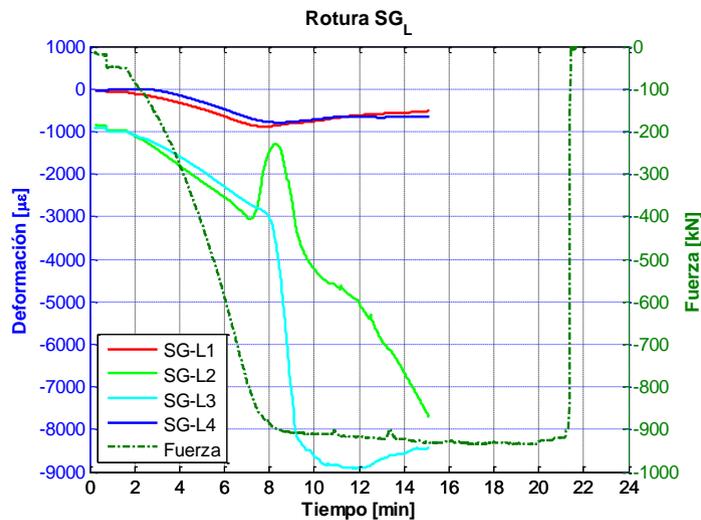


Figura 236. Medidas de deformación de las galgas extensométricas longitudinales durante el periodo IV: rotura.

