



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

---

---

**ARREGLOS DE FIBRAS ÓPTICAS PARA EL  
MONITOREO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

**RUBÉN HERNÁNDEZ VILLEDA**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. SERGIY KHOTYAINITSEV DUSKRIATCHENKO**



CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

A mi mamá Conchita, por todo su apoyo, cariño e incondicional amor. Porque este triunfo también es tuyo ante cada desvelo y preocupación. Porque te admiro, respeto y amo con todo mi corazón. Gracias mamá.

A mi papá Heriberto, por sus consejos y experiencias que me guiaron cuando lo necesité. Por darme ánimos cada noche de estudio y desvelo. Porque siempre me decías que si podía lograrlo. Gracias papá.

A mi abuelita Sabina, por su cuidado, amistad e inmenso amor. Por los valores que me has inculcado y que permanecerán en mí por siempre. Por el deseo de tenerte muchos años más a mi lado. Gracias abuelita.

A mi abuelito Juan, que aunque ya no está conmigo, siempre recordaré sus palabras y enseñanzas. Por ser la primera persona que me inculco el valor del estudio y la constancia, donde quiera que estés. Gracias.

A mi hermano David por ser alguien a quien admiro en muchos aspectos. Porque has logrado abrirte camino superando cualquier obstáculo que se te presente.

A mi hermano Jesús por compartir conmigo tantos momentos familiares felices y tristes. Porque deseo que logres tus objetivos explotando el gran potencial que posees.

A Rosita, por ser mi compañera en estos momentos de mi vida representando una nueva ilusión para mí. Por permitirme conocerte y entrar a tu corazón. Porque me encanta tu sonrisa. Te quiero mucho.

A mis amigos: Viridiana, Héctor, Oscar, Erick, Jorge, Karla, Leonardo, Juan Carlos, Regina, Áaron, Karina, Erika, Raúl, Neto, Oscar Abad, Iván, Uriel, Gaby, Astrid, Lorena por tener la fortuna de haberlos encontrado y mantenerlos a mi lado compartiendo muchas experiencias. Porque de cada uno de ustedes he aprendido algo que conservare por siempre. Gracias por brindarme su amistad.

A mis profesores, por ser causa de mi admiración y reconocimiento hacia cada uno de ellos.

A mi tutor, el Dr. Sergiy Khotyaintsev Duskriatchenko, por sus recomendaciones, experiencia y exigencia que me permitieron realizar exitosamente este trabajo de tesis.

A la UNAM y la Facultad de Ingeniería, por ser mi segunda casa durante todos estos años. Por sentirme orgulloso de ser parte de esta gran institución, enalteciendo su gran labor científica, humanística y cultural.

A la vida, por permitirme compartir este ciclo con las personas que quiero y el ideal de continuar adelante con nuevos retos, engrandeciendo siempre los valores de mi familia, amigos, profesores y mi alma mater la

UNAM.

## Capítulo 1. La Fibra Óptica y sus Aplicaciones: Estado del Arte

<b>La Fibra Óptica y sus Aplicaciones: Estado del Arte</b> .....	1
<b>1.1 La Fibra Óptica y las Telecomunicaciones</b> .....	1
1.1.1 La Fibra Óptica .....	1
1.1.2 Situación actual de las telecomunicaciones.....	3
<b>1.2 Aplicación de la Fibra Óptica como sensor en el monitoreo de estructuras</b> .....	5
1.2.1 Sensores de Fibra Óptica en estructuras de concreto .....	8
1.2.2 Sensores de Fibra Óptica para el monitoreo de tensiones .....	9
1.2.2.1 Sensor de Rejillas de Bragg .....	9
1.2.2.2 Sensor intrínseco de Fabry-Perot .....	11
1.2.2.3 Sensor basado en la Dispersión de Brillouin .....	11
1.2.3 Sensores de Fibra Óptica para la detección de grietas .....	12
1.2.3.1 Sensor basado en variaciones de la intensidad de la luz transmitida.....	13
1.2.3.2 Sensor basado en pérdidas por microcurvaturas periódicas .....	15
1.2.3.3 Sensor basado en equipo OTDR .....	16
1.2.3.4 Sensor basado en variaciones en patrones de moteado.....	18
1.2.4 Sensores de Fibra Óptica en otras estructuras .....	21
<b>1.3 Discusión de los métodos existentes</b> .....	22
1.3.1 Comparación de los métodos existentes .....	22
1.3.2 Identificación de problemas y limitantes.....	23
<b>1.4 Conclusiones</b> .....	24
<b>1.5 Referencias</b> .....	25

## Capítulo 2. Fundamentos teóricos del método propuesto y del comportamiento del concreto sujeto a flexión simple

<b>2.1 Razones del método propuesto</b> .....	27
<b>2.2 Fundamentos de la propuesta y del principio de operación. Pérdidas en la fibra óptica por diversos factores</b> .....	28
2.2.1 Absorción.....	28
2.2.2 Pérdidas por esparcimiento de la luz.....	29
2.2.3 Pérdidas por efectos de radiación.....	30
2.2.4 Daños en la fibra óptica (microgrietas, tensión y compresión).....	35
<b>2.3 Comportamiento del concreto en la prueba de flexión simple</b> .....	37
2.3.1 Características del concreto .....	37
2.3.1.1 Efecto de la edad, relación agua/cemento y velocidad de carga .....	38
2.3.2 Forma de los elementos de concreto. Vigas de concreto. Justificación .....	39
2.3.2.1 Comportamiento y modos de falla de vigas de concreto sujetas a flexión simple.....	40
2.3.2.2 Aparición y evolución de las grietas en vigas .....	42
<b>2.4 Características de los elementos utilizados durante las pruebas</b> .....	46
2.4.1 Fuente Óptica: Láser .....	46
2.4.2 Fibras ópticas utilizadas.....	48
2.4.3 Lente .....	48

2.4.4 Circuito Fotodetector .....	53
<b>2.5 Conclusiones</b> .....	<b>56</b>
<b>2.6 Referencias</b> .....	<b>56</b>

### **Capítulo 3. Diseño e implementación del método propuesto. Arreglo Experimental**

<b>3.1 Diseño estadístico de los experimentos a realizar</b> .....	<b>58</b>
3.1.1 Pautas generales para el diseño experimental.....	59
3.1.2 Diseño del experimento .....	60
3.1.3 Factores de diseño y variable de respuesta .....	60
3.1.4 Tamaño de la muestra, nivel de confianza y precisión.....	61
<b>3.2 Pruebas Preliminares</b> .....	<b>64</b>
3.2.1 Integridad de las fibras ópticas en el proceso de integración a los elementos de concreto .....	65
3.2.2 Doblamiento de la fibra óptica .....	66
3.2.3 Tensión de la fibra óptica en el concreto.....	68
<b>3.3 Análisis de los resultados preliminares</b> .....	<b>70</b>
<b>3.4 Definición del método propuesto</b> .....	<b>72</b>
<b>3.5 Procedimiento de construcción de los elementos de concreto (muestras)</b> .....	<b>73</b>
3.5.1 Materiales utilizados para la mezcla de concreto. Cemento, Arena, Grava .....	74
3.5.2 Diseño de la mezcla de concreto .....	75
3.5.3 Integración y distribución de las fibras ópticas en las vigas de concreto .....	77
<b>3.6 Montaje del experimento</b> .....	<b>78</b>
3.6.1 Descripción y consideraciones del montaje experimental.....	78
<b>3.7 Conclusiones</b> .....	<b>80</b>
<b>3.8 Referencias</b> .....	<b>80</b>

### **Capítulo 4. Discusión de los resultados**

<b>4.1 Análisis de los resultados</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2 Determinación del daño estructural</b> .....	<b>86</b>
4.2.1 Hipótesis sobre la determinación del daño estructural.....	87
<b>4.3 Comparación con los métodos existentes</b> .....	<b>89</b>
<b>4.4 Identificación de problemas y posibles mejoras</b> .....	<b>90</b>
<b>4.5 Conclusiones</b> .....	<b>91</b>
<b>4.6 Referencias</b> .....	<b>92</b>

### **Capítulo 5. Conclusiones Generales**

<b>5.1 Conclusiones Generales</b> .....	<b>93</b>
---	-----------

### **Anexos**

<b>A.1 Especificaciones y dimensiones del láser utilizado</b> .....	<b>94</b>
<b>A.2 Características de las fibras ópticas utilizadas</b> .....	<b>95</b>
<b>A.3 Parámetros del fotodiodo PIN FD-263</b> .....	<b>96</b>
<b>A.4 Resultados prueba de doblamiento de la fibra óptica</b> .....	<b>96</b>
<b>A.5 Resultados prueba de tensión en la fibra óptica</b> .....	<b>97</b>
<b>A.6 Comprobación de la estabilidad de la fuente de poder</b> .....	<b>98</b>

## **Introducción**

Este trabajo de tesis analiza experimentalmente la viabilidad de utilizar a la fibra óptica simple como sensor para detectar la aparición de grietas en elementos de concreto. El principio de operación propuesto se basa en el monitoreo de las pérdidas excesivas en la transmisión de la luz a lo largo del núcleo de la fibra óptica generadas por factores externos que alteran la estructura física de la fibra óptica, por ejemplo, cuando el concreto se fractura por efecto de una carga. Dichas modificaciones tales como microcurvaturas, tensiones y compresión generan pérdidas en la transmisión de la luz por efectos de radiación y reflexión que pueden mostrar indicios de la formación de grietas en el concreto.

Mediante la integración de fibras ópticas en ciertas zonas en los elementos de concreto es posible monitorear las pérdidas en la transmisión de la luz y determinar si la fibra óptica sufre de daños en su estructura debido a la aparición de las grietas y a la fractura parcial del concreto. La investigación realizada en este trabajo de tesis se enfocó en definir un arreglo de fibras ópticas en vigas de concreto subreforzadas colocadas con base en los fenómenos presentes en la viga durante la prueba de flexión simple, de modo tal que los efectos de compresión y tensión presentes en la viga alteraran la estructura física de la fibra óptica generando pérdidas en la transmisión de la luz.

Los resultados obtenidos muestran que la fibra óptica sufre de daños en su estructura física debido a la aparición de grietas en la masa de concreto, sin embargo dichas pérdidas en la transmisión de la luz son muy pequeñas por lo que la viabilidad de utilizar a la fibra óptica como sensor para detectar la formación de grietas en elementos de concreto es limitada.

El presente trabajo forma parte de un proyecto de investigación científica realizado con el apoyo de la DGAPA, UNAM en el proyecto PAPIIT IN114104-3. En este proyecto participaron dos de mis compañeros estudiantes de la Facultad de Ingeniería realizando distintas tareas que permitieron la exitosa realización de este trabajo de tesis. Agradezco su colaboración.

## **Objetivos Generales**

- Determinar experimentalmente la viabilidad de emplear a la fibra óptica simple como sensor para la detección de grietas en elementos de concreto.
- Definir un arreglo de fibras ópticas simples integradas en los elementos de concreto con el fin de detectar la formación de grietas.

## **Metas**

- Investigación bibliográfica sobre el estado del arte de las técnicas de sensores de fibra óptica para el monitoreo de tensiones y la detección de grietas en elementos de concreto. Describiendo las ventajas y desventajas que presentan cada método.
- Estudio teórico sobre las pérdidas excesivas en la transmisión de la luz por la fibra óptica, debido a aquellos factores externos que modifican o dañan la estructura física de la fibra óptica.
- Investigación y comprobación experimental sobre los factores externos que dañan la estructura física de la fibra óptica generando pérdidas en la transmisión de la luz.
- Investigación teórica sobre las características del concreto, y su comportamiento bajo la prueba de flexión simple en una viga.
- Análisis de la señal transmitida por el arreglo de fibras ópticas simples integradas en elementos de concreto durante la prueba de flexión simple del concreto.

# Capítulo 1

## La Fibra Óptica y sus Aplicaciones: Estado del Arte

---

### 1.1 La Fibra Óptica y las Telecomunicaciones

Hoy en día los sistemas de telecomunicaciones forman parte de una red global que brinda múltiples servicios a millones de usuarios en todo el mundo. El desarrollo de múltiples sistemas de comunicaciones basados principalmente en ondas de microondas y tecnología de fibra óptica han permitido un amplio crecimiento en los servicios de telefonía fija, telefonía móvil celular, internet, banda ancha fija y banda ancha móvil principalmente. En esta sección se dará un panorama general de la importancia de la fibra óptica como medio de transmisión en los sistemas actuales de telecomunicaciones así como de las aplicaciones en el área de sensores. También se abordará la situación actual de las telecomunicaciones referentes a los servicios e indicadores establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

#### 1.1.1 La Fibra Óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión dieléctrico hecha de plástico, vidrio o cuarzo fundido ( $\text{SiO}_2$ ), que emplea el fenómeno de Reflexión Total Interna entre dos medios con diferente índice de refracción para confinar y transmitir la luz como señal portadora de información. Se compone de un núcleo hecho de cuarzo fundido, vidrio o plástico con índice de refracción  $n_1$  y un revestimiento del mismo material que envuelve al núcleo con un índice de refracción  $n_2$ . Para que



exista el fenómeno de Reflexión Total Interna el núcleo debe ser más denso ópticamente que el revestimiento, es decir,  $n_1 > n_2$  y el ángulo de incidencia  $\theta_i \geq \theta_c$  [1]. Figura 1.1.

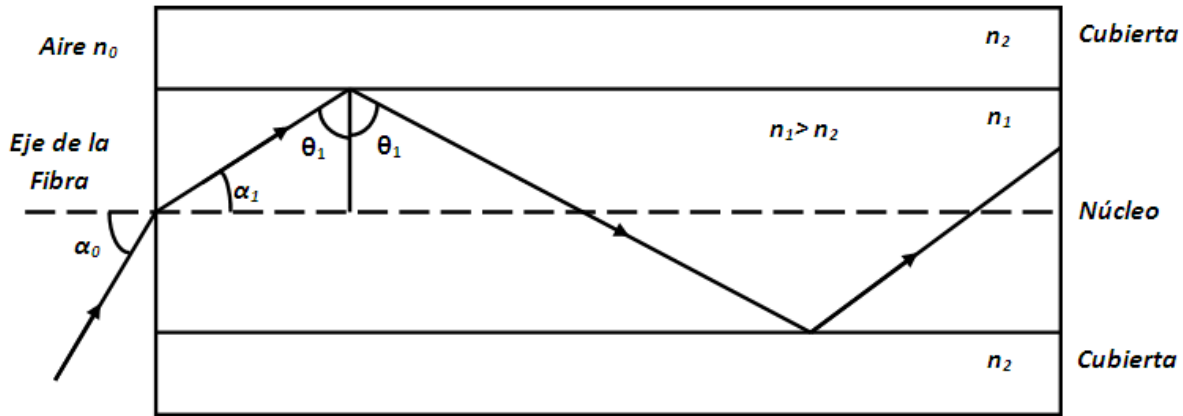


Figura 1.1 Corte longitudinal de la fibra óptica [1]

De manera general existen 3 distintos tipos de fibras ópticas de acuerdo a los modos que se propagan a lo largo del núcleo de la fibra óptica y a la característica del índice de refracción del núcleo: 1.Fibra monomodo de índice escalonado, 2.Fibra multimodo de índice escalonado y 3.Fibra multimodo de índice gradual. [1]

La frecuencia de corte normalizada ( $V$ ) es un parámetro que agrupa algunos otros parámetros importantes de la fibra óptica como: el radio del núcleo ( $a$ ), apertura numérica ( $AN$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ). De acuerdo a la teoría modal aplicada a una fibra de índice escalonado se tiene que una fibra puede ser utilizada en régimen monomodo o multimodo de acuerdo a estos parámetros: [2]

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(AN)$$

$$V \leq 2.405 \text{ régimen monomodo}$$

$$V > 2.405 \text{ régimen multimodo}$$

La importancia de la fibra óptica como medio de transmisión recae en el hecho de que representa una alternativa de mayor potencial respecto a las comunicaciones por cables conductores o microondas. Sus principales características son básicamente que posee un gran ancho de banda de 0.1–1000GHz, bajo coeficiente de atenuación 0.15–5dB/Km, inmunidad a las interferencias electromagnéticas, peso ligero alrededor de 3Kg/Km, y la capacidad de transmitir datos a longitudes de 40Km con un solo cable. [3]

Además gracias al gran avance tecnológico, se han desarrollado técnicas e instrumentos que permiten explotar de manera eficiente las características de la fibra óptica. Las fuentes de transmisión como los LED's y los láseres principalmente, los sistemas de recepción como los fotodiodos y fototransistores, los amplificadores ópticos, los moduladores, los codificadores, los filtros y las técnicas de multiplexación como TDM, WDM y DWDM han propiciado el desarrollo y explotación del sector de las telecomunicaciones de manera tal que es posible tener una gran capacidad de transmisión por un solo cable de fibra óptica. [4,5]

### 1.1.2 Situación actual de las telecomunicaciones

Actualmente la utilización de los servicios de tecnologías de la información y la comunicación (TIC), como la telefonía móvil e internet, han ido aumentando en todo el mundo. Las estimaciones muestran que, a finales de 2009, había 4 600 millones de abonados al servicio móvil celular, lo que corresponde al 67% de la población mundial, figura 1.2. En ese mismo año, la tasa de penetración móvil celular en los países en desarrollo alcanzó un 57%, sin embargo este porcentaje aún está muy por debajo de la media de los países desarrollados, donde la penetración supera el 100% [6]. En el caso de México el número de abonados al servicio móvil celular es superado por países como Perú, Brasil, Chile, Venezuela, Uruguay y Argentina en el área de Latinoamérica. [7]

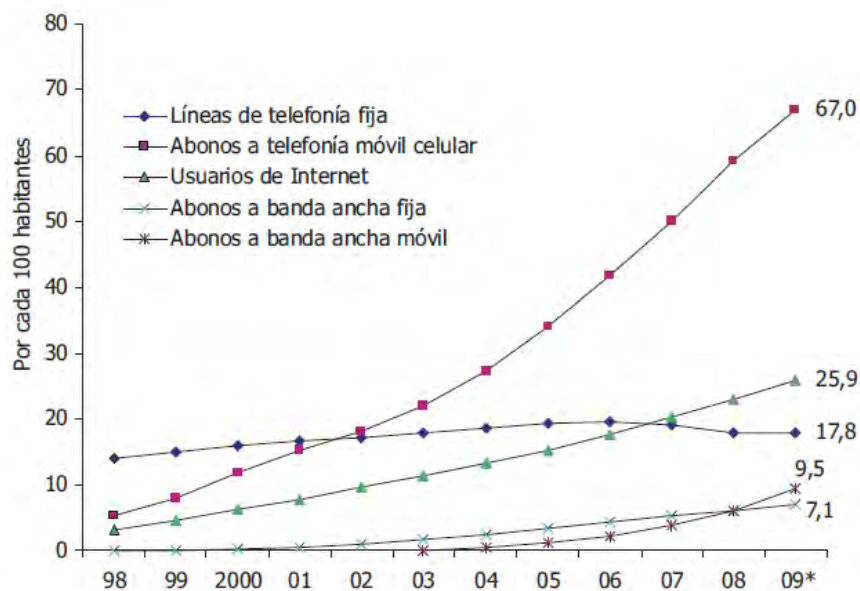


Figura 1.2. Crecimiento de los principales servicios de telecomunicaciones en todo el mundo [6]

Así mismo, la utilización de internet ha seguido creciendo aunque a un ritmo más lento. Se considera que en el 2009 el 26% de la población mundial (es decir, 1 700 millones de personas) utilizaban internet. En los países desarrollados, el porcentaje sigue siendo muy superior al de los países en desarrollo, donde aún cuatro de cada cinco personas carecen de acceso. La tasa de penetración de internet en los países desarrollados llegó al 64% a finales de 2009, mientras que en los países en desarrollo apenas llega al 18%. Así mismo, la tasa de penetración a la banda ancha es del 23% de habitantes en los países desarrollados y sólo del 4% en los países en desarrollo (el dos por ciento, si se excluye a China) [6]. En el caso de México el servicio de internet de banda ancha es superado por Uruguay, Argentina y Chile. [8]

Por otro lado el sector de la banda ancha móvil está evolucionando de manera más prometedora. La introducción del acceso a internet móvil de alta velocidad en cada vez más países aumentará rápidamente el número de usuarios de internet, sobre todo en los países en desarrollo. De hecho, el número de abonados a la banda ancha móvil ha ido creciendo paulatinamente y en 2008 superó a los de banda ancha fija. Se estima que a finales de 2009 había 640 millones de abonados a banda ancha móvil y 490 millones a banda ancha fija. [6]

Dentro de las regiones, Europa es la primera región del mundo en infraestructura y servicios de TIC. La tasa de penetración móvil celular supera el 100% en la mayoría de los países europeos y cerca de dos de cada tres usuarios europeos utiliza internet [6]. En segundo lugar se encuentra la región de América, sin embargo su promedio está dominado únicamente por los Estados Unidos y Canadá. [9]

En cuanto a precios entre 2008 y 2009, el costo de los servicios de las TIC se ha reducido en casi todos los 161 países considerados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones. Los servicios de banda ancha fija son los que han experimentado una mayor caída alrededor del 42%, en comparación con el 25% de la telefonía móvil celular y el 20% de la telefonía fija. En esta clasificación de precios México ocupa el lugar 48 de entre los 161 países considerados por la UIT y es superado únicamente por Costa Rica y Trinidad y Tobago en relación a países latinoamericanos. Sin embargo el acceso a la banda ancha es el servicio más caro y menos accesible en los países en desarrollo donde su precio supera el ingreso per cápita mensual. [6]

## **1.2 Aplicación de la Fibra Óptica como sensor en el monitoreo de estructuras**

Hoy en día uno de los principales retos de varias disciplinas de la ciencia y la ingeniería es la creación de construcciones y/o estructuras cada vez más complejas capaces de operar en condiciones adecuadas bajo circunstancias adversas tales como los desastres naturales. Estas estructuras, denominadas estructuras inteligentes, deben tener la característica de responder al medio y reacondicionarse de manera tal que se asegure su integridad en caso de algún desastre natural como sismos, tormentas, lluvias torrenciales, tornados, etc., [10]. Para esto la estructura debe poseer la habilidad de sensar el medio interno y externo de manera que se puedan realizar acciones de control de acuerdo a los datos obtenidos. Estas acciones pueden implicar modificar la forma, tamaño, rigidez, posición, etc., de las estructuras para minimizar los daños y prevenir accidentes. El campo de las estructuras inteligentes involucra un amplio rango de disciplinas para ser desarrollada tales como ciencias de los materiales, sensado, instrumentación, actuación, microelectrónica junto con desarrollos en computación, comunicaciones, software y control. Países como Japón, Estados Unidos y la Unión Europea encabezan el estudio e innovación en ésta área. [11]

Para lograr esto se debe contar con un sistema de monitoreo capaz de aportar datos precisos y concretos que permitan realizar un análisis del estado e integridad de la estructura y en dado caso efectuar las acciones de control correspondientes. Este sistema no debe alterar el estado y funcionalidad de la estructura [10] y debe ser tal que opere correctamente bajo circunstancias adversas como cambios bruscos de temperatura, tensiones, vibraciones, desplazamientos, presencia de químicos, entre otros factores, de manera que brinde datos confiables. Además debe permitir la integración y colocación de muchos sensores a lo largo de la estructura [12] y generar las instrucciones correspondientes para producir cambios en el comportamiento de la estructura y adaptarse a las nuevas condiciones. [13]

Con un monitoreo adecuado es posible realizar la detección de fallas, sobrecargas, doblamientos, deformaciones y fracturas que pueden poner en peligro la integridad de la estructura. El monitoreo es una parte fundamental en la ingeniería civil, ya que el contar con un sistema de monitoreo adecuado permite identificar aquellas zonas que realmente necesitan atención y así reducir los costos de mantenimiento y alargar la vida útil de las estructuras [12].

En la actualidad existen distintas técnicas comerciales para el monitoreo de estructuras, tales como, el escaneo ultrasónico, pulsos transitorios, radiografías infrarrojas y radares de tierra enfocadas al monitoreo de la integridad, evaluación y diagnóstico de las estructuras. Sin embargo a pesar de que estas técnicas ya están establecidas y presentan resultados confiables, no son adecuadas para la evaluación y monitoreo en tiempo real. [14]

Otros métodos que existen y son capaces de realizar monitoreo y mediciones en tiempo real están basados en los sensores eléctricos convencionales (strain gauge), las emisiones acústicas y los sensores de fibra óptica [14]. Para el caso de los sistemas basados en los sensores eléctricos convencionales, dispositivos utilizados ampliamente en ingeniería civil para medir la tensión de un objeto en su superficie, éstos presentan ciertas desventajas tales como costos de mantenimiento, vulnerabilidad ante las interferencias electromagnéticas, sensibilidad al ruido eléctrico presente en el ambiente, degradación de los componentes con el paso del tiempo y alteraciones mecánicas en la estructura a monitorear. [15]

Debido a esto los sensores basados en fibras ópticas son una alternativa de gran impacto para reducir o eliminar muchos de estos problemas en las llamadas estructuras inteligentes [10]. La idea es equipar a la estructura de un “sistema nervioso” capaz de evaluar daños ocurridos por sobrecargas, vibraciones excesivas, movimientos de la tierra u otros fenómenos que serían difíciles de evaluar por medio de los sistemas convencionales [16]. Éstos sensores de fibra óptica han demostrado ser adecuados para el monitoreo de estructuras en ingeniería civil, debido a que presentan importantes ventajas sobre los sensores eléctricos convencionales. Algunas de estas ventajas se presentan a continuación [10].

1. Diámetro pequeño, alrededor de  $125\mu\text{m}$  o menos, lo que permite integrarlos de manera relativamente sencilla en muchos tipos de estructuras sin afectar sus propiedades mecánicas. [10]
2. Inmunidad a las interferencias electromagnéticas, eliminando así los costos de blindaje para el caso de cables conductores. Además al ser un dieléctrico se elimina el riesgo de presentar un corto circuito, pudiendo extender su uso en estructuras de metal. [10]

3. Compatibilidad con las técnicas de multiplexación y la tecnología empleada en telecomunicaciones, lo cual permite soportar un gran número de sensores a lo largo una sola fibra óptica y así monitorear muchas secciones de alguna estructura. [12]
4. Capacidad de realizar mediciones en un solo punto o sobre toda una región de la fibra óptica, lo que se denomina sensores puntuales y distribuidos respectivamente. [12]
5. Resistencia a condiciones adversas tales como altas temperaturas, corrosión, erosión, vibraciones, voltajes, tensiones, presiones etc. [17]
6. Bajo costo de fabricación y mantenimiento. [10]

Básicamente la aplicación de sensores de fibra óptica se puede clasificar dentro de cuatro grandes categorías: [10]

- 1) **Manufactura inteligente.**– En esta área los sensores de fibra óptica son integrados o añadidos a piezas o partes mecánicas en industrias como la automotriz y la aeronáutica durante el proceso de manufactura de las mismas [18]. Su función es monitorear parámetros como temperatura, presión, viscosidad, grado de pureza del material y tensiones residuales. [10]
- 2) **Aplicación en pruebas no destructivas.**– Las fibras ópticas son utilizadas para medir o estimar parámetros mecánicos como por ejemplo cambios en los perfiles de tensión y en la característica y forma de las partes fabricadas. [10]
- 3) **Sistemas de evaluación para estructuras.**– En esta área se trata de evaluar a las estructuras de manera conjunta, es decir, poder determinar daños presentes en algún edificio, puente, presa o incluso aviones en estado de vuelo. [10]
- 4) **Sistemas de control.**– A diferencia de los sistemas de evaluación, los sistemas de control miden los efectos ambientales que actúan sobre la estructura, de manera tal que ésta pueda responder a ellos. Por ejemplo un edificio que al ser afectado por un temblor o movimiento del suelo, tenga la capacidad de reajustarse de manera automática con el fin de minimizar los daños provocados por dicho movimiento. [10]

Por lo tanto, aunque la aplicación de sensores de fibra óptica ha sido ligeramente introducida en industrias como la automotriz, aeronáutica y manufactura, hoy en día aún existen muchos inconvenientes que limitan el uso de estos sensores en estructuras civiles de gran tamaño construidas básicamente de concreto. En los siguientes temas se abordará la aplicación de sensores en estructuras de concreto y se realizará un análisis de su viabilidad y los problemas que existen actualmente.

### **1.2.1 Sensores de Fibra Óptica en estructuras de concreto**

La aplicación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto presenta distintos inconvenientes y problemas que limitan su amplia implementación en esta área. En su forma básica la fabricación de concreto involucra elementos como cemento, grava y arena que son mezclados junto con el agua para la obtención del mismo. Éste procedimiento puede llegar a dañar la estructura física de la fibra al querer integrarla en los elementos de concreto, es decir, la fibra puede doblarse, moverse, fracturarse e incluso romperse al momento del fabricado de los elementos de concreto. Estos daños pueden modificar las características de la fibra óptica una vez insertada en los elementos de concreto y por consecuencia aportar datos erróneos al sistema de monitoreo. [10]

Otro factor importante que ha limitado la aplicación de sensores de fibra óptica en elementos y estructuras de concreto es el factor temperatura. El proceso de mezclado del concreto involucra una reacción exotérmica<sup>1</sup> que eleva la temperatura de la mezcla [14], esta temperatura inducida produce una tensión aparente ejercida sobre la fibra óptica, ésta tensión aparente es la combinación de muchos factores como la expansión térmica del material y el cambio en el índice de refracción de la fibra debido a la temperatura inducida [19]. Posteriormente, en el proceso de curado del concreto la temperatura del mismo va disminuyendo ocasionando que ésta tensión aparente también lo haga. Estas reacciones químicas presentes en la elaboración del concreto y en el proceso de curado representan un factor que pueden modificar los datos obtenidos por los sensores de fibra óptica si no se analizan con detenimiento para llevar a cabo un proceso de calibración [14]. De manera general la aplicación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto se enfoca principalmente al monitoreo de tensiones y la detección y ubicación de grietas en elementos de concreto.

---

<sup>1</sup> Cualquier reacción química que desprende energía, en este caso en forma de calor

## 1.2.2 Sensores de Fibra Óptica para el monitoreo de tensiones

Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo de tensiones están basados principalmente en técnicas de rejillas, interferométricas y reflectométricas. Estos sensores de fibra óptica requieren de técnicas especializadas en la manipulación de las fibras ópticas para modificar algunas características de las mismas como en el caso de las rejillas de Bragg y la cavidad Fabry-Perot, o bien requieren de costosos equipos de medición como el OTDR (Optical Time Domain Reflectometry).

### 1.2.2.1 Sensor de Rejillas de Bragg

Una rejilla de Bragg es una variación longitudinal del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica [14]. Para formar esta variación se somete una sección de la fibra óptica a dos rayos UV que al momento de interferirse producen un patrón de interferencia que modulan el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica en esa sección. [20]

La variación del índice de refracción del núcleo de la fibra, denominada rejilla de Bragg, actúa como un espejo selector de longitud de onda que refleja una banda estrecha de un rayo de luz de amplio espectro, es decir, si por la fibra óptica viaja un rayo de luz de amplio espectro, la rejilla de Bragg reflejará una banda estrecha de este rayo y dejará pasar las demás componentes, figura 1.3. La banda estrecha reflejada estará centrada en lo que se denomina longitud de onda de Bragg. [15,22]

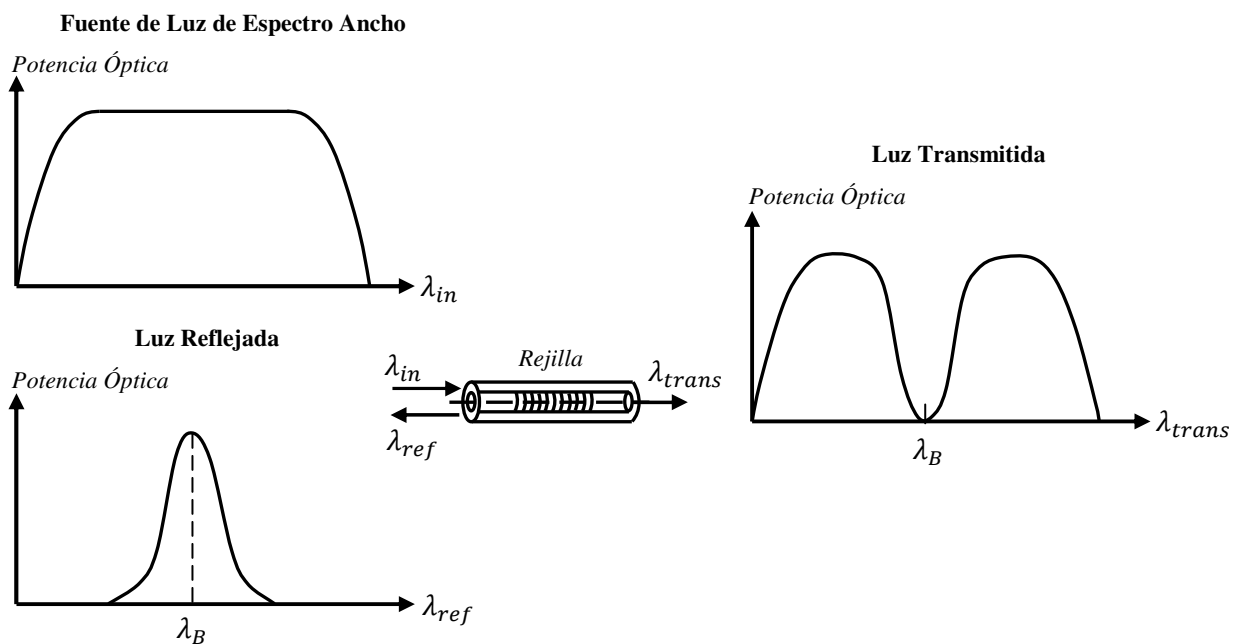


Figura 1.3. Principio de operación de una rejilla de Bragg [21]



La longitud de onda de Bragg está determinada por la siguiente ecuación: [21]

$$\lambda_B = 2\eta_{eff}\Lambda$$

Donde  $\lambda_B$  es la longitud de onda de Bragg,  $\eta_{eff}$  es el índice de refracción efectivo<sup>2</sup> en el núcleo a lo largo de la fibra y  $\Lambda$  es el periodo de la rejilla de Bragg.

Si se aplica una tensión sobre la rejilla el periodo cambiará debido a la elongación física de la rejilla, así como el índice de refracción del núcleo debido al efecto fotoelástico<sup>3</sup>. Por su parte la temperatura provocará variaciones en el índice de refracción por el efecto de expansión térmica del material. Estos dos factores ocasionan que la longitud de onda de Bragg sufra un desplazamiento determinado por la tensión y la temperatura que actúan sobre la rejilla [14]. En este caso la variación en la longitud de onda de Bragg  $\Delta\lambda_B$  puede ser expresada como: [14]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \rho_e)\Delta\varepsilon$$

Donde  $\Delta T$  es la variación de la temperatura,  $\Delta\varepsilon$  es la variación de la tensión,  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica de la fibra óptica,  $\xi$  es el coeficiente termo-óptico, y  $\rho_e$  es el coeficiente de fotoelasticidad y cuyos valores son específicos para el tipo de fibra óptica que se esté utilizando. Basándose en este razonamiento es posible determinar la variación de la tensión presente en la fibra óptica al monitorear las variaciones en el desplazamiento en la longitud de onda de Bragg. [14]

Finalmente es importante mencionar que si el parámetro de interés a monitorear únicamente es la tensión que actúa sobre la rejilla, y si la fuente de luz que se está utilizando en la aplicación esta sobre una banda conocida como por ejemplo la banda C (1527-1567nm), es recomendable escoger una longitud de onda de Bragg cercana al límite inferior de la banda para monitorear fuerzas en tensión y una longitud de onda de Bragg cercana al límite superior si las fuerzas a monitorear son de compresión. [21]

<sup>2</sup> Índice de refracción que experimenta un modo de propagación en razón a su velocidad de grupo

<sup>3</sup> Efecto en el que el tensor de impermeabilidad eléctrica está en función de la tensión ejercida sobre la rejilla [26]

### 1.2.2.2 Sensor intrínseco de Fabry-Perot

El sensor de fibra óptica intrínseco de Fabry-Perot es un tipo de sensor interferométrico que es implementado en el núcleo de la fibra óptica. Este sensor utiliza la diferencia de fase entre dos rayos de luz propagados a lo largo de una sección de fibra óptica monomodo para medir variaciones de tensión y temperatura. Su funcionamiento se describe en la figura 1.4, donde un rayo de luz de referencia es propagado a lo largo del núcleo de la fibra óptica que al toparse con un primer espejo semireflector o empalme semireflector, éste es reflejado parcialmente separándolo en un rayo reflejado y en un rayo transmitido. El rayo transmitido entra a la cavidad de sensado y recorre dos veces la longitud de la cavidad de sensado formada por el empalme semireflector y un espejo reflector al final de la cavidad ocasionándole una diferencia de fase respecto al rayo reflejado. La longitud de la cavidad de sensado varía con la tensión y la temperatura de modo que al variar la longitud de la cavidad de sensado la diferencia de fase entre el rayo reflejado y transmitido también cambia. [11]

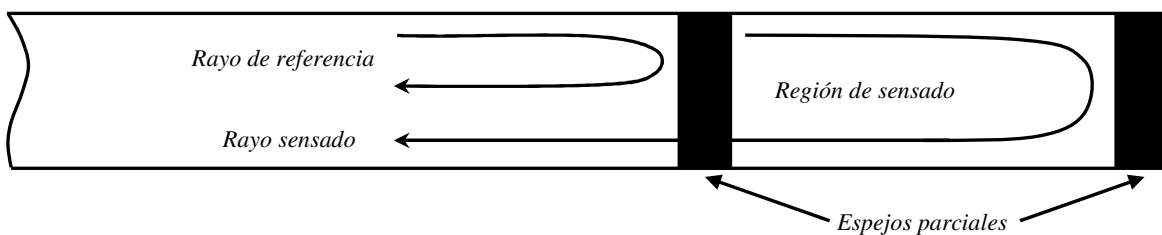


Figura 1.4. Principio de operación del sensor intrínseco de Fabry-Perot [22]

Al igual que el sensor basado en rejillas de Bragg, el sensor de Fabry-Perot es de tipo intrínseco ya que la zona de sensado se encuentra dentro de la misma fibra óptica. Además es extremadamente sensitivo tanto a las variaciones de tensión como de temperatura, y muchas veces el empalme semireflectivo es remplazado por una rejilla de Bragg para disminuir las pérdidas ocasionadas por éste. [11]

### 1.2.2.3 Sensor basado en la Dispersión de Brillouin

El sensor de Brillouin es un sensor de tensión distribuido cuya operación se basa en un efecto no lineal denominado dispersión de Brillouin de la luz, cuya frecuencia depende de la tensión longitudinal presente en la fibra óptica. Éste sensor puede ser dividido en dos tipos. El primer tipo consiste en un bombeo de luz pulsada lanzada en un extremo de la fibra óptica y otro pulso de

prueba lanzado desde el otro extremo de la fibra óptica en propagación contraria al primero. El pulso de prueba es amplificado por el bombeo de luz pulsada por el efecto de dispersión de Brillouin, permitiendo medir la tensión distribuida a lo largo de la fibra óptica a partir de un análisis en el dominio del tiempo del pulso de prueba. En el segundo tipo, un rayo de luz pulsado es lanzado hacia un extremo de la fibra óptica donde la retrodispersión de Brillouin de la luz causada por el rayo de luz pulsado es observada en ese mismo extremo, es decir, debido a la dispersión del rayo es posible determinar la posición de un punto de tensión en la fibra usando el intervalo de tiempo entre el lanzamiento del rayo de luz pulsado y la dispersión de Brillouin observada en ese punto. Para el primer tipo se tiene un sensor denominado Brillouin Optical Time Domain Analyzer (BOTDA) y Brillouin Optical Time Domain Reflectometer (BOTDR) para el segundo tipo. [23]

Básicamente el tipo más utilizado es el BOTDR, ya que solo requiere de una fuente de luz y acceso a un solo extremo de la fibra óptica a diferencia del BOTDA. Con estas características el BOTDR es un sensor utilizado en el área de ingeniería civil para el monitoreo y diagnóstico de estructuras de gran escala ya que es capaz de medir tensiones distribuidas a lo largo de la fibra óptica en distancias de hasta 10Km, sin embargo su costo es elevado debido al equipo que se requiere, por lo que su aplicación no está ampliamente esparcida en el área. [23]

### 1.2.3 Sensores de Fibra Óptica para la detección de grietas

Generalmente la degradación de las estructuras de concreto viene acompañada con la formación de grietas en los elementos de concreto. Aunque la presencia de grietas no representa un severo daño estructural, es importante conocer la evolución de éstas una vez que aparecen [27]. La temprana detección de grietas puede extender la vida útil de la estructura y disminuir los costos de mantenimiento de la misma, así como dar un panorama más completo de su integridad [28]. Actualmente existen sensores eléctricos enfocados al monitoreo y detección de grietas basado principalmente en potenciómetros, transformadores diferenciales de voltaje (LVDT) y corriente de Foucault<sup>4</sup>. Sin embargo, estos sensores presentan ciertas desventajas tales como ausencia de buena sensibilidad para mediciones en tiempos cortos, precio elevado y poca resolución respectivamente

---

<sup>4</sup> Corriente inducida en un conductor en presencia de un campo magnético que genera otro campo magnético opuesto al campo que la produce

[27]. En el caso de los sensores de fibra óptica la mayoría recaen en la utilización de técnicas interferométricas, sin embargo, estos resultan costosos al utilizar equipos como los interrogadores [29]. En esta sección se abordarán algunos de los sensores de fibra óptica utilizados para la detección y monitoreo de grietas. Los sensores mostrados están basados en medir las variaciones de la intensidad de luz transmitida de una fibra óptica a otra [29], pérdidas por microcurvaturas, técnicas de OTDR y variaciones en patrones de moteado.

### 1.2.3.1 Sensor basado en variaciones de la intensidad de la luz transmitida

Se trata de un sensor superficial del tipo de modulación de intensidad hecho con fibras ópticas de plástico basado en la variación de la potencia transmitida de una fibra óptica de plástico a otra. Como se sabe las fibras ópticas de plástico se caracterizan por tener un tamaño de diámetro grande y alta capacidad de recolectar la luz, lo que se traduce en bajos costos ya que se pueden utilizar fuentes de luz como los LED's. [29]

El sensor está compuesto de dos fibras ópticas de plástico de índice escalonado separadas una distancia  $d_0$  (determinada por el tamaño inicial de la grieta) y fijadas a los bordes de la grieta. De manera que el desplazamiento en los bordes de la grieta sea medida como una variación en la intensidad de la luz transmitida de una fibra óptica a otra, figura 1.5 a) [29]. La relación entre el desplazamiento y la intensidad de la señal recibida tiene un comportamiento no lineal que puede aproximarse a  $1/d^2$  para distancias de un par de milímetros, figura 1.5 b). [27]

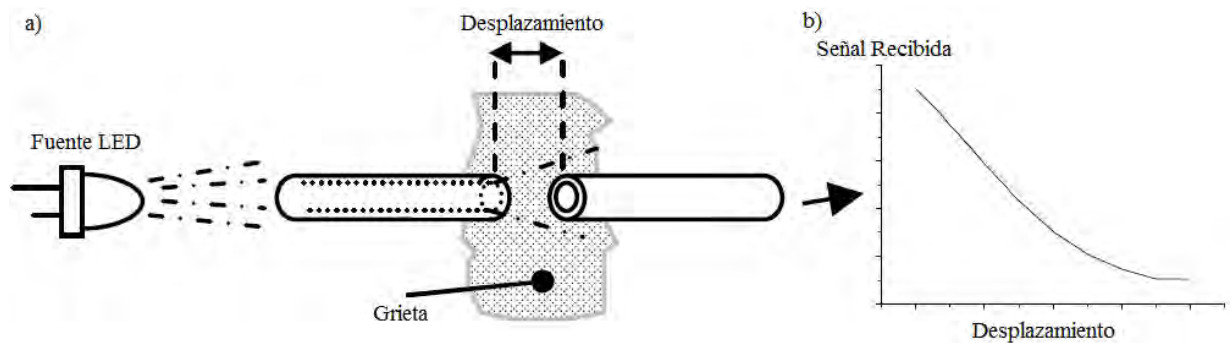


Figura 1.5. a) Principio de operación del sensor basado en variaciones de la intensidad de luz transmitida de una fibra óptica a otra. b) Relación entre la intensidad de la señal recibida y desplazamiento de la grieta [29]

La fibra óptica transmisora es alimentada por un LED estándar y la receptora es conectada a un fotodetector donde la corriente detectada es convertida a voltaje usando un amplificador de

transimpedancia [27]. Las fibras ópticas son del tipo de índice escalonado con un núcleo de PMMA (Polimetilmetacrilato) de diámetros de 250 a 980 $\mu\text{m}$  con un revestimiento de fluoropolímero y con una apertura numérica aproximada a AN=0.5. [27]

Básicamente el sensor es montado en la grieta de dos formas: con cinta adhesiva alineando las fibras cuidadosamente, figura 1.6 a) [29] y/o utilizando un tubo metálico cuya función es mantener alineadas las fibras ópticas protegiéndolas del polvo y la luz ambiental, figura 1.6 b). [27]

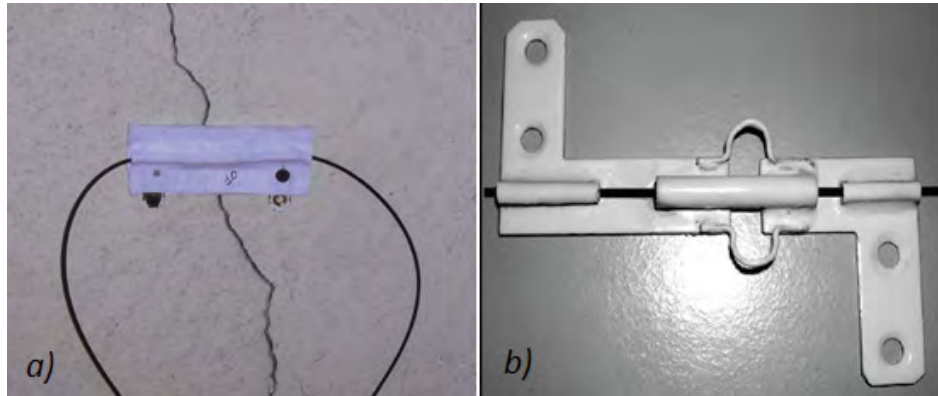


Figura 1.6. a) Sensor fijado con cinta tape [29]. b) Sensor fijado con un tubo metálico [27]

Resultados obtenidos con este tipo de sensor muestran que los movimientos de la grieta están relacionados con las variaciones de la temperatura, es decir, a mayor temperatura (día) la grieta tiende a cerrarse y a menor temperatura (noche) ésta tiende a abrirse, con una razón desplazamiento/temperatura de 60 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$  [29]. Para evitar esta alteración, se utiliza un sensor fijo e idéntico de referencia que no está sometido a ningún desplazamiento de la grieta, la idea es discriminar el efecto de la temperatura y obtener solo las variaciones provocadas por el desplazamiento de la grieta [30, 32]. Figura 1.7.

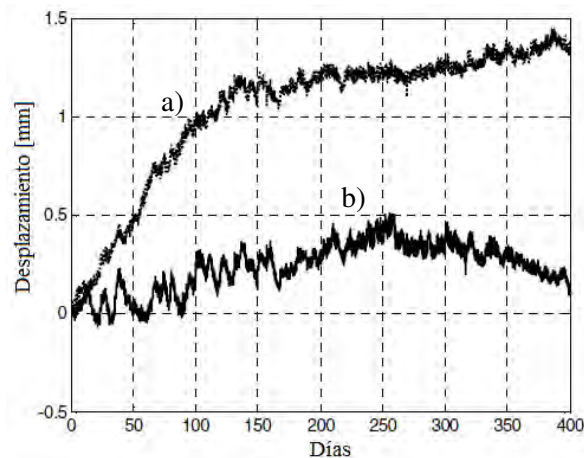


Figura 1.7. Resultados a) sin compensación de la temperatura y b) con compensación [29]

### 1.2.3.2 Sensor basado en pérdidas por microcurvaturas periódicas

Este sensor se basa en el fenómeno de pérdidas por microcurvaturas periódicas en una fibra óptica del tipo PCS600 (Plastic Clad Silica), núcleo de vidrio de 600 $\mu$ m de diámetro y revestimiento de plástico. La periodicidad de las microcurvaturas  $\Lambda$  es formada creando variaciones espaciales en la forma de la fibra óptica al integrarla en una muestra de material epóxico. Esto induce un acoplamiento entre los modos de la fibra óptica incluyendo algunos modos de radiación por lo que la potencia de la luz es acoplada entre los modos con constantes de propagación  $\beta_p$  y  $\beta_q$  satisfaciendo la siguiente expresión. [30]

$$\beta_p - \beta_q = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

Es decir, la potencia transmitida por la fibra óptica tendrá lugar del modo  $p_{th}$  al  $q_{th}$ . En presencia de presión algunos modos pasarán a ser modos de radiación debido al cambio en la amplitud de las microcurvaturas en la fibra óptica, por lo que la potencia de la señal en el núcleo estará en función del cambio de amplitud de las microcurvaturas [30]. Figura 1.8.

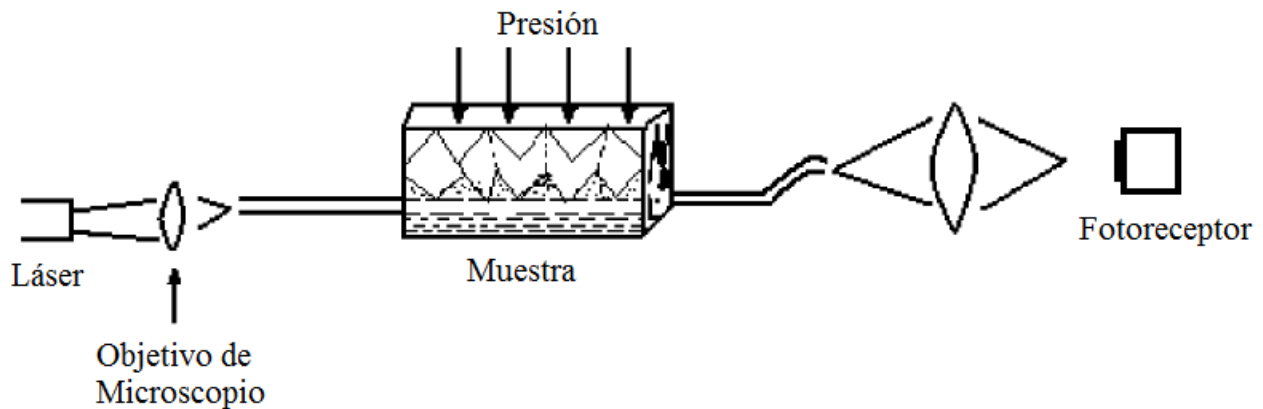


Figura 1.8. Esquema del sensor de fibra óptica de pérdidas por microcurvaturas periódicas [30]

El sistema consiste en un láser He-Ne seguido de una lente de microscopio de 10x, una muestra de araldita (adhesivo epóxico) y anilina (compuesto orgánico utilizado en muchas industrias para hacer químicos, antioxidantes, herbicidas, etc.) con una fibra óptica integrada con una periodicidad en las microcurvaturas de 5mm, otra lente y un fotodetector 88xLA de la empresa Photodine Inc. Algunos resultados obtenidos muestran que la potencia de salida aumenta al disminuir la presión sobre la muestra y viceversa, mostrando una relación lineal entre la presión aplicada y la potencia de salida [30]. Figura 1.9.

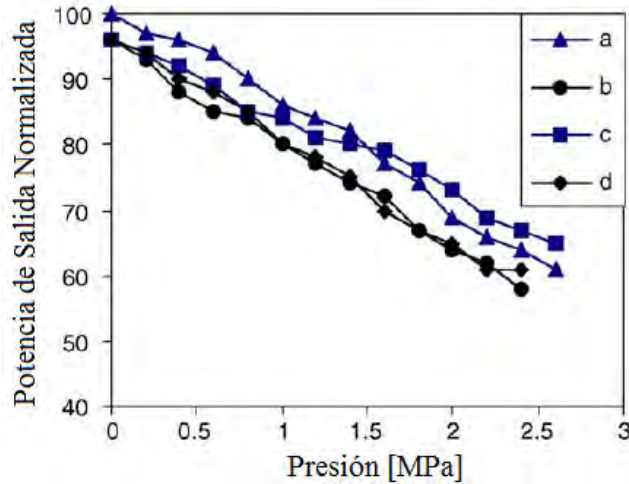


Figura 1.9. Respuesta del sensor entre la presión aplicada a la muestra y la potencia de salida normalizada [30]

### 1.2.3.3 Sensor basado en equipo OTDR

Consiste en un sensor de fibra óptica distribuido para la detección de grietas mediante mediciones de las pérdidas ocasionadas por dobleces resultado de la aparición de una grieta utilizando la técnica de OTDR. La fibra óptica es integrada y colocada en forma de zigzag en el fondo de una viga de concreto de 150mm x 200mm x 200mm de manera que se encuentre inclinada a las grietas que aparezcan. Figura 1.10 a). [28]

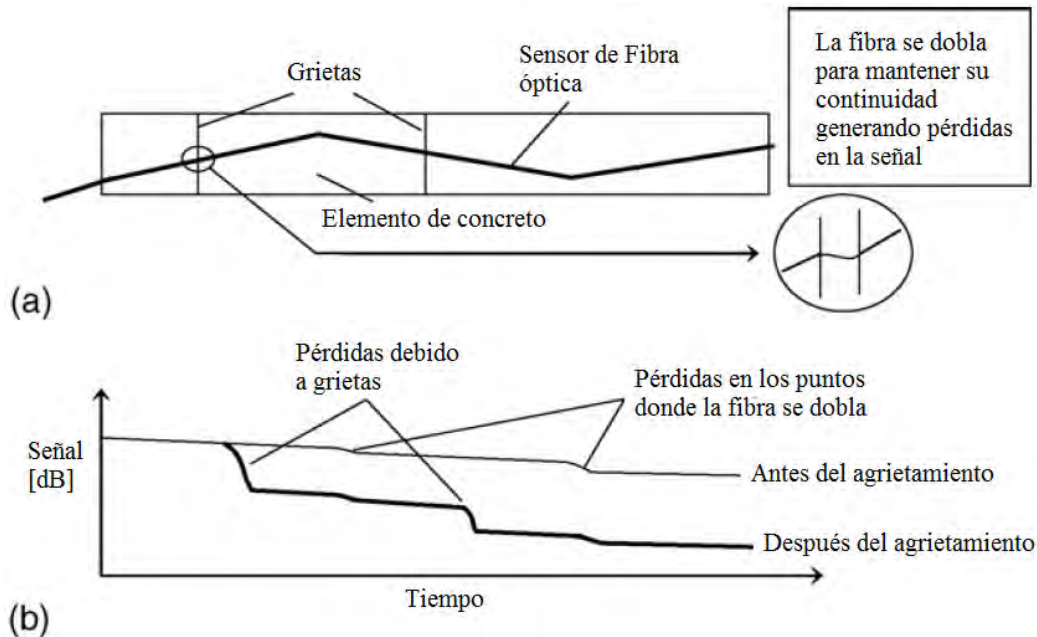


Figura 1.10. a) Esquema de la configuración del sensor y el fenómeno de doblez producido por una grieta. b) Análisis de la señal en el dominio del tiempo con el OTDR [28]

Una vez que se presente una grieta, ésta se abre provocando que la fibra óptica se doble y se induzcan pérdidas en la potencia de la señal debido a que parte de ésta sale del núcleo hacia el revestimiento, figura 1.10 a). Como resultado, la potencia de la señal transmitida presenta una caída debido a la grieta. Utilizando el OTDR es posible determinar la posición de la grieta y su abertura mediante la magnitud en la caída de potencia de la señal. En la figura 1.10 b) se tiene que antes de que la grieta aparezca, hay una caída gradual de la señal retrodispersada detectada por el OTDR ocasionada por la atenuación misma de la fibra óptica, además de unos puntos correspondientes a los dobleces que le dan la forma de zigzag a la fibra. En el momento que aparece una grieta se presenta una caída clara de la potencia de la señal detectada por el OTDR, figura 1.10 b). [28]

Con el fin de proteger a la fibra óptica de las condiciones de fabricación de la viga y el medio alcalino del concreto, la fibra óptica es integrada en forma de zigzag dentro de una placa de polyester de 1mm de espesor, que posteriormente es colocada en el fondo de la viga de concreto y que de acuerdo a la experiencia de las pruebas dicha placa se rompe cuando la abertura de la grieta en el concreto es de aproximadamente 0.08–0.1mm. En los extremos de la fibra se colocan unos tubos metálicos a manera de protección en estos puntos. [28]

Debido a que el sensor de fibra óptica es colocado a una cierta altura del fondo de la viga, la prueba que se tiene es de tensión. Para evitar que la viga de concreto se quiebre rápidamente, se colocan 2 varillas de 6mm de diámetro a la misma altura que la fibra óptica. La figura 1.11 muestra la configuración del experimento. [28]

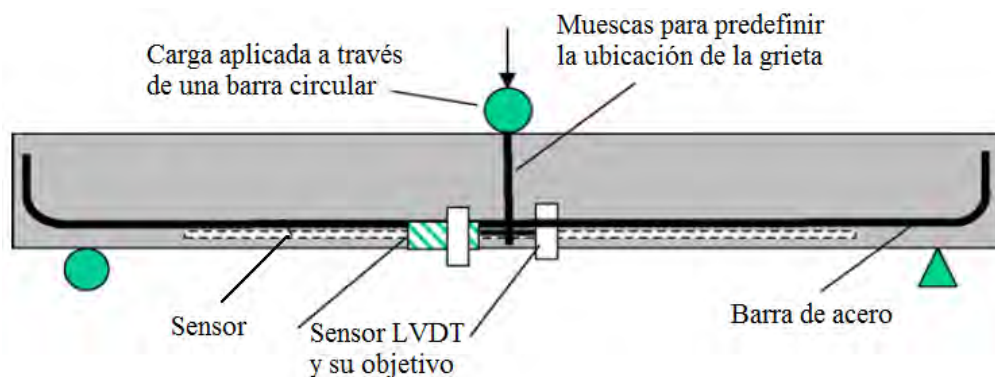


Figura 1.11. Configuración de la prueba de tensión en la viga de concreto con la fibra óptica integrada en forma de zigzag en el fondo de la viga [28]



Con el fin de prever la localización de la grieta, un par de muescas fueron hechas en el centro de la viga con el fin de inducir la formación de grietas en esa área, además se colocó un LVDT para medir la abertura de la grieta y comparar resultados. Utilizando una fibra SMF-28 a 1550nm, algunos resultados se muestran en la figura 1.12. [28]

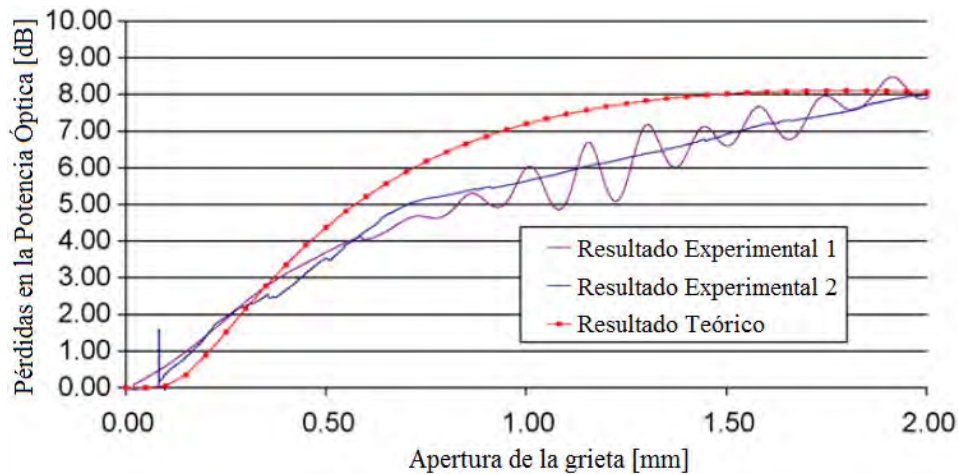


Figura 1.12. Relación entre la abertura de la grieta y las pérdidas en la potencia de la señal en la prueba de flexión en la viga de concreto [28]

Los resultados muestran que para aberturas pequeñas de la grieta, las pérdidas crecen lentamente, pero después de un cierto punto éstas se incrementan en una proporción mayor. Sin embargo para aberturas mayores de la grieta las pérdidas vuelven a tener un crecimiento lento y pareciera que se aproximan a un valor asintótico. Este límite superior se atribuye a la presencia de grietas de gran magnitud que simplemente la fibra ya no logra soportar. Por otro lado, las oscilaciones en la respuesta se creen debidas al efecto de deslizamiento de la fibra óptica causado por la fricción en el revestimiento de la fibra óptica y el concreto. [28]

#### 1.2.3.4 Sensor basado en variaciones en patrones de moteado

Este sensor consiste en determinar el desplazamiento en la abertura de grietas mediante un sensor de fibra óptica integrada en estructuras de concreto. El mecanismo se basa en la correlación entre la tensión aplicada a la fibra óptica y la variación en la intensidad de la luz de los patrones de moteado generados en una fibra óptica multimodo debido a la redistribución de los modos.

Como se sabe la propagación de la luz en la fibra óptica está gobernada por la propagación de los modos que viajan dentro del núcleo de la fibra óptica. Para el caso de fibras monomodo cuyos diámetros de núcleo están entre 5 y  $9\mu\text{m}$ , la propagación de la luz se lleva a cabo a través del primer modo, figura 1.13 a), mientras que en las fibras ópticas multimodo, la propagación de la luz se reparte en múltiples modos de propagación debido a que el diámetro del núcleo es mayor que en las fibras ópticas monomodo. Figura 1.13 b). [31]

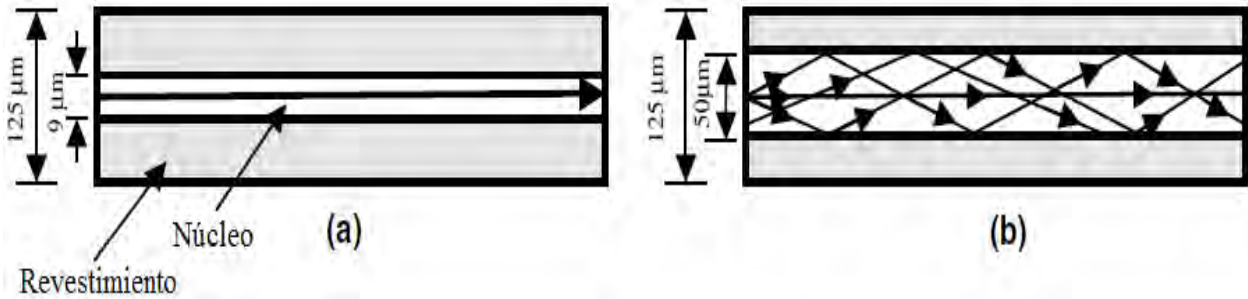


Figura 1.13. Propagación de los modos dentro de una a) fibra monomodo y b) fibra multimodo [31]

El efecto de los múltiples modos de propagación en la intensidad de la luz se ve reflejado en la formación de los patrones de moteado al final de la fibra óptica. La presencia de tensiones o deformaciones sobre la fibra perturba la propagación de los modos y por consecuencia la forma del patrón de moteado, ocasionando una redistribución de los modos y un cambio general en la intensidad de la señal, figura 1.14. Esta característica puede ser utilizada para construir un sensor, siempre y cuando el patrón de moteado varíe linealmente con la tensión sobre la fibra. [31]

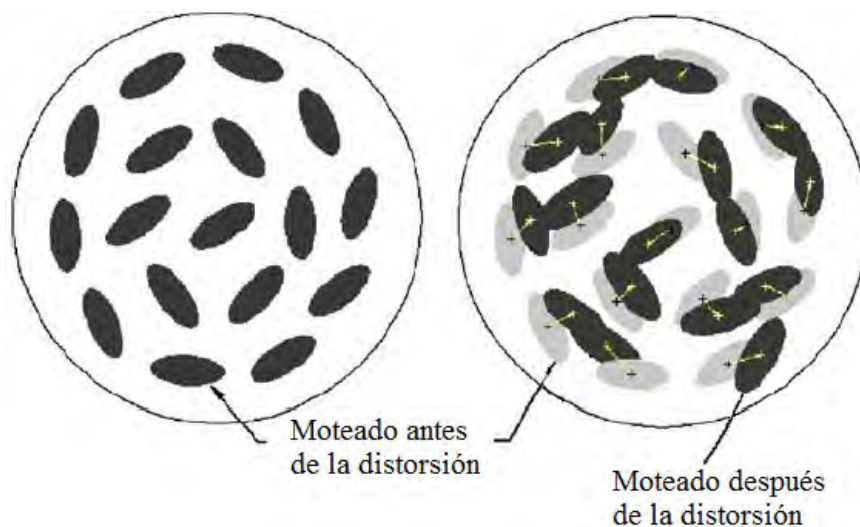


Figura 1.14. Representación esquemática de la redistribución de los modos en la fibra óptica debido a tensiones y/o deformaciones sobre la fibra [31]

La variación en la propagación de los modos dentro de los patrones de moteado se encuentra descrita por lo que se denomina como variaciones normalizadas de la intensidad del moteado (SIV normalized speckle intensity variations  $\psi_n$ ).

Debido a que el objetivo es lograr un cambio en la distribución de los modos en la fibra óptica a causa de una tensión aplicada sobre ésta, es necesario eliminar la redistribución que se dé en otra parte de la fibra óptica que no sea la que está expuesta directamente a la grieta. Para lograr esto se utiliza una fibra óptica monomodo para transmitir la luz y alimentar a la fibra óptica multimodo de 25mm de largo correspondientes a la región donde se quiere sensar. El arreglo del sistema se muestra en la figura 1.15.

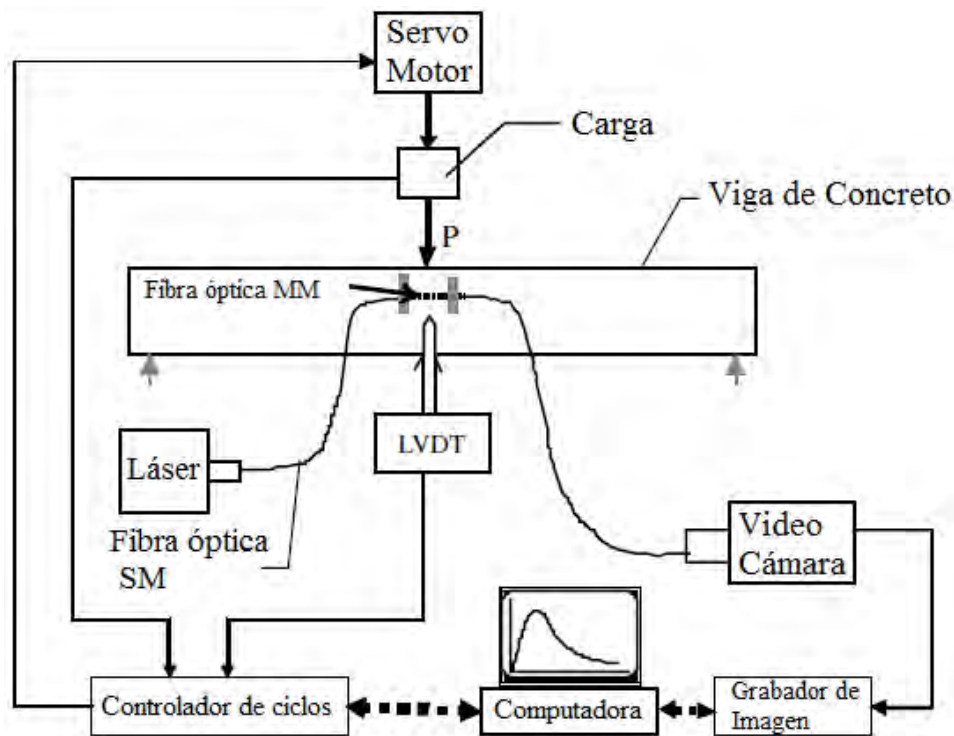


Figura 1.15. Componentes de la prueba realizada a la viga de concreto con el sensor integrado de fibra óptica basado en variaciones del patrón de moteado [31]

El sistema consiste en un láser He-Ne de  $\lambda = 630nm$ , una viga de concreto de 100mm x 100mm x 860mm, una cámara de video digital y posteriormente una sección de procesamiento de la imagen del patrón de moteado. Los resultados muestran que el sensor es altamente sensible al desplazamiento en el orden de micrómetros y su aplicación puede ser extendida al montar un sistema de multiplexación que involucre más fibras y por lo tanto monitorear más zonas en la viga de concreto.

[31]

### **1.2.4 Sensores de Fibra Óptica en otras estructuras**

Debido a las ventajas que ofrecen los sensores de fibra óptica, su uso ha sido extendido a estructuras diferentes a las construidas con concreto. Actualmente existen distintas aplicaciones en áreas como en el monitoreo de barcos, integración de sensores de fibra óptica en textiles para supervisión médica, automotriz, etc. En esta sección se darán algunos ejemplos actuales referentes a estas áreas.

Basándose en la técnica de BOTDR la empresa International America's Cup Class construye yates con un material plástico reforzado de fibra de carbono y aluminio lo cual les provee de altos niveles de rigidez y fortaleza minimizando su peso. Sin embargo estos materiales tienden a sufrir dobleces debido al deterioro común del yate lo que ocasiona que se presenten daños en él. Debido a la forma en la que se fija el mástil por medio de cables con la proa y la popa, la tensión entre estos cables hace que el momento de flexión y la carga alcance un máximo en la región aleadaña al mástil. Para monitorear esto, la empresa colocó un sistema basado en fibras ópticas simples instaladas de manera transversal en el casco del yate. Se observó que en algunas zonas específicas del yate se tienen fuerzas de compresión y en otras zonas fuerzas de tensión debido a los momentos producidos por los cables. Este sistema hizo posible también el monitoreo del yate en movimiento determinándose que el yate no sufría de daños importantes en su estructura ocasionados por el movimiento. [24]

En el área médica los sensores de fibra óptica han sido integrados en textiles especiales para la continua supervisión de pacientes anestesiados durante la realización de la prueba de resonancia magnética. Los parámetros a monitorear por el sensor son los movimientos de la respiración, para lo cual el sensor se basa en dos configuraciones: un sensor de macrocurvaturas y otro con rejillas de Bragg, los cuales están diseñados para medir la elongación de la circunferencia torácica y abdominal durante la respiración. Las ventajas que se tienen con estos sensores son que la fibra óptica no representa ninguna alteración a la prueba de resonancia magnética al ser un dieléctrico y además ésta puede ser manejada de manera sencilla por la industria textil para su integración en ropa debido a que puede ser manejada como un hilo más. A pesar de que este método no ha sido aplicado extensamente en pacientes, se prevé que en un futuro la fabricación de ropa incluya sensores de fibra óptica que puedan monitorear parámetros cardiovasculares, respiratorios, oximétricos, entre otros. [25]

### 1.3 Discusión de los métodos existentes

En las secciones anteriores se enunciaron de manera general distintos sensores actuales para el monitoreo de tensiones y la detección de grietas con base en la fibra óptica. Primordialmente éstos sensores se basan en técnicas interferométricas (Fabry-Perot), reflectométricas (OTDR), variaciones de la intensidad de la luz, variaciones en los patrones de moteado y rejillas de Bragg. De acuerdo a su aplicación, configuración, características y costo, cada uno de los sensores presenta ciertas ventajas y desventajas respecto a los demás. En esta sección se hará una comparación de los distintos métodos presentados y se resaltarán algunas de sus características principales.

#### 1.3.1 Comparación de los métodos existentes

La tabla 1.1 muestra una comparación los sensores expuestos en las secciones anteriores.

Tabla 1.1. Comparación de los sensores de fibra óptica para el monitoreo de tensión y detección de grietas

Sensor	Parámetro que sensa	Fenómeno físico producido	Fenómeno físico que permite el sensado	Tipo de sensado	Manipulación características físicas de la FO	Costo
<b>Rejillas de Bragg</b>	Tensión y Temperatura	Elongación física de la rejilla, variaciones del índice de refracción	Reflexión de una banda estrecha ( $\lambda_B$ )	Puntual y/o Cuasi-distribuido	Modulación del índice de refracción del núcleo	Alto
<b>Fabry-Perot</b>	Tensión y Temperatura	Variación en la longitud de la cavidad de sensado	Diferencia de fase entre dos rayos de luz	Cuasi-distribuido	Formación de la cavidad de sensado	Medio
<b>Brillouin</b>	Tensión y Temperatura	Dispersión de Brillouin	Amplificación del pulso de prueba	Distribuido	No	Alto
<b>Intensidad de la luz</b>	Desplazamiento	Separación o acercamiento entre las caras de las fibras	Variaciones en la intensidad de luz transmitida	Puntual	No	Bajo
<b>Micro-curvaturas</b>	Tensión y/o Presión	Cambio en la amplitud de las microcurvaturas, radiación de la luz	Pérdidas en la potencia de la luz transmitida	Cuasi-distribuido	Formación de las microcurvaturas	Bajo
<b>Reflectométrico</b>	Abertura de la grieta	Dobles, fracturas, radiación de la luz	Pérdidas en la potencia de la luz	Distribuido	No	Alto
<b>Patrones de moteado</b>	Desplazamiento	Redistribución de los modos debido a la tensión	Variaciones en los patrones de moteado	Cuasi-distribuido	No	Medio

De la tabla 1.1 se puede observar que los sensores expuestos presentan distintas características que los hacen adecuados para ciertas aplicaciones. Por ejemplo para aplicaciones en estructuras de gran tamaño, como puentes y edificios, es preferible utilizar un sensor distribuido como el Brillouin u OTDR. Mientras que para aplicaciones más concretas como el monitoreo de una grieta, los sensores de variaciones de intensidad de la luz transmitida resultan ser la mejor opción tanto en simplicidad como en costo. Cabe resaltar también, que el costo depende principalmente del equipo que utilicen los sensores para llevar a cabo el sensado, es decir, los sensores considerados con un costo alto (rejillas de Bragg, Brillouin y Reflectométrico), son aquellos que utilizan equipos como acopladores ópticos, analizadores de espectro óptico y OTDR's. Mientras que los de bajo costo, utilizan fibras ópticas de plástico, LED's como fuentes de luz y circuitos de adquisición de datos más simples.

### **1.3.2 Identificación de problemas y limitantes**

A pesar de que hoy en día se han desarrollado múltiples técnicas basadas en sensores de fibra óptica para el monitoreo de tensiones y detección de grietas en estructuras de concreto, todavía existen ciertas limitantes que restringen su amplia aplicación.

Uno de los principales limitantes es el costo de los equipos que se utilizan en los sistemas de monitoreo. Los acopladores ópticos, analizadores de espectro óptico y OTDR's principalmente, representan una fuerte inversión si se quiere implementar un sistema de monitoreo distribuido o cuasi-distribuido.

Otro factor es la implementación en el campo. Muchas de las técnicas expuestas en las secciones anteriores han sido implementadas exitosamente bajo condiciones de laboratorio más no en condiciones de campo. Las dificultades de instalación, protección y ubicación de las fibras ópticas y los equipos de medición pueden resultar ser muy adversas de acuerdo a la aplicación que se requiera.

El factor temperatura. Como se mencionó en temas anteriores, la temperatura es el principal factor que afecta las mediciones de los sensores de fibra óptica debido al efecto que tiene sobre ellos. Si bien se han desarrollado métodos para discriminar dichos efectos indeseables, éstos representan incrementar el sistema de sensado y por lo tanto el costo. [29]

El número de sensores o fibras ópticas. En muchas aplicaciones es necesario implementar más de un sensor o fibra óptica para lograr resultados más precisos. La utilización de un gran número de fibras ópticas representa tener equipos de adquisición de datos más complejos y de multiplexación.

La protección de la fibra óptica. Dependiendo de la aplicación y el medio en el que estará la o las fibras ópticas, el sistema de protección puede resultar complicado en su fabricación o simplemente no sea necesario implementar alguno. Básicamente el diseñar un sistema de protección específico para cada situación limita que un mismo sistema de protección pueda funcionar para distintas circunstancias.

## 1.4 Conclusiones

1. La literatura muestra un gran número de investigaciones a cerca de sensores de fibra óptica basados principalmente en rejillas de Bragg y cavidades intrínsecas de Fabry-Perot. Sin embargo el uso de la fibra óptica simple como sensor no ha sido ampliamente estudiado.
2. Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo de tensiones en estructuras están basados principalmente en rejillas de Bragg, cavidad de Fabry-Perot y equipo OTDR. En su mayoría, estos sensores son costosos debido a que utilizan dispositivos como los acopladores ópticos, y equipo de medición como analizadores de espectro óptico y OTDR's.
3. Los sensores de fibra óptica enfocados al monitoreo y/o detección de grietas utilizan a la fibra óptica simple como sensor. Éstos se basan principalmente en variaciones de la potencia transmitida y en técnicas de OTDR.
4. Las variaciones en la potencia de la luz por la fibra óptica es un fenómeno utilizado por algunos sensores de fibra óptica para monitorear la apertura de grietas existentes y/o para el monitoreo de presiones. Con base en el análisis realizado a estos sensores es posible estudiar la viabilidad de utilizar a la fibra óptica como sensor en elementos de concreto para la detección de grietas.

## 1.5 Referencias

- [1] Wayne Tomásí, *Sistemás de Comunicaciones Electrónicas*, 4ª edición, Pearson Prentice Hall, México 2003.
- [2] *Sistemás de Comunicaciones Ópticas. Prácticas de Laboratorio Parte I. Practica 3 Medición del Diámetro de una Fibra Óptica*, Facultad de Ingeniería UNAM.
- [3] Chai Yeh, *Handbook of Fiber Optics Theory and Applications*, 1ª edición, Academic Press, United Kingdom, 1989.
- [4] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1ª edición, John Wiley & Sons, Estados Unidos 1992.
- [5] Henry y Cynthia Zanger, *Fiber Optics Communication and Other Applications*, 1a edición, Macmillan Publishing Company, Estados Unidos, 1991.
- [6] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Medición de la Sociedad de la Información 2010*, Place des Nations CH-1211 Ginebra, Suiza.
- [7] Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL), *Estadísticas e Información de Mercados, Comparativo Internacional de Densidad de Usuarios de Telefonía Móvil 2008*, <[http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel\\_2008/comparativo\\_internacional\\_de\\_densidad\\_de\\_telefonia](http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel_2008/comparativo_internacional_de_densidad_de_telefonia)>
- [8] Comisión Federal de Telecomunicaciones (COFETEL), *Estadísticas e Información de Mercados, Comparativo Internacional de Penetración de Suscriptores de Internet de Banda Ancha 2007*, <[http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel\\_2008/comparativo\\_internacional\\_de\\_penetracion\\_de\\_susc07](http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel_2008/comparativo_internacional_de_penetracion_de_susc07)>
- [9] Unión Internacional de Telecomunicaciones, *Perfiles Estadísticos de la Sociedad de la Información 2009 Región de América*, Place des Nations CH-1211 Ginebra, Suiza.
- [10] Udd E., *Fiber optic smart structures*, *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, August 2002.
- [11] Uttamchandani D., *Fibre-optic sensors and smart structures: Developments and prospects*, *Electronics and Communication Engineering Journal*, vol. 6, October 1994.
- [12] Rivera, E., Thomson, D.J., Polyzois, D., *Structural health monitoring of composite poles using fiber optic sensors*, *Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference On Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, 2002.
- [13] Fan, Y., Kahrizi, M., *Applicability of an optimized fiber optic smart structure*, *Proceedings 2004 International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems, ICMENS 2004*.
- [14] Kister, G., Winter, D., Gebremichael, Y.M., Leighton, J., Badcock, R.A., Tester, P.D., Krishnamurthy, S., Fernando, G.F., *Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors*, *Engineering Structures*, 2007.
- [15] Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., Sridhar, S., *Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete*, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2010.
- [16] Leng, J.S., Barnes, R.A., Hameed, A., Winter, D., Tetlow, J., Mays, G.C., Fernando, G.F., *Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors*, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2006.
- [17] Kung-Li Deng, *Next generation fiber optic sensing and its applications*, 14<sup>th</sup> Annual Wireless and Optical Communications Conference, USA April 2005.
- [18] Silva, A.F., Goncalves, F., Ferreira, L.A., Araujo, F.M., Dias, N.S., Carmo, J.P., Mendes, P.M., Correia, J.H., *Manufacturing technology for flexible optical sensing foils*, 35<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2009.
- [19] Liu, K., *Development of commercial fibre optic strain sensors*, *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada May, 1997.
- [20] Yung Bin Lin, Kuo Chun Chang, Jenn Chuan Chern, Wang, L.A., *Packaging methods of fiber-Bragg grating sensors in civil structures applications*, *Sensors Journal, IEEE*, vol. 5, 2005.



- [21] De Baere, I., Luyckx, G., Voet, E., Van Paepegem, W., Degrieck, J., On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions, *Optics and Lasers in Engineering*, 2009.
- [22] Dorigi, J.F., Krishnaswamy, S., Achenbach, J.D., Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 42, September 1995.
- [23] Ohno, H., Naruse, H., Kihara, M., Shimada, A., Industrial Applications of the BOTDR Optical Fiber Strain Sensor, *Optical Fiber Technology*, 2001.
- [24] Naruse, H., Applications of distributed fiber strain sensing for smart structures The 4th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001.
- [25] De jonckheere, J., Narbonneau, F., Kinet, D., Zinke, J., Paquet, B., Depre, A., Jeanne, M., Logier, R., Optical fibre sensors embedded into technical textile for a continuous monitoring of patients under Magnetic Resonance Imaging 30th Annual International Conference of Engineering in Medicine and Biology Society, 2008.
- [26] Bahaa E., Malvin Carl, *Fundamentals of Photonics*, 1ª edición, John Wiley & Sons, 1991.
- [27] Casalicchio, M.L., Penna, A., Perrone, G., Vallan, A., Optical fiber sensors for long-and short-term crack monitoring, *Proceedings 2009 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2009*, pp. 87-92.
- [28] Wan, K.T., Leung, C.K.Y., Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, *Sensors and Actuators*, 2007.
- [29] Perrone, G., Olivero, M., Vallan, A., Carullo, A., Neri, A., Long term in-situ test of a low-cost fiber-based crack monitoring system, *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 325-328, 2008.
- [30] Pandey, N.K., Yadav, B.C., Embedded fibre optic microbend sensor for measurement of high pressure and crack detection, *Sensors and Actuators, A: Physical* 128 (1), pp. 33-36, 2006.
- [31] Zhang, Z., Ansari, F., Crack tip opening displacement in micro-cracked concrete by an embedded optical fiber sensor, *Engineering Fracture Mechanics* 72 (16), pp. 2505-2518, 2005.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos del método propuesto y del comportamiento del concreto sujeto a flexión simple

---

### 2.1 Razones del método propuesto

En el capítulo 1 se expusieron distintos métodos actuales para el monitoreo y detección de grietas en elementos de concreto. En este capítulo se expondrán las bases teóricas de un nuevo método experimental para el monitoreo y la posible detección de grietas en elementos de concreto.

De manera general el método propuesto se basa en las siguientes razones:

1. Los métodos actuales resultan costosos y complejos ya que requieren de equipo sofisticado de medición y un manejo más especializado en la manipulación de las características físicas de la fibra óptica respectivamente. [1-4]
2. Los métodos enfocados a la detección y monitoreo de grietas utilizan equipo OTDR para su detección y ubicación, lo que resulta en un alto costo. [5]
3. La mayoría de los sensores comerciales realizan el monitoreo en la superficie de los elementos de concreto más no en el interior de éstos. [6-7]
4. Los sistemas de protección para integrar las fibras ópticas en los elementos de concreto suelen requerir materiales y formas especiales para su fabricación. [8-10]

Debido a esto se propone un método experimental simple y de bajo costo que pretende predecir la aparición de grietas en los elementos de concreto mediante la integración de fibras ópticas simples en dichos elementos, con base en el monitoreo tanto de las pérdidas propias de la fibra óptica, como aquellas pérdidas excesivas generadas por daños o modificaciones en su estructura.

## **2.2 Fundamentos de la propuesta y del principio de operación.**

### **Pérdidas en la fibra óptica por diversos factores**

Se define como pérdida o atenuación de la fibra óptica a la relación entre las potencias luminosas a la salida y a la entrada de la fibra óptica, expresada en decibeles. Cuya relación está en función de la longitud de onda de la luz transmitida.

$$A[dB] = -10 \log \frac{P_{sal}}{P_{ent}}$$

Las pérdidas en la fibra óptica son generadas básicamente por fenómenos de absorción, esparcimiento y pérdidas por radiación de la energía óptica. La absorción está relacionada a la composición intrínseca del material con la que está fabricada la fibra óptica, el esparcimiento está asociado tanto al material como a imperfecciones estructurales de la fibra óptica y las pérdidas por efectos de radiación se originan por perturbaciones microscópicas y macroscópicas en la geometría de la fibra óptica. [11]

#### **2.2.1 Absorción**

Las pérdidas por absorción en la fibra óptica son causadas por tres fenómenos diferentes, la absorción por defectos en la estructura atómica del material, la absorción extrínseca por impurezas y la absorción intrínseca en los constituyentes básicos de los átomos.

Los defectos en la estructura atómica se refieren a imperfecciones a nivel atómico en la composición del material, tales como ausencia de moléculas, alta densidad debido a la aglomeración de átomos, etc., cuyas pérdidas por absorción son insignificantes a menos que la fibra óptica este expuesta a altos niveles de radiación como la nuclear. [11]

Por su parte la presencia de impurezas en el material, resulta en la absorción de la energía fotónica debido a la transición metal-impurezas presentes como hierro, cromo, cobalto, cobre, níquel que absorben en la banda de 0.6 a 1.6 $\mu\text{m}$ . Estas pérdidas pueden ser reducidas con un adecuado proceso de fabricación de las fibras y actualmente son insignificantes. Sin embargo, la principal causa de pérdidas en la fibra óptica a nivel molecular, es la presencia de iones de OH, cuyo efecto se hace presente en ciertas bandas de longitud de onda. La presencia de picos y valles debido a los iones OH en la curva de atenuación de la fibra óptica, ha determinado lo que se conoce como ventanas de transmisión donde se evitan estos efectos. En la actualidad se cuenta con fibras ópticas de baja concentración de iones OH, permitiendo minimizar estos picos de atenuación. [11]

Finalmente la absorción intrínseca resulta de las bandas de absorción electrónica en la región ultravioleta del espectro electromagnético y en las bandas de vibración de los átomos en la región del infrarrojo cercano. Esta pérdida se genera principalmente cuando un fotón interactúa con un electrón en la banda de valencia excitándolo a un nivel superior de energía, cediendo energía del fotón al electrón. [11]

### **2.2.2 Pérdidas por esparcimiento de la luz**

El esparcimiento de la luz es un fenómeno generado por partículas u obstrucciones extrañas al medio continuo, que al interactuar con la luz provocan la difracción de la luz en muchas direcciones. El término partículas se refiere a variaciones en la densidad del material que conllevan a cambios en el índice de refracción [12]. Cuando estas partículas tienen un diámetro menor a la longitud de onda de la luz transmitida, se produce el fenómeno de esparcimiento de Rayleigh cuya difracción resultante de la luz produce una pérdida en la energía que decrece exponencialmente con la cuarta potencia de la longitud de onda de trabajo: [13]

$$A = \frac{k}{\lambda^4}$$

Así mismo, existen partículas con un diámetro mayor a la longitud de onda de la luz, consideradas como no homogeneidades y/o defectos estructurales del material de la fibra óptica, presentes en forma de burbujas y concentraciones cristalinas del material que ocasionan también el esparcimiento

de la luz. Estos efectos pueden ser minimizados con un adecuado proceso de fabricación a tal punto en que el esparcimiento resultante comparado con el de Rayleigh es insignificante. [11]

De manera general las pérdidas en la fibra óptica multimodo son mayores que en la fibra monomodo. Esto se debe a una mayor concentración de dopantes en el material de la fibra multimodo en comparación con la fibra monomodo, generando mayores fluctuaciones en la composición de los materiales y por lo tanto incrementando las pérdidas por esparcimiento. Además de eso, las fibras multimodo están sujetas a pérdidas por efecto de modos de alto orden a causa de perturbaciones en la interfaz núcleo-revestimiento, lo cual se abordará en el siguiente tema. [11]

### **2.2.3 Pérdidas por efectos de radiación**

Las pérdidas por efecto de radiación se producen cuando la fibra óptica es sometida a algún tipo de curvatura durante el tendido o manejo de la misma. La atenuación generada es resultado de las variaciones geométricas en ciertos puntos de la interfaz núcleo-revestimiento donde la luz se refleja con un ángulo menor al ángulo crítico generando pérdidas por radiación. [13]

Básicamente la fibra óptica puede ser sometida a dos tipos de curvaturas: macrocurvaturas y microcurvaturas. Las macrocurvaturas se presentan cuando el radio de curvatura es mayor al diámetro de la fibra óptica, no obstante que estas pérdidas varían exponencialmente con el radio de curvatura, éstas son diminutas hasta que se sobrepasa una curvatura crítica. [13]

De acuerdo con la teoría de modos, cualquier modo esencial presenta un campo evanescente en el revestimiento que decae exponencialmente como función de la distancia al núcleo  $x$ , figura 2.1. Dado que este campo se propaga junto con el campo del núcleo, existe cierta propagación en el revestimiento de la fibra óptica. Cuando la fibra óptica es doblada, el campo más alejado al centro de curvatura debe propagarse más rápido para continuar su propagación junto con el campo del núcleo. Sin embargo para una distancia crítica  $x_c$  el campo en el revestimiento debe viajar a una velocidad mayor a la de la luz, lo cual no es posible y por consecuencia empieza a ser radiado, ocasionando que esa energía se pierda. [11]

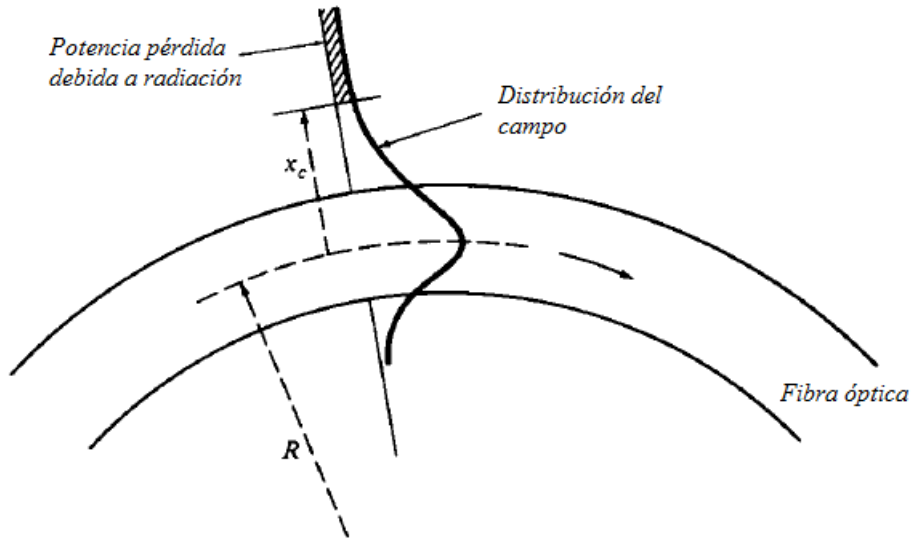


Figura 2.1. Esquema de la distribución de campo del modo fundamental cuando la fibra es doblada [14]

Analizando este fenómeno desde el punto de vista de la óptica geométrica, hay que recordar que para que un rayo de luz sea propagado por el núcleo de la fibra óptica, éste debe de cumplir el principio de Reflexión Total Interna. De acuerdo con la figura 2.2, todos los rayos que incidan en la interfaz aire-núcleo (A) con un ángulo de incidencia  $\theta_i$  menor o igual al ángulo  $\theta_a$  serán propagados en el núcleo por el principio de Reflexión Total Interna. En cambio, cualquier rayo que incida con un ángulo mayor a  $\theta_a$  entrará al núcleo de la fibra óptica y será posteriormente refractado en un punto (B) de la interfaz núcleo-revestimiento hacia el exterior del núcleo, debido a que en ese punto el rayo incide con un ángulo  $\alpha_i$  menor al ángulo crítico  $\alpha_c$ . [11] [14]

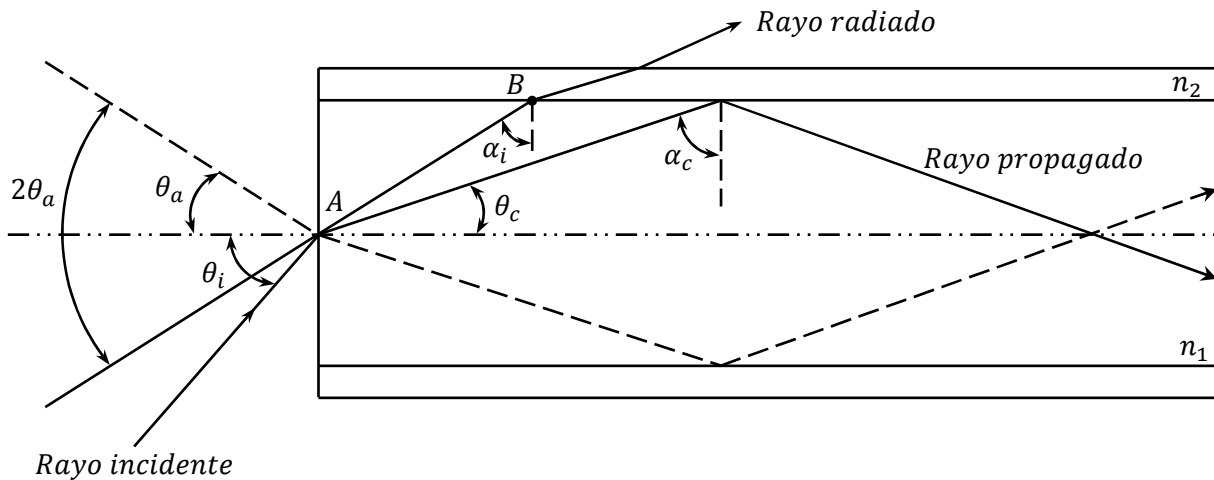


Figura 2.2. Esquema de la propagación de la luz de acuerdo a la óptica geométrica [12]

Entonces, cualquier rayo que incida en la interfaz núcleo-revestimiento con un ángulo mayor o igual a  $\alpha_c$  será confinado y propagado por el núcleo. Cada rayo que cumpla esta condición

corresponderá a un modo de propagación en el núcleo de la fibra óptica, donde el número total de modos de propagación en la fibra óptica varía en función del ángulo crítico  $\alpha_c$ , cuanto menor sea el valor del ángulo crítico  $\alpha_c$ , mayor es el número de modos de propagación. [11] [14]

De acuerdo a las características de la fuente de luz, la luz puede propagarse en el núcleo de la fibra óptica en modos de alto orden, modos de bajo orden o una mezcla particular de modos. Los modos de alto orden son aquellos cuyos ángulos de incidencia  $\theta_i$  en la interfaz núcleo-revestimiento son cercanos o iguales al valor del ángulo crítico  $\alpha_c$ , figura 2.3 a), mientras que los modos de bajo orden corresponden a los rayos cuyos ángulos de incidencia son menores al valor del ángulo crítico. Figura 2.3 b).

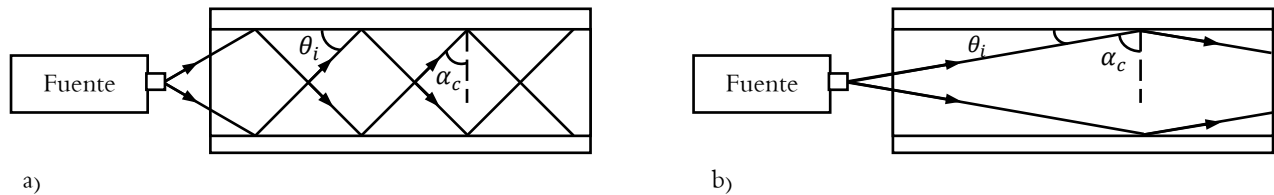


Figura 2.3. a) Modos de alto orden y b) modos de bajo orden [12]

Los modos de alto orden representan una pérdida considerable de la potencia transmitida, ya que estos son altamente sensibles a los dobleces. La figura 2.4 muestra desde el punto de vista de la óptica geométrica el efecto de radiación de los modos de alto orden. Cuando el rayo con ángulo de propagación  $\theta_1$  alcanza el punto A, su ángulo de propagación  $\theta'_1$  resulta mayor a  $\theta_1$ , considerando que este ángulo es mayor que el ángulo crítico, el rayo es refractado en la interfaz núcleo-revestimiento y sale de la fibra, generando una pérdida en la energía óptica. En el caso del rayo punteado, modo de bajo orden, la macrocurvatura genera un acoplamiento de los modos, generando la conversión del modo de bajo orden a un modo de alto orden. Modo que posteriormente puede ser radiado si se presenta una situación similar a la descrita anteriormente. Por lo tanto la presencia de macrocurvaturas en la fibra óptica, no solo genera que la energía contenida en los modos de alto orden sea radiada fuera de la fibra óptica, sino que además genera que aquella energía contenida en los modos de bajo orden pueda ser pérdida posteriormente en una macrocurvatura al realizarse la conversión de los modos.

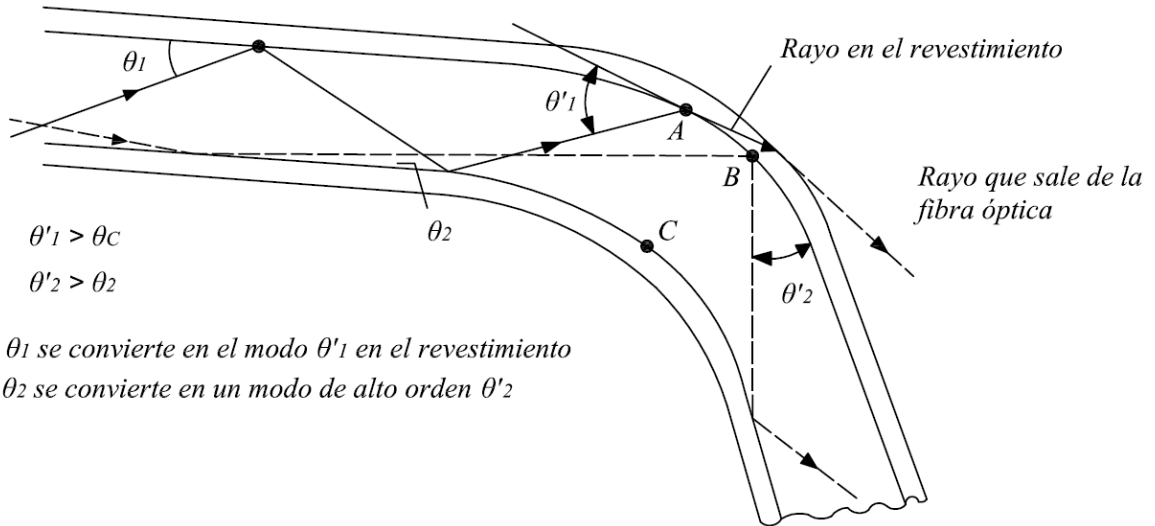


Figura 2.4. Efecto de una macrocurvatura en los modos de propagación [12]

Por su parte las microcurvaturas son pequeñas fluctuaciones de la interfaz núcleo-revestimiento originadas comúnmente por la falta de uniformidad en la fabricación de la fibra óptica. Estas fluctuaciones se presentan como errores de elipticidad<sup>5</sup> y errores de concentricidad<sup>6</sup> [13]. El acoplamiento de los modos en la fibra óptica también es motivado por las microcurvaturas presentes en la fibra. La figura 2.5 muestra la conversión de los modos debido a pequeñas hendiduras presentes en la fibra óptica, donde la conversión de los modos puede llevarse acabo de modos de alto orden a modos de bajo orden y viceversa. [12]

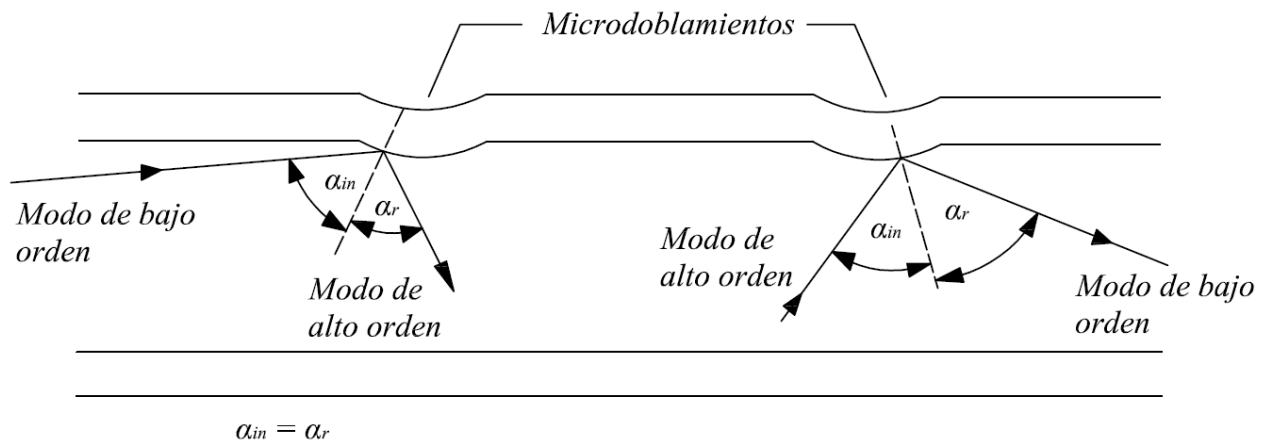


Figura 2.5. Conversión de los modos debido a microcurvaturas [12]

<sup>5</sup> Fluctuaciones del diámetro

<sup>6</sup> Oscilaciones en el eje de la fibra óptica



Además las microcurvaturas también pueden generar pérdidas por radiación y retroesparcimiento de la luz. Figura 2.6.

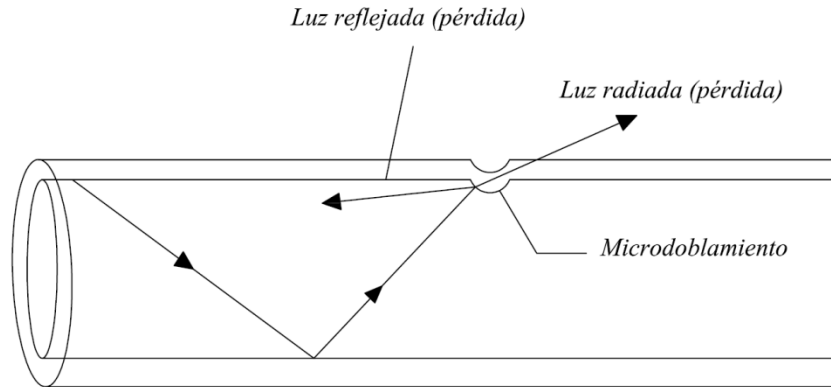


Figura 2.6. Pérdidas por radiación y retroesparcimiento de la luz debido a una microcurvatura [12]

Si la fibra óptica presenta irregularidades periódicas, la potencia transmitida se distribuye entre los modos de propagación pasando de unos a otros. Cuando el espaciamento de las irregularidades es menor que: [13]

$$L_0 = \frac{4a}{\sqrt{\Delta}}$$

Donde,  $a$  es el radio del núcleo y  $\Delta$  es la diferencia relativa de índices de refracción, la atenuación se debe principalmente a pérdidas por radiación, figura 2.7. Así, una fibra óptica de radio  $a = 25\mu\text{m}$  y  $\Delta = 0.01$  presenta pérdidas de radiación cuando hay irregularidades periódicas a 1mm o menos. A este tipo de pérdidas se les llama pérdidas Mie. [13]

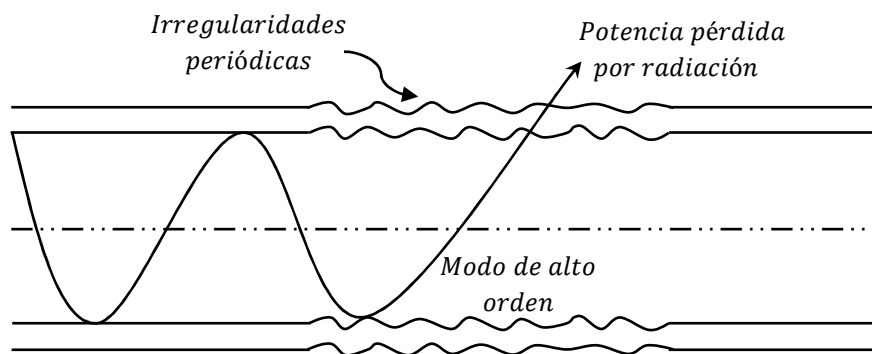


Figura 2.7. Pérdidas por radiación debido a irregularidades periódicas [11]

### 2.2.4 Daños en la fibra óptica (microgrietas, tensión y compresión)

Debido a sus características, la fibra óptica, especialmente la de vidrio, es considerada un material frágil que puede ser dañado fácilmente en su estructura. La elongación, contracción y compresión de la fibra óptica son factores que atenúan la señal transmitida por lo que su estudio es importante. [15]

De manera general la fibra óptica puede ser deteriorada por distintas causas que se reflejan como pérdidas en la potencia de la señal y la ruptura de la fibra óptica. Figura 2.8. [15]

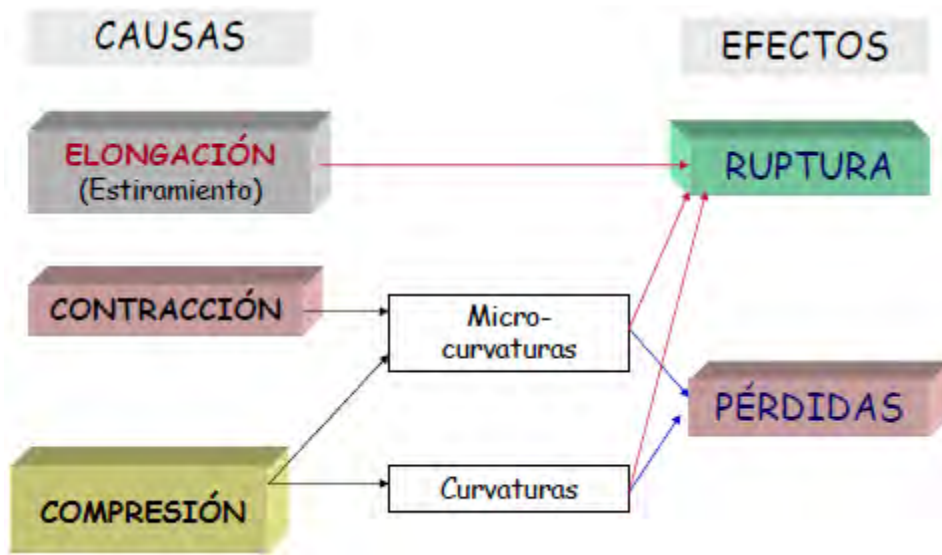


Figura 2.8. Deterioro de la fibra óptica debido a distintas causas externas [15]

El daño por elongación de la fibra se refleja en la ruptura abrupta del material que la conforma. La fibra óptica se comporta como un material elástico hasta que llega al punto de ruptura, aproximadamente una elongación de  $\approx 1\%$  [15]. La probabilidad de rotura debido a la elongación aumenta exponencialmente con el esfuerzo de tracción<sup>7</sup> durante el tendido de la fibra, ya que la resistencia disminuye rápidamente al aumentar la longitud, es decir, mientras una fibra óptica de 10m se puede alargar un 5%, otra de 1500 metros no soporta más de un 2% de elongación [16]. Además la existencia de microgrietas en la fibra óptica, debilita considerablemente las fuerzas de cohesión<sup>8</sup> propias de la fibra, resultando en un material muy débil a esfuerzos de tensión. [15]

<sup>7</sup> Esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto y tienden a estirarlo

<sup>8</sup> Fuerza de atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de un material

La contracción se refiere a la aplicación de una fuerza longitudinal en un punto de la fibra óptica que propicia la formación de microcurvaturas y microgrietas que afectan la resistencia mecánica de la fibra óptica, figura 2.9 [15]. Las microgrietas pueden ser vistas como discontinuidades abruptas del índice de refracción del material. En materiales cristalinos o amorfos son generadas como resultado de estrés mecánico, térmico o envejecimiento del material [17]. Estas pueden tener efectos adversos en la propagación de la luz así como en la fortaleza del material. De hecho, si la apertura de la grieta (la distancia entre las superficies de la grieta) se incrementa por efecto de fuerzas de tensión en el orden de una longitud de onda ( $\lambda/2, \lambda/4$ ), esta puede actuar como un filtro inesperado atenuando ciertas longitudes de onda. [17]

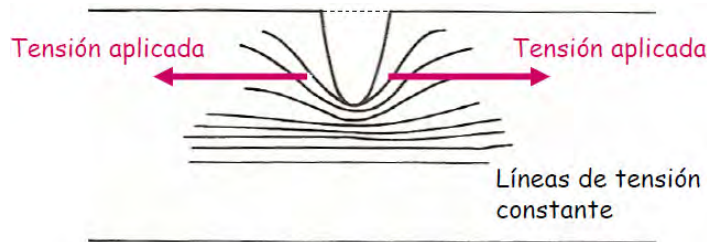


Figura 2.9. Contracción en un punto de la fibra [15]

La resistencia mecánica teórica de la fibra óptica esta en el orden de  $350 N/mm^2$  [16], que comparada con la resistencia de los alambres metálicos su valor resulta muy pequeño. Si a esto se le suma la presencia de fisuras superficiales o microgrietas, su valor disminuye hasta valores de  $30 a 50 N/mm^2$ . Es por esta razón que la fibra óptica siempre es utilizada con una protección que aislé estos esfuerzos del material de la fibra óptica. En la figura 2.10 se muestra el efecto mecánico de la cubierta de protección en la fibra óptica en comparación con una fibra desnuda. Como se puede observar, la protección aumenta la tensión de ruptura en un orden de magnitud, figura 2.10. [15]

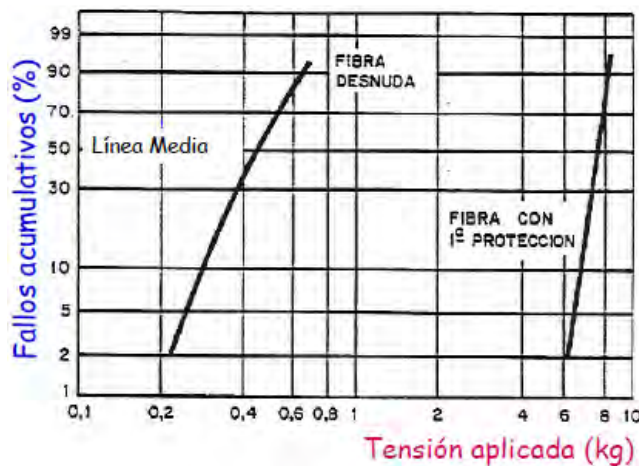


Figura 2.10. Comparación entre una fibra desnuda y una con protección [15]

La compresión es originada cuando la fibra óptica es sometida a una fuerza distribuida en una sección de su superficie generando curvaturas en la fibra óptica. Es ocasionada por fuerzas externas durante la manipulación o instalación del cable. Figura 2.11

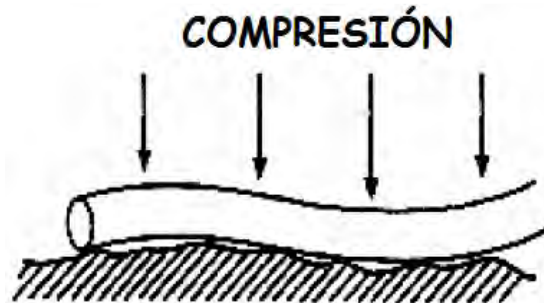


Figura 2.11. Fuerzas distribuidas sobre la fibra que generan la compresión [15]

Cuando se aplica presión mecánica a la fibra óptica, su microestructura interna es modificada causando variaciones en el índice de refracción, determinadas por la distribución de la presión [17].

## 2.3 Comportamiento del concreto en la prueba de flexión simple

En esta sección se describirán las características principales del concreto y se explicarán los fenómenos involucrados en la prueba de flexión simple a una viga de concreto. El conocimiento de éstos fenómenos y del comportamiento de la viga definirán en gran medida parte del diseño experimental que se propone para el monitoreo y detección de grietas en estos elementos.

### 2.3.1 Características del concreto

El concreto es un material pétreo, artificial, obtenido de la mezcla, en proporciones determinadas, de cemento, agregados y agua. El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero es débil en tensión, lo que limita su aplicación como material estructural. Para resistir tensiones se emplea un refuerzo de acero, generalmente en forma de barras de acero (varillas), colocado en las zonas donde se prevé que se desarrollarán tensiones, la acción del acero es restringir el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto [18].

Para conocer el comportamiento del concreto simple es necesario determinar las curvas esfuerzo-deformación correspondiente a los distintos tipos de acciones (situaciones) a los que puede estar sometido, como por ejemplo: compresión, tensión, flexión, torsión, por mencionar algunas. El esfuerzo es comúnmente una medida de la acción ejercida sobre el concreto y la deformación una medida de su respuesta. Éstas curvas de esfuerzo-deformación son el resultado de estudios experimentales sobre el comportamiento del concreto cuando es sometido a estados uniaxiales de compresión y tensión, estados biaxiales de compresión y tensión y estados triaxiales de compresión. Para mayor referencia consultar [18].

### 2.3.1.1 Efecto de la edad, relación agua/cemento y velocidad de carga

Debido al proceso continuo de hidratación del cemento durante el proceso de curado, éste aumenta su resistencia, llamada también capacidad de carga, con el paso del tiempo y las condiciones de curado. La figura 2.12, muestra curvas esfuerzo-deformación de cilindros de 150mm x 300mm fabricados con el mismo concreto y sometidos a las mismas condiciones de curado. Se observa que la deformación<sup>9</sup> varía en un intervalo de 0.0015 a 0.002<sup>10</sup>, sin embargo la capacidad de carga máxima aumenta con el paso del tiempo, es decir, un concreto a 42 días sufre la misma deformación que un concreto a 15 días pero con un esfuerzo o resistencia mayor a la carga. Figura 2.12 a). [18]

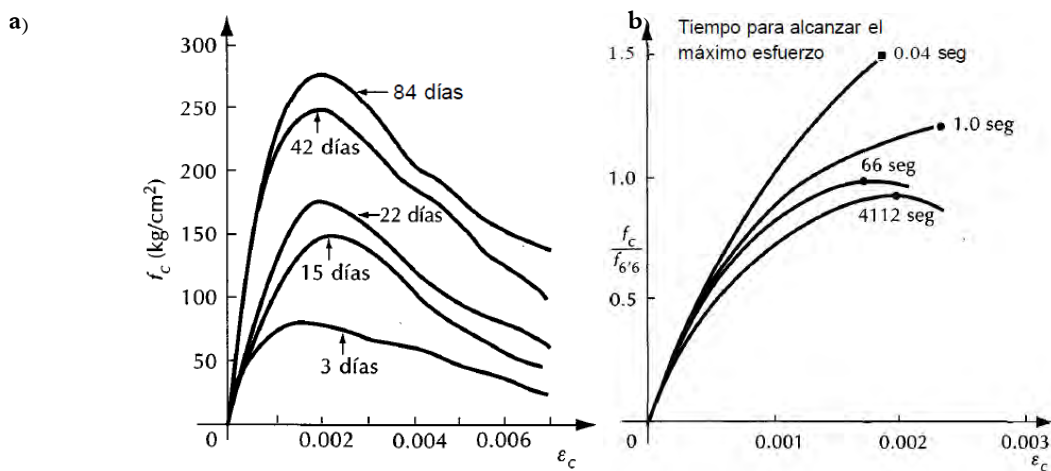


Figura 2.12. a) Efecto de la edad y b) la velocidad de carga en la resistencia del concreto

<sup>9</sup> La deformación es una variable adimensional y su cálculo depende de factores como los momentos presentes en la viga, modulo de elasticidad del concreto, longitud de la viga, etc. [18]

<sup>10</sup> Punto de inflexión de las gráficas. A partir de ese punto la resistencia del concreto es menor [18]

Así también, la resistencia del concreto depende de otros factores como el tipo de cemento utilizado, la relación agua/cemento con la que se fabricó, la velocidad de carga, etc. En el caso de la relación agua/cemento se tiene que a mayor relación agua/cemento, menor es la resistencia del concreto y viceversa. Por su parte, el concreto presenta mayor resistencia cuando la velocidad de carga es rápida que cuando se tienen velocidades carga bajas. Figura 2.12 b). [18]

### 2.3.2 Forma de los elementos de concreto. Vigas de concreto. Justificación

La forma de los elementos de concreto utilizados en este trabajo consistió en vigas rectangulares cuyas dimensiones<sup>11</sup> se muestran en la figura 2.13.

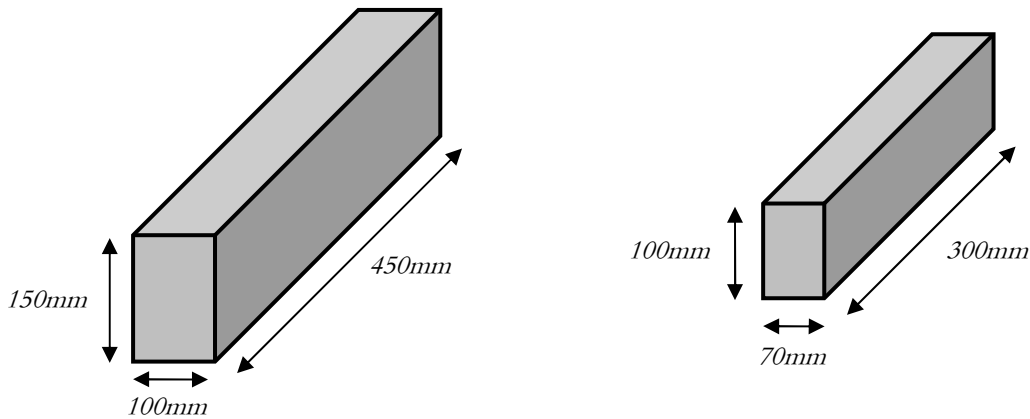


Figura 2.13. Dimensiones de las vigas utilizadas

La elección de trabajar con vigas rectangulares se debe principalmente a los siguientes factores:

1. El proceso de integración de las fibras ópticas en las vigas rectangulares resultó ser sencillo.
2. No se necesitó ningún tipo de protección para las fibras ópticas al momento de integrarlas en el concreto.
3. A diferencia de los cilindros, en las vigas rectangulares se hacen presentes fenómenos de compresión y tensión al momento de probarlas con la maquina universal. Figura 2.14. [18]

<sup>11</sup> Las dimensiones se eligieron con el fin de poder maniobrar con las vigas y poder transportarlas

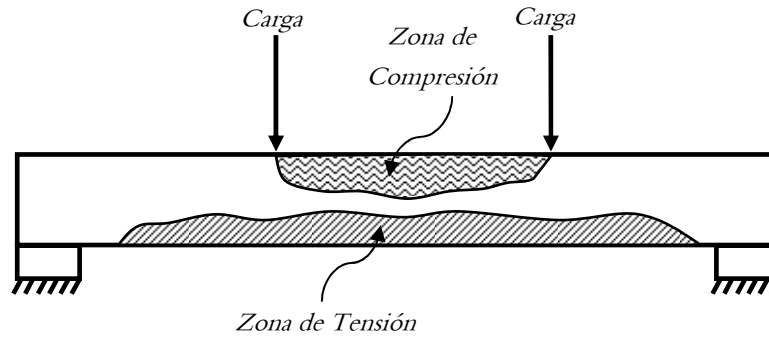


Figura 2.14. Zonas de Tensión y compresión presentes en las pruebas de vigas [18]

4. Las vigas pueden ser probadas con distintas configuraciones de cargas: carga a 1/2, carga a 1/3 y 2/3, y carga distribuida. [18]
5. La colocación de las fibras ópticas dentro de las vigas no entorpecen la aplicación de la carga, como pudiera ocurrir en los cilindros, donde las fibras ópticas quedaban justamente en la superficie donde se aplica la carga.

### 2.3.2.1 Comportamiento y modos de falla de vigas de concreto sujetas a flexión simple

Por lo general, la manera de determinar el comportamiento y modos de falla de vigas con refuerzo<sup>12</sup> sujetas a flexión simple, es aplicando dos cargas concentradas y colocadas en modo simétrico a 1/3 y 2/3 de la longitud determinada por los apoyos, de manera tal que se tenga una zona en la viga sujeta únicamente a flexión, ocasionando la compresión y la tensión en esa zona. Figura 2.15 [18].

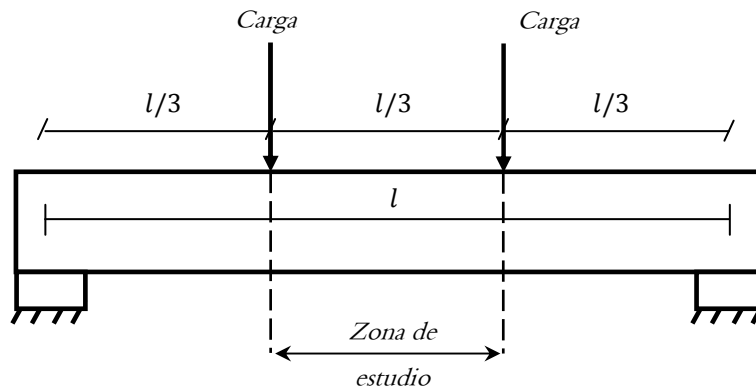


Figura 2.15. Modo de carga de la viga sujeta a flexión [18]

Durante el inicio de la prueba el comportamiento de la viga es esencialmente elástico y toda la sección contribuye a resistir el momento exterior, sin embargo, cuando la tensión producida en la

<sup>12</sup> Viga de concreto reforzada con armadura de acero

zona de estudio excede la resistencia del concreto a la tensión empiezan a aparecer las grietas. A medida que se incrementa la carga, estas grietas aumentan en número, longitud y abertura. En esos momentos se puede apreciar claramente la zona de la viga sujeta a tensión, en la que se presentan las grietas y la zona sujeta a compresión, como la representada en la figura 2.14. [18]

A partir de la aparición de las primeras grietas, el comportamiento de la viga ya no es elástico y las deflexiones no son proporcionales a la carga. En las regiones agrietadas, el acero soporta prácticamente toda la tensión. En esta etapa, el esfuerzo en el acero aumenta considerablemente hasta alcanzar su valor de fluencia, valor en el que alcanza su mayor resistencia, es decir, a partir de ese valor su resistencia a cargar disminuye notablemente. Desde el momento en que el acero empieza a fluir, las deflexiones<sup>13</sup> crecen considerablemente sin que apenas se aumente la carga. Figura 2.16. [18]

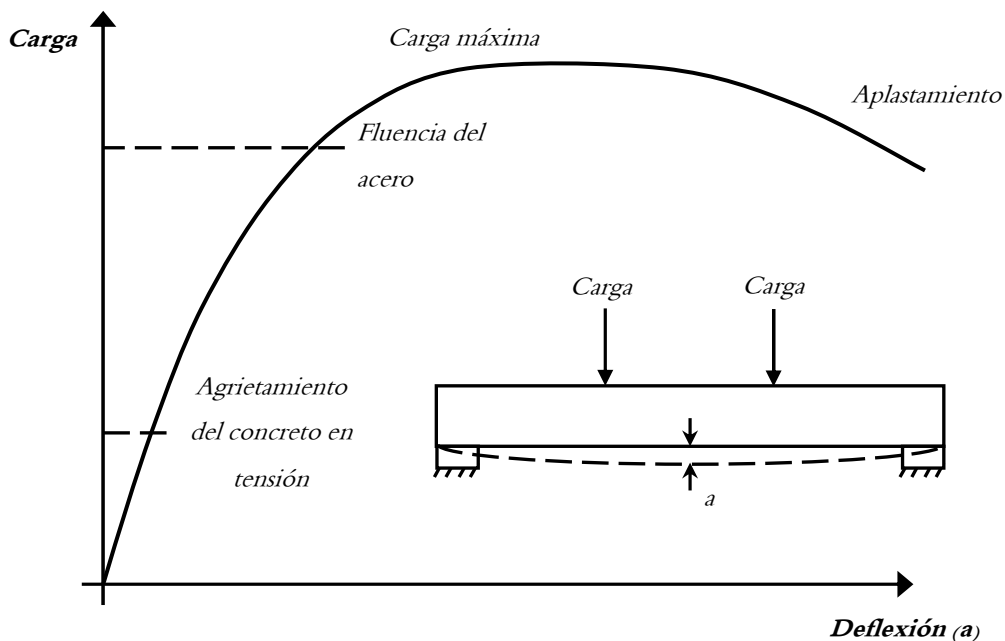


Figura 2.16. Gráfica carga-deflexión de una viga de concreto, con un porcentaje de acero balanceado [18]

A partir del punto de fluencia del acero, se nota un incremento notable en la abertura y longitud de las grietas, la gráfica empieza a curvarse. A medida que aumenta la longitud de las grietas, la zona de compresión se va reduciendo, hasta que el concreto es incapaz de soportar la compresión y se aplasta. [18]

<sup>13</sup> Grado en el que un elemento estructural se desplaza bajo la aplicación de una fuerza



Dependiendo del porcentaje de acero de refuerzo presente en la viga, se tienen 3 casos principales: 1. Balanceada, 2. Subreforzada y 3. Sobrerreforzada. [18]

El primer caso se da cuando el acero fluye justo antes de alcanzar la carga máxima, es decir, la viga alcanza a soportar la carga máxima para la cual fue diseñada, justo después de que el acero empiece a fluir. Por otro lado, cuando el acero fluye antes de alcanzar la carga máxima, se producen deflexiones considerables antes del colapso final, en este caso se tiene una viga subreforzada, el porcentaje de acero es menor al caso balanceado. Finalmente en las vigas sobrerreforzadas el porcentaje de acero es mayor al caso balanceado y fluye después de alcanzar la carga máxima incluso poco antes del colapso de la viga. [18]

### **2.3.2.2 Aparición y evolución de las grietas en vigas**

El agrietamiento del concreto se debe fundamentalmente a deformaciones ocasionadas por cambios volumétricos, esfuerzos provocados por fuerzas de tensión, momentos flexionantes y fuerzas cortantes.

Los cambios volumétricos son ocasionados por variaciones en la temperatura y por contracción del concreto, causando esfuerzos de tensión, que de ser superiores a los que soporta el concreto se presentan los agrietamientos. Estos agrietamientos pueden controlarse ya sea por medio de refuerzo apropiadamente distribuido, o bien, colocando juntas de control de manera que las grietas aparezcan en lugares definidos. Por su parte las fuerzas de tensión, los momentos flexionantes o la combinación de éstas, producen grietas normales al eje de la viga. Aunque éste tipo de agrietamiento no puede eliminarse por completo, en estructuras diseñadas con un adecuado refuerzo, las grietas son de ancho pequeño, generalmente del orden de 0.1mm y no mayores a 0.5mm. Finalmente la presencia de tensiones diagonales debidas a las fuerzas cortantes origina grietas inclinadas al eje de la viga. Aunque estas grietas se pueden contrarrestar por medio de refuerzo de acero, su aparición es un indicio de un severo daño estructural. [18]

Comúnmente las grietas se presentan en la pasta conformada por el agua y el cemento que rodea al agregado, pero en algunos casos es posible que el agregado también se fracture. Este agrietamiento es irreversible y se desarrolla a medida que aumenta la carga, hasta que se produce el colapso. [18]

La localización de las grietas es un fenómeno aleatorio por lo que no es posible predecirla con exactitud. Su desarrollo depende del tipo de armado, porcentaje de acero utilizado y la concentración de esfuerzos existentes. Para mayor referencia consultar [18].

De acuerdo a los mecanismos de agrietamiento expuestos en [18], los elementos sujetos a flexión como las vigas, presentan una formación y desarrollo de grietas representada en la figura 2.17.

Las primeras grietas denominadas primarias (1 en la figura 2.17) se forman a cargas relativamente bajas y se prolongan hasta el eje neutro; eje donde los esfuerzos de flexión y compresión son iguales a cero. Las grietas secundarias (2 en la figura 2.17) son visibles en la cara lateral y se prolongan hasta una altura menor que la del eje neutro. En algunos casos se observan grietas secundarias muy pequeñas hasta la altura del refuerzo (3 en la figura 2.17). Las grietas longitudinales (4 en la figura 2.17) se forman a cargas cercanas a la resistencia de la viga a la altura del refuerzo de acero. Mientras en la parte superior de la viga las grietas primarias pueden dividirse en dos ramas horizontales (5 en la figura 2.17), o bien aparecer como grietas horizontales en la zona de compresión (6 en la figura 2.17), esto sucede cuando se está a punto de alcanzarse la resistencia del elemento. [18]

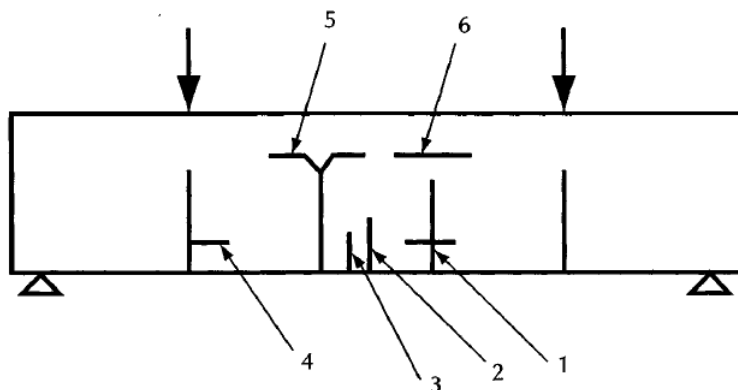


Figura 2.17. Configuración de agrietamiento de una viga sujeta a flexión simple [18]

En el caso de un elemento subreforzado la zona de compresión es menor que en el caso de una sobrerreforzada. Por otra parte las grietas en una viga sobrerreforzada tienen longitudes y aberturas menores que en el caso de la subreforzada, figura 2.18. Cabe mencionar que las vigas construidas para el presente trabajo corresponden al tipo subreforzada, debido a que el refuerzo utilizado únicamente consistió en una barra de acero en la parte inferior de la viga, por lo que el porcentaje de acero es menor que en el caso balanceado. [18]

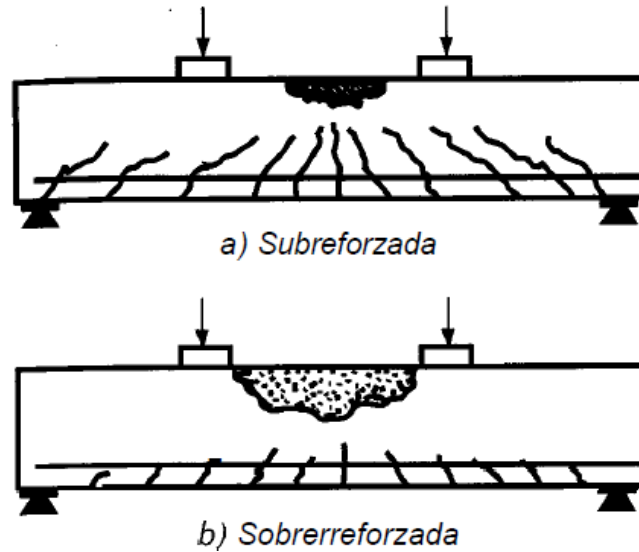


Figura 2.18. Agrietamiento de las vigas de acuerdo al porcentaje de acero

Como se mencionó anteriormente, durante los primeros incrementos de carga el concreto actúa de manera elástica antes de la aparición de las primeras grietas en la zona de tensión de la viga. Las grietas más comunes que se presentan tienen una longitud y aberturas pequeñas una vez que aparecen, sin embargo, existen otro tipo de grietas originadas por acción de la denominada fuerza cortante. Estas grietas son inclinadas y pueden aparecer súbitamente en puntos donde no existía una grieta de flexión o bien pueden presentarse como continuación de una grieta de flexión que incrementa su inclinación. La aparición de estas grietas puede extenderse hasta causar el colapso de la viga, denominándose como falla en tensión diagonal, figura 2.19 a). [18] Por otra parte, puede suceder que el agrietamiento inclinado se desarrolle gradualmente y que el colapso de la viga se produzca por el aplastamiento de la zona de compresión en el extremo de la grieta inclinada, es decir, al reducirse considerablemente la zona que soportaba la compresión en ese extremo, se genera el colapso, denominándose falla en compresión por cortante, figura 2.19 b). La diferencia principal entre estos dos tipos de fallas es que en el primer caso el agrietamiento diagonal es súbito y causa de inmediato el colapso del elemento, mientras que en la falla de compresión por cortante la viga puede soportar aun el aumento de la carga y posteriormente colapsar. [18]

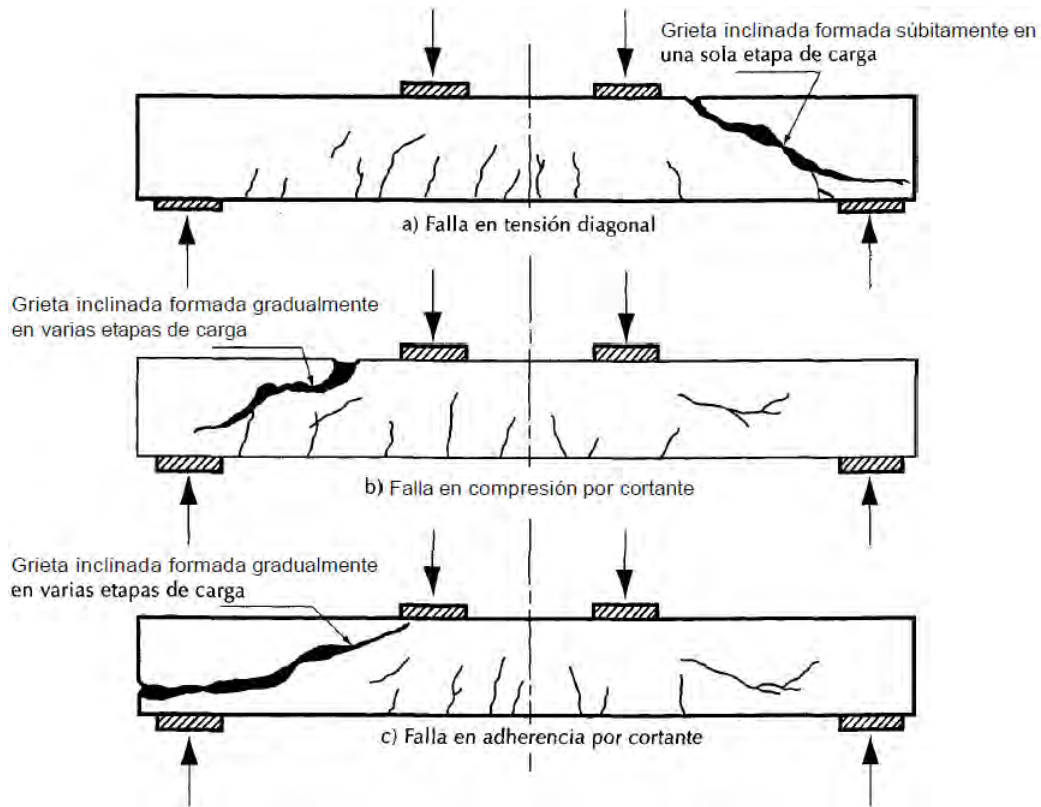


Figura 2.19. Representación esquemática de los diferentes tipos de falla [18]

Finalmente existe un tercer tipo de falla, denominada de adherencia por cortante. En este caso, se presentan extensos agrietamientos longitudinales inclinados al nivel en el que se encuentra colocado el acero de refuerzo, seguido de un aplastamiento ligero en la zona de compresión del extremo donde aparecen las grietas, figura 2.19 c). [18]

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, un elemento debe ser tal que alcance su punto de carga máxima una vez que el acero comience a fluir (caso balanceado), por lo que estos tipos de fallas representan una gran desventaja en la integridad de la estructura ya que modifican claramente el comportamiento del elemento. [18]

## 2.4 Características de los elementos utilizados durante las pruebas

Las pruebas realizadas en este trabajo de tesis, consistieron en un sistema de comunicaciones de fibra óptica, donde la parte transmisora estaba conformada por un láser de  $\lambda = 670nm$  y una lente cilíndrica biconvexa, mientras que la parte receptora se componía de un conjunto de fotodiodos PIN FD-263 y un osciloscopio marca Tektronix TDS2024B con una resolución vertical mínima de 2mV y una precisión de  $\pm 3\%$ .

### 2.4.1 Fuente Óptica: Láser

La fuente óptica utilizada en este trabajo de tesis se trató de un láser VLM2, MVP (Modulable y de Potencia Variable), de la empresa Coherent, Inc., cuyas características se muestran en el anexo A.1.

El láser emite en el modo de onda coherente lo cual significa que las ondas emitidas son de una misma longitud de onda, con amplitud y fase constantes, es decir, viajan en la misma dirección y en forma paralela (colimadas), son monocromáticas y la divergencia del haz es pequeña. La coherencia es una propiedad de las ondas electromagnéticas que están en fase tanto en el tiempo como en el espacio, permitiendo así concentrar elevadas densidades de potencia en un solo punto. [19]

Emite a una longitud de onda de 670nm, correspondiente al color rojo del espectro visible. Se trata de un láser de clase IIIa<sup>14</sup>, lo cual indica que puede ser dañino para el ojo humano si se combina con instrumentos ópticos que reduzcan el diámetro transversal del rayo, generando un aumento en la densidad de potencia, para exposiciones mayores o iguales a 0.25s [20]. Las dimensiones del láser se muestran en el anexo A.1.

Con base en lo expuesto en el subtema 2.2.3, para que la potencia transmitida por la fibra óptica sea más sensible a las variaciones geométricas de la interfaz núcleo-revestimiento, es necesario generar la mayor cantidad de modos de propagación viajando por la fibra óptica. Si la fuente óptica solo es capaz de generar modos de bajo orden, la potencia transmitida no es muy sensitiva a dichas variaciones y por lo tanto las pérdidas en la fibra óptica son pocas. [5][12][21]

---

<sup>14</sup> Clasificación correspondiente al viejo sistema establecido por los Estados Unidos [20]

La figura 2.20, muestra la situación en la que la fuente de luz solo es capaz de generar modos de bajo orden. Si el ángulo de lanzamiento de la fuente óptica  $\theta_s$  es menor al ángulo de aceptación de la fibra óptica  $\theta_a$ , menor número de modos de alto orden serán excitados en el núcleo de la fibra óptica y dominarán los modos de bajo orden, condición que no se busca. De manera que para generar modos de alto orden es necesario que la fuente de luz tenga un ángulo de lanzamiento  $\theta_s$  mayor al ángulo de aceptación  $\theta_a$  de la fibra óptica.

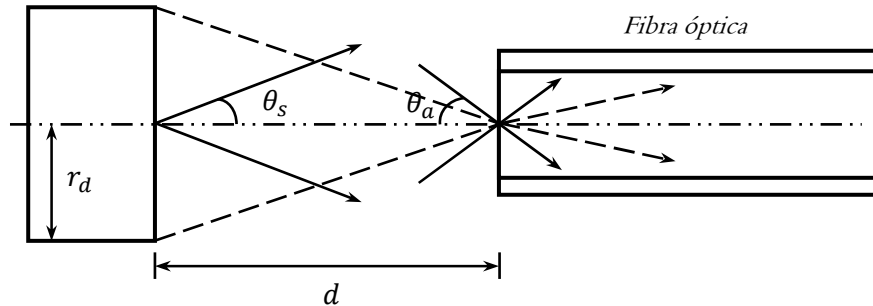


Figura 2.20. Efecto del ángulo de lanzamiento en la excitación de los modos en la fibra óptica [21]

Es decir, si el ángulo  $\theta_s > \theta_a$ , la excitación de modos de alto orden en el núcleo de la fibra óptica será mayor y la potencia transmitida será más sensitiva a las variaciones geométricas de la interfaz núcleo-revestimiento [21].

Por último, es importante destacar que el láser se utilizó de manera continua sin que existiera algún tipo de modulación, es decir, se decidió no modular el láser ya que la modulación ocasionaba que la amplitud de la señal vista en el osciloscopio oscilara de manera tal que no podía distinguirse con precisión si la amplitud disminuía debido a las pérdidas en la fibra óptica. Con el láser en forma continua, la amplitud medida en el osciloscopio no oscilaba y era posible visualizar los cambios debido a las pérdidas en la fibra óptica. La alimentación del láser se llevo a cabo con 6V de voltaje directa obtenidos de la fuente de poder.

### 2.4.2 Fibras ópticas utilizadas

Basándose en el material provisto en el laboratorio, la elección de la fibra óptica se llevó a cabo de entre tres tipos diferentes. Cuyas características se muestran en el anexo A.2.

Las fibras ópticas utilizadas en las pruebas preliminares, presentaban distintas estructuras que cubrían al núcleo y al revestimiento, la figura 2.21 muestra la estructura de las fibras ópticas tal y como se utilizaron en las pruebas.



Figura 2.21. Estructura de las fibras a) FT-400-URT y b) FG-200-LCR [22]

La fibra FG-200-LCR tenía la característica de presentar una capa extra de amortiguamiento de polímero duro, cuya función era reducir los esfuerzos mecánicos en la fibra óptica al igual que el recubrimiento Tefzel, que se decidió no retirar con el fin de proteger a las fibras ópticas durante el proceso de integración a las vigas de concreto.

Por otro lado, las características de atenuación de cada una de las fibras ópticas fue un factor poco determinante para la elección de la fibra óptica a utilizar, ya que para la longitud de onda del láser  $\lambda = 670nm$ , la atenuación respectiva de las fibras estaba en el rango de 1 a 10dB/Km, considerando que la máxima longitud de las fibras ópticas utilizadas fue de 3m, la atenuación de la luz fue prácticamente insignificante. [22]

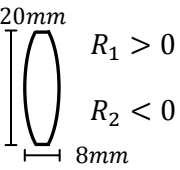
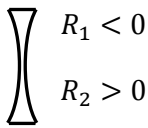
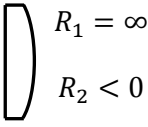
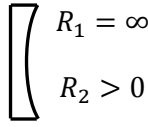
### 2.4.3 Lente

Una lente es un dispositivo óptico<sup>15</sup>, hecho de un material transparente, generalmente vidrio o plástico, que reconfigura la distribución de la energía luminosa que pasa a través de ella. Se clasifican

<sup>15</sup> También llamada dispositivo de refracción, una discontinuidad en el medio dominante [23]

por su forma geométrica y/o por la modificación que introducen en la dirección de los rayos de luz. De acuerdo a la modificación que introducen en los rayos de luz las lentes se pueden clasificar en dos tipos: 1. Lentes convergentes y 2. Lentes divergentes. [23]

Tabla 2.1. Tipos de lentes convergentes y divergentes básicos [23]

Convergentes	Divergentes
 <p>Biconvexa</p>	 <p>Biconcava</p>
 <p>Convexa Plana</p>	 <p>Cóncava Plana</p>

Cabe destacar que esta clasificación de convergente y divergente depende del medio en el que esté situada la lente, es decir, una lente convergente en el aire ( $n_{lente} > n_{aire}$ ) puede ser divergente en otro medio ( $n_{lente} < n_{otro\ medio}$ ). [23]

Las lentes convergentes, también llamadas convexas o positivas, disminuyen el radio de curvatura de los frentes de onda de la luz, generando que la onda converge cada vez más a medida que atraviesa la lente. Por su parte las lentes divergentes, cóncavas o negativas, tienden a acelerar los frentes de onda de la luz, es decir, la luz diverge cada vez más conforme atraviesa la lente [23].

Las superficies curvas de las lentes pueden tener cualquier forma regular, por ejemplo, esférica, cilíndrica o parabólica, sin embargo la mayoría de las lentes se construyen con superficies esféricas debido a que éstas son más fáciles de fabricar. Las lentes utilizadas en el arreglo experimental consistieron en dos lentes convexas-planas de superficie cilíndrica unidas por su superficie plana formando en su conjunto un tipo de lente cilíndrica biconvexa.

Una lente convexa-plana cilíndrica se forma de la intersección de dos planos perpendiculares entre sí con una barra de material transparente en forma de cilindro, figura 2.22a). Estos planos denominados eje meridiano y meridiano de potencia forman la geometría de la lente cilíndrica. La



refracción de la luz ocurre únicamente en el plano meridiano de potencia de sección circular enfocando la luz sobre una línea delgada justo a la distancia del foco de la lente, es decir, la luz es enfocada solo en una dimensión formándose una línea imagen vertical paralela al eje del cilindro a la distancia del foco de la lente, figura 2.22b). [24]

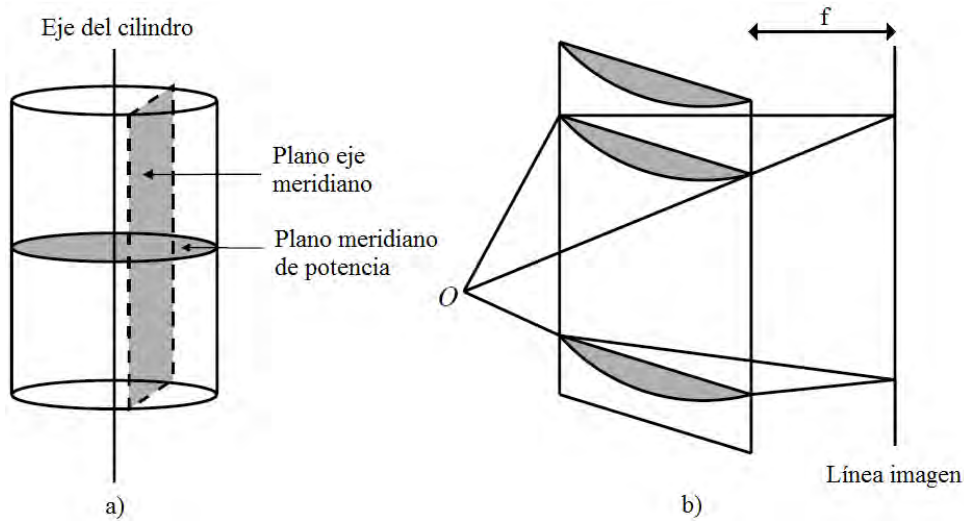


Figura 2.22 a) Conformación de la lente cilíndrica, b) Refracción de la luz en una línea imagen [24]

Para entender la formación de la línea imagen en la figura 2.22b), la lente puede ser dividida en pequeños segmentos horizontales, donde cada segmento horizontal de lente hace converger los rayos de luz en un punto ubicado en el foco de la lente. El resultado completo es una línea imagen vertical paralela al eje del cilindro. [24]

Las lentes cilíndricas solo modifican la trayectoria de la luz en una sola dimensión, sin embargo, la *Ecuación de una Lente Delgada*<sup>16</sup> o *Ecuación de Lensmaker* para lentes esféricas también es aplicable a las lentes cilíndricas, considerando que la convergencia de la luz se lleva a cabo en un solo eje. [24]

$$\frac{1}{s_0} + \frac{1}{s_i} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

Donde  $s_0$  es la distancia de la fuente  $S$  al vértice  $V_1$ ,  $s_i$  es la distancia del vértice  $V_2$  al punto  $P$  donde convergen los rayos,  $n_l$  es el índice de refracción de la lente, que para una lente convergente  $n_l > n_{medio}$ , y  $R_1$  y  $R_2$  son los radios de curvatura de las superficies de la lente, figura 2.23. [23]

<sup>16</sup> En una lente delgada se considera que el espesor  $d \rightarrow 0$ , por lo que las distancias  $s_0$  y  $s_i$  pueden medirse desde los vértices o desde el centro de la lente [23]

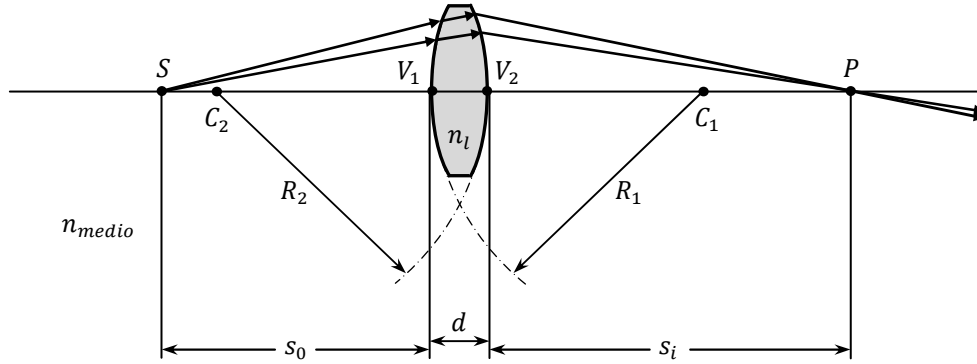


Figura 2.23. Geometría, parámetros y trayectoria de los rayos en una lente biconvexa [23]

Si  $s_0$  se mueve hasta el infinito, la distancia  $s_i$  tenderá al foco de la lente  $f_i$  ya que la fuente estará tan alejada que la luz llegará en forma paralela y convergerá en el foco  $f_i$ . Figura 2.24. [23]

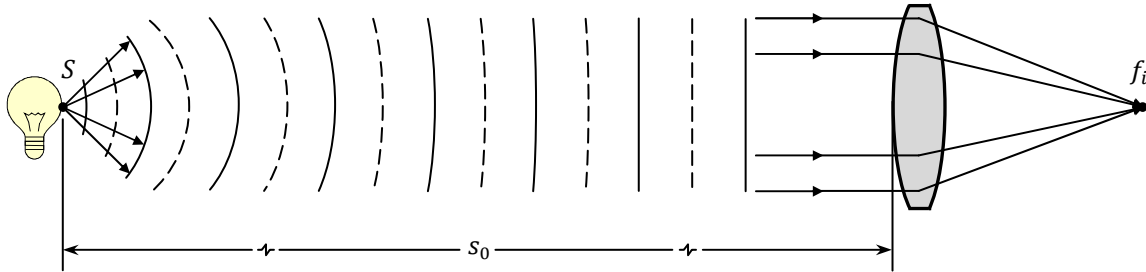


Figura 2.24. Rayos que inciden en la lente de manera paralela de una fuente lejana [23]

Entonces se tiene que para las lentes delgadas, las distancias focales  $f_0$  y  $f_i$  son iguales,  $f_0 = f_i$  consecuentemente la ecuación de Lensmaker, puede reescribirse como:

$$\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2)$$

Cuya expresión se denomina fórmula Gaussiana de una Lente, con la que es posible determinar la distancia del foco de una lente, conociendo los parámetros  $n_l$ ,  $R_1$  y  $R_2$ . Para el caso de la lente biconvexa utilizada, considerando que  $n_l = 1.5$  (valor típico), y los radios de curvatura  $R_1 = 14.7\text{mm}$  y  $R_2 = -14.7\text{mm}$  (estimados a partir de la geometría de la lente y con ayuda del software Autocad), es posible estimar la distancia focal de la lente.

$$\frac{1}{f} = (1.5 - 1) \left( \frac{1}{14.7} - \frac{1}{-14.7} \right)$$

$$f = 14.7\text{mm}$$

Debido a que las fibras ópticas se colocaron a una distancia mayor a la focal, la refracción del haz generó que se formara una línea imagen que permitió iluminar las múltiples fibras ópticas utilizadas, figura 2.25.

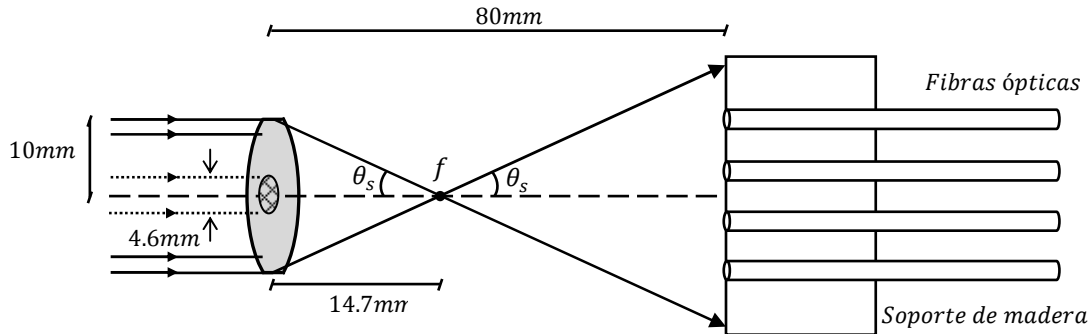


Figura 2.25. Geometría del arreglo entre la lente biconvexa y las fibras ópticas

Sin embargo, es importante mencionar dos casos en este arreglo que dependen de las condiciones en la que los rayos inciden sobre la lente.

1. Los rayos provienen de una fuente lejana y cubren toda la superficie de la lente, obteniéndose un ángulo de lanzamiento a partir del triángulo rectángulo de 10mm x 14.7mm:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{10\text{mm}}{14.7\text{mm}}\right) = 34.2^\circ$$

2. Los rayos provienen del láser VLM2 y solo iluminan una región elíptica de (4.6mm x 1.3mm)<sup>17</sup>, obteniéndose un ángulo de lanzamiento a partir del triángulo rectángulo de 2.3mm x 14.7mm:

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{2.3\text{mm}}{14.7\text{mm}}\right) = 8.9^\circ$$

Se observa que para el caso 1, el ángulo de lanzamiento es mayor al ángulo de aceptación de las fibras ópticas utilizadas, por lo que la condición de generar modos de alto orden es posible. Mientras que en el caso 2, donde el ángulo de lanzamiento resultante es menor al ángulo de aceptación de las fibras ópticas, la propagación de modos de alto orden es menor y la fibra es poco sensible a las variaciones en la interfaz núcleo-revestimiento.

Debido a que no se utilizó ningún otro dispositivo óptico que aumentará el tamaño de la mancha del láser VLM2 antes de incidir sobre la lente cilíndrica biconvexa, el arreglo experimental montando corresponde al caso 2. La figura 2.26 muestra las dimensiones del arreglo experimental de

<sup>17</sup> Ver anexo A.1 Especificaciones y dimensiones del láser utilizado

la parte transmisora, donde se puede observar la formación de la línea imagen formada por la refracción del haz láser.

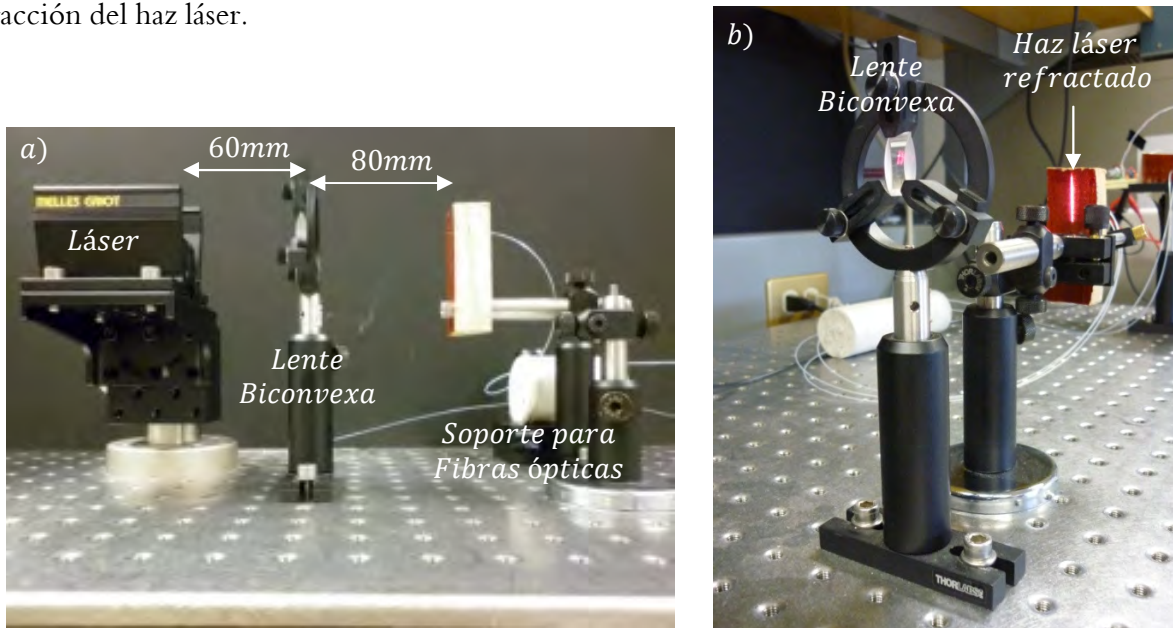


Figura 2.26. a) Instalación del láser, lente biconvexa y fibras ópticas, b) Haz láser refractado por la lente biconvexa

#### 2.4.4 Circuito Fotodetector

Un dispositivo fotodetector convierte la energía electromagnética incidente de la porción óptica del espectro en una corriente eléctrica útil. En la actualidad existen distintos fotodetectores basados en materiales semiconductores tales como los fotodiodos, fototransistores, opto-acopladores y fotoconductores. [25]

El fotodiodo es un dispositivo opto-electrónico que involucra la conversión de fotones a electrones generando una fotocorriente. Cuando un fotón incide en el área activa del fotodiodo con una energía mayor o igual al “band gap” del material semiconductor, se produce la excitación de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, generando así una fotocorriente. Sin embargo, no toda la radiación incidente es convertida en un par hueco-electrón. La radiación compuesta de longitudes de onda de mayor energía, (color azul) es absorbida en la superficie del dispositivo por el fenómeno de absorción, en materiales como el silicio, el coeficiente de absorción para longitudes de onda pequeñas es grande, mientras que longitudes de onda más grandes (color rojo e infrarrojo) no son absorbidas en la superficie y generan la interacción de los fotones en la

región intrínseca del material semiconductor. Es por esta razón que los fotodiodos trabajan en un rango espectral de longitudes de onda, donde es posible realizar la conversión de fotones a electrones con una eficiencia mayor. [25]

El fotodiodo es un dispositivo de bajo costo, bajo ruido y que puede trabajar de manera lineal. El anexo A.3 muestra los principales parámetros del fotodiodo PIN FD-263 utilizado.

El fotodiodo PIN posee una capa adicional entre las capas  $n$  y  $p$ . Esta capa está hecha de un material  $n$  dopado ligeramente, cuya función es generar una mayor fotocorriente cuando inciden los fotones. Este tipo de fotodiodo tiene alta sensibilidad o responsividad, estabilidad y un tiempo de respuesta relativamente rápido. [25]

La sensibilidad o responsividad del fotodiodo  $R$ , se define como la razón de la fotocorriente generada por los fotones incidentes  $I_p$ , entre la potencia óptica incidente  $P_o$ . [25]

$$R = \frac{I_p}{P_o} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

Donde,  $\eta$  es la eficiencia cuántica,  $q$  es la carga del electrón ( $1.6 \times 10^{-9}$  *Coulomb*),  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia del fotón. La eficiencia cuántica se define como la relación entre el número de electrones generados entre el número de fotones incidentes. [25]

$$\eta = \frac{\text{Número de electrones generados}}{\text{Número de fotones incidentes}} = \frac{I_p/q}{P_o/h\nu}$$

Es dependiente de la longitud de onda de la luz y su valor puede ser incrementado si la región intrínseca del material semiconductor se hace más amplia, es decir, hay una mayor probabilidad de que más fotones sean absorbidos. Sin embargo el tiempo de respuesta del fotodiodo disminuye, ya que a la fotocorriente le toma más tiempo cruzar la región intrínseca. [25]

El circuito fotodetector utilizado en los experimentos de las pruebas preliminares consistió en un fotodiodo PIN de silicio FD-263 de la empresa Quartz en modo foto-voltaico, junto con una resistencia de  $56\Omega$ . Figura 2.27.

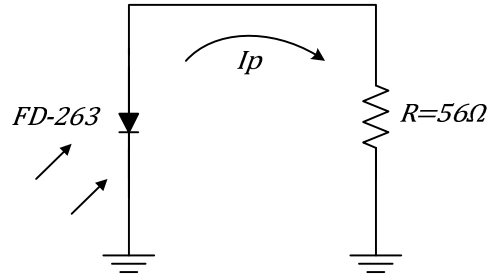


Figura 2.27. Circuito fotodetector, fotodiodo con una resistencia de carga [24]

El modo fotovoltaico se tiene cuando no se utiliza ningún voltaje de polarización. Sus principales características son que provee de una mejor relación señal a ruido debido a la ausencia de corriente oscura, se tiene una mayor sensibilidad, su ancho de banda es menor al no utilizar ningún voltaje de polarización al igual que su tiempo de respuesta. [25]

La corriente oscura es la corriente que fluye por el fotodiodo cuando opera en el modo de polarización inversa<sup>18</sup> en ausencia de luz incidente en la región activa. Depende del voltaje de polarización y del área activa del fotodiodo. En el caso del modo foto-voltaico al no utilizar ningún voltaje de polarización, se corre el riesgo de trabajar en la zona no lineal del fotodiodo. Para evitar esto la resistencia de carga elegida  $R_L$  debe ser pequeña con el fin de trabajar en la zona cercana al eje vertical de la curva corriente-voltaje del fotodiodo. [25]

En el caso del circuito de la figura 2.27, la resistencia elegida tenía un valor de  $56\Omega$ , valor simplemente elegido por ser pequeño. Las mediciones se realizaron tomando el voltaje en las terminales de la resistencia  $R_L$  con ayuda del osciloscopio. Este voltaje era proporcional a la corriente generada por el fotodiodo a causa de las variaciones de luz que incidían sobre él. Durante la realización del experimento en el Laboratorio de Materiales se utilizaron 4 fotodiodos idénticos por canal y así poder tomar las mediciones correspondientes de cada una de las fibras ópticas.

<sup>18</sup> Modo Fotoconductor

## 2.5 Conclusiones

1. Los daños o modificaciones en la estructura física de la fibra óptica generan una pérdida excesiva en la transmisión de la luz, especialmente aquellos que modifican la interfaz núcleo-revestimiento ocasionando pérdidas de la luz por efectos de radiación y/o reflexión.
2. El daño estructural en un elemento de concreto, puede ocasionar daños en la estructura física de la fibra óptica generando pérdidas en la transmisión de la luz. Por lo tanto, el monitoreo de las pérdidas excesivas en la transmisión de la luz pueden ser un indicio de un daño estructural en un elemento de concreto.
3. Se justificó la elección de trabajar con una viga rectangular como elemento básico para realizar pruebas en virtud de que en este elemento se llevan a cabo fenómenos de tensión y compresión durante la prueba de flexión simple, por lo que es posible visualizar el comportamiento de la fibra óptica bajo estos dos fenómenos.
4. El primer daño que se presenta en una viga rectangular sujeta a flexión simple es el agrietamiento del concreto en tensión, por lo que el monitoreo de dicha zona es importante para evitar un daño mayor en la viga.
5. El agrietamiento del concreto es generado cuando se supera la resistencia del concreto a la tensión. El desarrollo de las grietas depende principalmente de las características del concreto, la carga aplicada y el porcentaje de acero presente en el elemento.
6. Los modos de alto orden en el núcleo de la fibra óptica son más sensibles a las variaciones de la estructura física de la fibra óptica. La excitación de estos modos permite que la fibra óptica tenga una mayor sensibilidad ante los daños estructurales de la viga de concreto.

## 2.6 Referencias

- [1] Kister, G., Winter, D., Gebremichael, Y.M., Leighton, J., Badcock, R.A., Tester, P.D., Krishnamurthy, S., Fernando, G.F., Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors, *Engineering Structures*, 2007.
- [2] Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., Sridhar, S., Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2010.
- [3] Yung Bin Lin, Kuo Chun Chang, Jenn Chuan Chern, Wang, L.A., Packaging methods of fiber-Bragg grating sensors in civil structures applications, *Sensors Journal, IEEE*, vol. 5, 2005.

- [4] De Baere, I., Luyckx, G., Voet, E., Van Paepegem, W., Degrieck, J., On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions, *Optics and Lasers in Engineering*, 2009.
- [5] Wan, K.T., Leung, C.K.Y., Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, *Sensors and Actuators*, 2007.
- [6] Perrone, G., Olivero, M., Vallan, A., Carullo, A., Neri, A., Long term in-situ test of a low-cost fiber-based crack monitoring system, *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 325-328, 2008.
- [7] Casalicchio, M.L., Penna, A., Perrone, G., Vallan, A., Optical fiber sensors for long-and short-term crack monitoring, *Proceedings 2009 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2009*, pp. 87-92.
- [8] Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., Sridhar, S., Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2010.
- [9] Leng, J.S., Barnes, R.A., Hameed, A., Winter, D., Tetlow, J., Mays, G.C., Fernando, G.F., Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2006.
- [10] Yang, J., Yuan, L., Package and installation of embeddable fiber optic sensors, *Optics and Lasers in Engineering*, 2009.
- [11] Keiser Gerd, *Optical Fiber Communications*, 2nd edition, McGraw Hill, United States of America, 1991.
- [12] Zanger Henry, Zanger Cynthia, *Fiber Optics-Communication and other applications*, 1st edition, Macmillan Publishing Company, United States of America, 1991.
- [13] Libro clase de Teoría, *Comunicaciones Ópticas*, Facultad de Ingeniería, UNAM
- [14] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 1ª edición, John Wiley & Sons, Estados Unidos 1992.
- [15] Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Grupo de Sistemás de Radiocomunicaciones y Comunicaciones Ópticas, Tema 5 Cables de Fibras Ópticas, Dr. Antonio Aguilar Morales, Madrid España <<http://arantxa.ii.uam.es/~aaguilar/ComOpt/TEMÁS/Tema05.pdf>>
- [16] Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Departamento de Electrónica, *Electrónica Aplicada III*, Plantel Exterior, Fibras Ópticas parte 3, Ing. Oscar M. Santa Cruz, Córdoba Argentina <<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/PlantelExterior/IntroduFO3.pdf>>
- [17] Stamatios V. Kartalopoulos, *DWDM Networks, Devices, and Technology*, IEEE Press Wiley-Interscience, Estados Unidos de America, 2003.
- [18] González Cuevas F., *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*, 1ª edición, Limusa, México 1974.
- [19] Del Hierro G., *Bombeo Óptico Coherente*, Introducción a los Láseres I, Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, México. <[http://docencia.izt.uam.mx/mfg/láseres1/contenido/bombeo\\_coherente.pdf](http://docencia.izt.uam.mx/mfg/láseres1/contenido/bombeo_coherente.pdf)>
- [20] American National Standards Institute, *Láser Safety Standard*, Old System ANSI Z136.1, United States of America. <[http://en.wikipedia.org/wiki/Láser\\_safety#Class\\_IIIa](http://en.wikipedia.org/wiki/Láser_safety#Class_IIIa)>
- [21] Olson, N., Leung, C.K.Y., Meng, A., Crack sensing with a multimode fiber: Experimental and theoretical studies, *Sensors and Actuators*, 2005.
- [22] Thorlabs Inc., Multimode Fiber Step Index, FT-400-URT ó BFH48-400. <[http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=362&PN=BFH48-400](http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=362&PN=BFH48-400)>, FG-200-LCR ó BFL22-200. <[http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=360&PN=BFL22-200](http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=360&PN=BFL22-200)>
- [23] Hecht Eugene, *Optics*, 3<sup>rd</sup> edition, Addison Wesley Longman, United States, 1998.
- [24] Sharma K. K., *Optics Principles and Applications*, 1<sup>st</sup> edition, Academic Press by Elsevier, United States, 2006.
- [25] Desmarais Louis, *Applied Electro-Optics*, 1<sup>st</sup> edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, United States, 1998.



# Capítulo 3

## Diseño e implementación del método propuesto. Arreglo Experimental

---

### 3.1 Diseño estadístico de los experimentos a realizar

Cuando se trata con un problema que involucra la realización de experimentos, análisis de resultados y tratamiento de datos, es muy importante realizar a detalle un análisis previo del problema, definir claramente los objetivos y establecer las estrategias de experimentación. De acuerdo con [1], cualquier problema experimental deber ser abordado en dos etapas: 1. El diseño del experimento y 2. El análisis estadístico de los resultados.

El diseño del experimento se basa principalmente en definir claramente los objetivos que se desean alcanzar, especificando las variables de mayor influencia y aquellas variables que no son posibles de controlar, así mismo, se debe definir la estrategia de experimentación a seguir cuyo enfoque debe discriminar factores con efectos que no sean importantes o carezcan de valor práctico.

Con base en lo anterior, el problema sobre la detección de grietas en las vigas de concreto se abordó de acuerdo a las pautas generales para el diseño de experimentos expuestas en [1], la consideración de estas pautas al problema se analizan en el siguiente tema.

### 3.1.1 Pautas generales para el diseño experimental

El objetivo de estas pautas es brindar un modelo a seguir para definir claramente lo que se va a estudiar o medir y plantear la estrategia de experimentación a utilizar. A continuación se dará una breve explicación de éstas pautas y la aplicación al problema del monitoreo y la detección de grietas en vigas de concreto rectangulares. [1]

- 1) **Identificación y enunciación del problema:** Se refiere a listar los problemas y preguntas específicas que se abordarán en el experimento. La finalidad es definir un objetivo global y enunciar de forma clara el problema a tratar.
- 2) **Elección de los factores de diseño:** Determinar los factores que intervienen en el experimento, sus rangos, como se van a controlar y medir. Estos factores se clasifican en: factores constantes, factores perturbadores<sup>19</sup>, y factores de ruido<sup>20</sup>.
- 3) **Selección de la variable de respuesta:** En la mayoría de los casos la variable de respuesta es el promedio, la desviación estándar (o ambas) de la característica medida.
- 4) **Elección del diseño experimental:** Determinación del tamaño de la muestra y el orden de las corridas.
- 5) **Realización del experimento:** Monitorear con atención el proceso, de ser posible hacer algunas corridas de prueba.
- 6) **Análisis estadístico de los datos:** Utilización de métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivas y no apreciativas. Métodos gráficos, pruebas de hipótesis, estimación de intervalos de confianza, modelado, son algunos de los métodos estadísticos que se pueden aplicar.
- 7) **Conclusiones y recomendaciones:** Presentación de resultados, pruebas de confirmación y obtención de conclusiones prácticas.

---

<sup>19</sup> Factor que no es controlable pero puede medirse

<sup>20</sup> Factor que varía de manera natural y no es controlable en el proceso

### 3.1.2 Diseño del experimento

En esta sección se aplican algunas de las pautas generales para el diseño de los experimentos a realizar durante este trabajo de tesis. [1]

**Objetivo global.** – Determinar la viabilidad de detectar la aparición de grietas en vigas de concreto mediante el uso de fibras ópticas simples.

**Técnica de detección.** – Monitoreando la respuesta en amplitud de la señal recibida (V) contra la carga aplicada (Kg), en varias pruebas realizadas a vigas de concreto (población blanco) para cada una de las fibras ópticas integradas en el concreto. La técnica para la adquisición de los datos consistirá en la utilización de un circuito fotodetector y el osciloscopio. Los valores de carga serán controlables y se obtendrán de la maquina universal, con una velocidad de carga constante.

**Hipótesis.** – Se monitoreará la amplitud de la señal recibida, con base en la hipótesis de que existirán pérdidas en la potencia transmitida por las fibras ópticas debido a daños o modificaciones en la estructura física de la fibra óptica como agrietamientos, microcurvaturas, doblamientos originadas por la carga aplicada sobre la viga y el rompimiento parcial de la masa de concreto, que dan lugar a pérdidas en la potencia por reflexiones y efectos de radiación.

### 3.1.3 Factores de diseño y variable de respuesta

Determinación de los factores de diseño y la variable de respuesta aplicada al monitoreo y detección de grietas en vigas de concreto [1].

**Factores a variar.** – La carga aplicada a las vigas de concreto.

**Factores constantes.** – Dimensiones de la viga, amplitud de la señal transmitida, número de fibras ópticas integradas.

**Factor perturbador.** – La temperatura.

**Variable de respuesta.** – Amplitud de la señal recibida.

### 3.1.4 Tamaño de la muestra, nivel de confianza y precisión

El tamaño de la muestra o número de réplicas se refiere al número de especímenes a crear para obtener un cierto nivel de confianza y precisión deseadas.

Para el caso de los experimentos se decidió trabajar con un nivel de confianza<sup>21</sup> del 90 al 95%, de que el valor a estimar ( $\bar{X}$ ) media muestral, no varíe más allá de un valor de  $k\sigma$  deseado, figura 3.1.

Es decir,

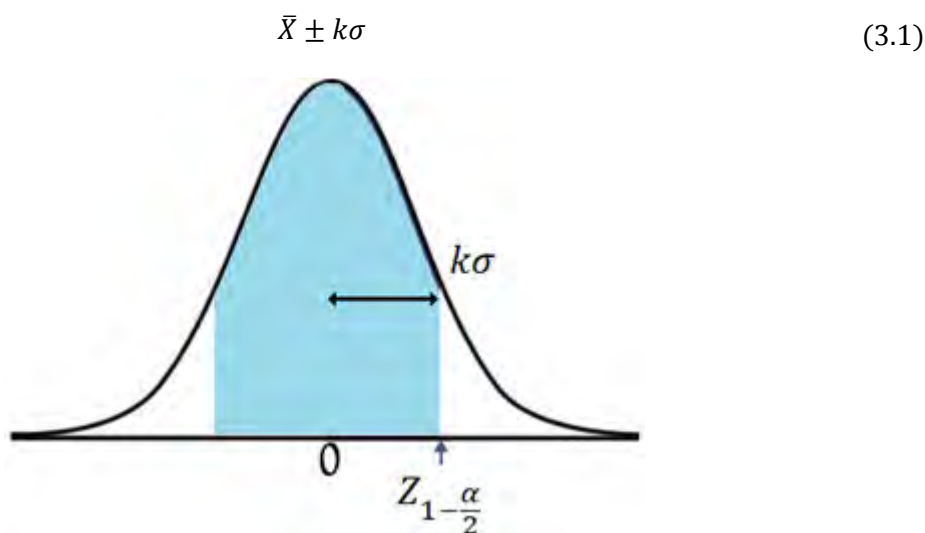


Figura 3.1. Forma de la distribución normal estándar

Donde:

$\bar{X}$  – Valor a estimar, media muestral

$k\sigma$  – error estándar de la media muestral

$k$  – precisión con la que se desea estimar  $\bar{X}$

$\sigma$  – desviación estándar de la población

Además teniendo en cuenta que el nivel de confianza, se calcula como:

$$\text{Nivel de confianza} = (1 - \alpha)100\%$$

$\alpha$  = Probabilidad de que el valor estimado NO caiga con una precisión  $k$

<sup>21</sup> Probabilidad de acertar dentro de un intervalo de confianza

Entonces, asumiendo que la variable a estimar tiene una distribución normal y sabiendo que el intervalo de confianza para estimar la media poblacional ( $\mu$ ) se obtiene como:

$$\bar{X} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_{\bar{X}} < \mu < \bar{X} + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_{\bar{X}}$$

Donde  $\sigma_{\bar{X}}$  es la desviación estándar de la muestra:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Entonces:

$$\bar{X} - Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Igualando los factores con (3.1)

$$\bar{X} \pm k\sigma = \bar{X} \pm Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$k = Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\frac{1}{\sqrt{n}}$$

Finalmente se tiene que el tamaño de la muestra para una precisión deseada  $k\sigma$ , es:

$$n = \left(\frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}}{k}\right)^2 \tag{3.2}$$

Donde:

$Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  es el fractil  $\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$  de la distribución normal estándar

Con base en lo anterior y de acuerdo a la ecuación (3.2), es posible determinar el tamaño de la muestra  $n$  a partir de un cierto nivel de confianza deseado.

**Caso 1) Nivel de confianza = 90%**

$$\text{Nivel de confianza} = (1 - \alpha)100\% = 90\%$$

$$(1 - \alpha) = 0.9$$

$$\alpha = 0.1$$

Obteniendo  $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ , de tablas de la distribución normal estándar:

$$1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.1}{2} = 0.95$$

$$Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = Z_{0.95} \approx 1.65$$

Entonces el tamaño de la muestra  $n$  con una precisión cualquiera de  $k$ , se obtiene como:

$$n = \left(\frac{1.65}{k}\right)^2 \text{ para un nivel de confianza del } 90\%$$

**Caso 2) Nivel de confianza = 95%**

$$(1 - \alpha) = 0.95$$

$$\alpha = 0.05$$

$$1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \frac{0.05}{2} = 0.975$$

$$Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = Z_{0.975} \approx 1.96$$

Se tiene que el tamaño de muestra  $n$  con una precisión cualquiera  $k$ , se obtiene como:

$$n = \left(\frac{1.96}{k}\right)^2 \text{ para un nivel de confianza del } 95\%$$

El tamaño de la muestra para distintos valores de precisión  $k$ , se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Tamaño de la muestra para un nivel de confianza y precisión deseadas

<b>Precisión <math>k</math></b>	<b>Nivel de confianza = 90%</b>	<b>Nivel de confianza = 95%</b>
	$n = \left(\frac{1.65}{k}\right)^2$	$n = \left(\frac{1.96}{k}\right)^2$
0.1	272.25	384.16
0.2	68.06	96.04
0.3	30.25	42.68
0.4	17.01	24.01
0.5	10.89	15.36
0.6	7.56	10.67
0.7	5.55	<b>7.84</b>
0.8	4.25	6
0.9	3.36	4.74
1	2.72	3.84

Como se puede observar en la tabla 3.1, mientras la precisión es más pequeña, el tamaño de la muestra aumenta considerablemente.

Para el caso del experimento, se propuso trabajar con un nivel de confianza del 95% y una precisión de 0.7, por lo que el tamaño de la muestra resultante es  $n = 7.84$ , redondeando al entero superior:

$$n = 8 \text{ muestras}$$

Resumiendo lo anterior, si se hacen 8 muestras, se dice que habrá un 95% de probabilidad de que el valor que se quiere estimar tenga un error de estimación de  $\pm 0.7\sigma$ , y habrá una probabilidad del 5% de que el valor a estimar tenga un error mayor a  $\pm 0.7\sigma$ .

Por último es importante mencionar que los principios básicos del diseño experimental están fundamentados en dos aspectos: la realización de réplicas y la aleatorización. La realización de replicas se refiere a la repetición del experimento básico. Por ejemplo, si se usa la media muestral ( $\bar{X}$ ) para estimar el efecto de un factor en el experimento, la realización de réplicas permite hacer una estimación más precisa de dicho efecto. Si no se hacen varias réplicas, la diferencia observada entre las medias muestrales puede ser resultado del error experimental<sup>22</sup>. Se entiende por aleatorización, que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán los ensayos individuales del experimento deben ser determinados al azar. En términos estadísticos, las observaciones deben ser variables aleatorias con distribuciones independientes. Estos dos aspectos son de vital importancia para que el experimento a realizar tenga el menor número de fuentes de error.

## 3.2 Pruebas Preliminares

Las pruebas preliminares que se realizaron se enfocaron en verificar el comportamiento de la fibra óptica cuando es sometida a la integración en el concreto, doblamiento y tensión. La mayoría de las pruebas fueron realizadas conforme a lo establecido en el tema de 3.1. Las pruebas se realizaron montando el láser VLM2, la lente cilíndrica biconvexa, las fibras ópticas FT-400-URT y FG-200-LCR, los fotodiodos PIN FD-263 y el osciloscopio Tektronix TDS2024B. Se montó el sistema

---

<sup>22</sup> Error estadístico originado por variaciones que no están bajo control y son inevitables

transmisor y receptor y las mediciones se realizaron tomando lecturas de la amplitud de la señal eléctrica vista en el osciloscopio.

### 3.2.1 Integridad de las fibras ópticas en el proceso de integración a los elementos de concreto

Esta prueba consistió en verificar la integridad de las fibras ópticas una vez introducidas en el concreto. La finalidad de la prueba fue determinar el tipo de fibra óptica que más convenía para las pruebas con base en su resistencia a las condiciones de fabricación del concreto, es decir, se determinó si la fibra óptica sufría daños al momento de ser integrada en el concreto con base en la amplitud de la señal transmitida comparándola con una fibra óptica de referencia.

Para esto se construyeron 5 especímenes de concreto en forma de cilindros<sup>23</sup> con 3 tipos de fibras ópticas integradas. La configuración respecto al tipo de fibra óptica integrada se muestra a continuación:

- 1) **Cilindro 1:** 9 fibras FT-200-URT
- 2) **Cilindro 2:** 9 fibras FT-400-URT
- 3) **Cilindro 3:** 9 fibras FG-200-LCR
- 4) **Cilindro 4:** 3 fibras FT-200-URT, 3 fibras FT-400-URT, 3 fibras FG-200-LCR

Los resultados mostraron que los tres tipos de fibras ópticas utilizadas eran resistentes al proceso de fabricación del concreto. Sin embargo, se notó que el tamaño del agregado, específicamente la grava, era el principal factor que causaba un daño en la estructura de las fibras ópticas. En estas condiciones la fibra óptica que presentó mejores resultados en cuanto a la transmisión de la luz fue aquella de diámetro de núcleo de 400 $\mu$ m, es decir, la FT-400-URT, por lo que este resultado previo que dicha fibra óptica fuera utilizada para las pruebas, al igual que la FG-200-LCR con el fin de observar su comportamiento bajo las condiciones de doblamiento y tensión.

---

<sup>23</sup> El proceso de fabricación y especificaciones de los cilindros se indica en otro trabajo de tesis



### 3.2.2 Doblamiento de la fibra óptica

Esta prueba está enfocada en visualizar las pérdidas producidas en la transmisión de la luz debido al doblamiento de la fibra óptica. De manera general la prueba se muestra en la figura 3.2.

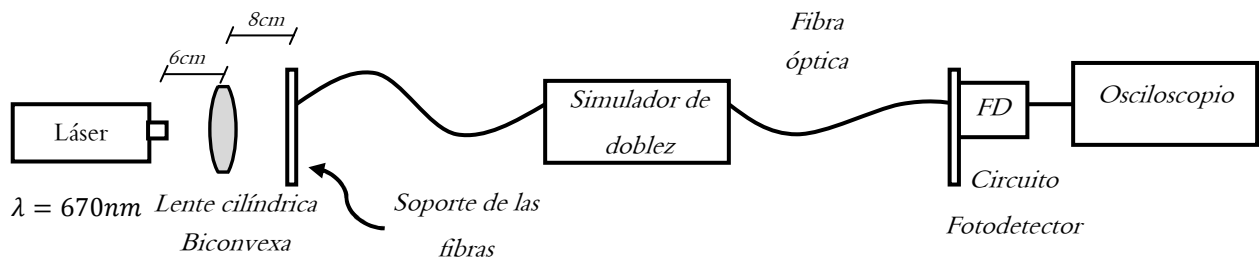


Figura 3.2. Esquema de la prueba de doblamiento en la fibra óptica

El bloque denominado como simulador de doblamiento o doblamiento consiste en un microposicionador micrométrico de la empresa Thorlabs, cuya función era simular el doblamiento en la fibra óptica atravesada por un tramo de madera sujetado a una base fija y otro tramo sujetado a la base del microposicionador respectivamente. La fibra óptica era sometida a desplazamientos micrométricos en dirección perpendicular a su eje, controlados por el microposicionador, de tal manera que al aumentar dicho desplazamiento la fibra tendiera a doblarse con el fin de mantener su continuidad. La figura 3.3 muestra un esquema del simulador de doblamiento y una foto real del implementado en el laboratorio.

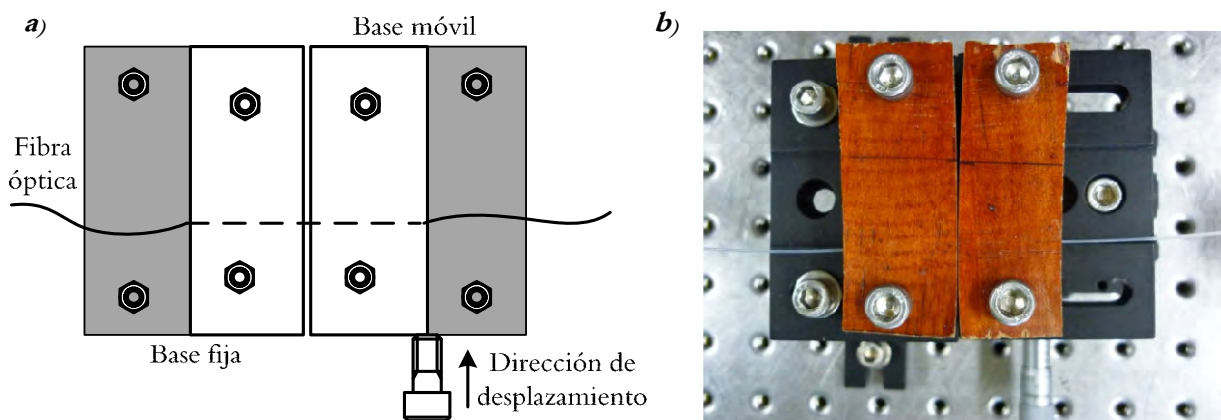


Figura 3.3. a) Esquema del simulador de doblamiento y b) foto real del implementado

La prueba consistió en monitorear la amplitud de la señal transmitida por la fibra óptica cada que el microposicionador se desplazaba una distancia de 0.3175mm en dirección perpendicular al eje de la fibra óptica<sup>24</sup>. La figura 3.4 muestra un esquema de la prueba para distintos desplazamientos ( $d$ ).

<sup>24</sup> Resolución debida a la escala del microposicionador graduada en pulgadas, donde 0.3175mm corresponden a 1/80''

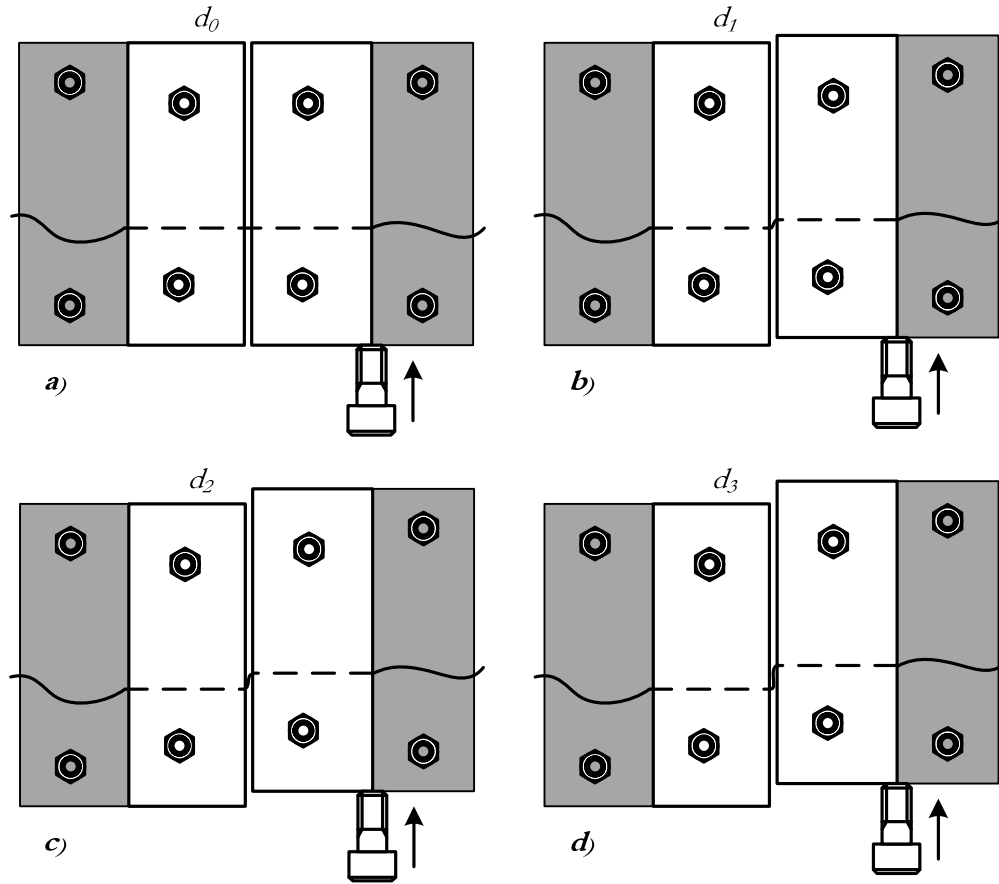


Figura 3.4. Esquema de la prueba de doblamiento para distintos valores de desplazamiento ( $d$ )

Como se puede observar en la figura 3.4, la fibra óptica tiende a doblarse al tratar de mantener su continuidad, el doblamiento de la fibra óptica genera pérdidas por efectos de radiación. Los resultados promedio obtenidos para diferentes desplazamientos ( $d$ ) probando dos tipos de fibras ópticas se muestran en el anexo A.4.

Los resultados muestran que la amplitud de la señal decrece con una razón muy pequeña respecto al desplazamiento que ocasiona el doblamiento, sin embargo ésta disminución es lo suficiente como para visualizarla en el osciloscopio. La figura 3.5 muestra la pérdida promedio en la potencia de la luz transmitida por la fibra óptica debido al doblamiento antes de que la fibra óptica se quiebre y/o rompa. Es claro notar de las graficas que las pérdidas en la transmisión son muy pequeñas, sin embargo, para el caso de la fibra óptica FT-400-URT con  $AN = 0.48$ ,  $\theta_a = 28.6^\circ$  resultados similares fueron obtenidos en [5] para una fibra 3M FG-050-GLA con  $AN = 0.3513$  y  $\theta_a = 20.57^\circ$  donde las pérdidas resultaron menores a 1 dB.

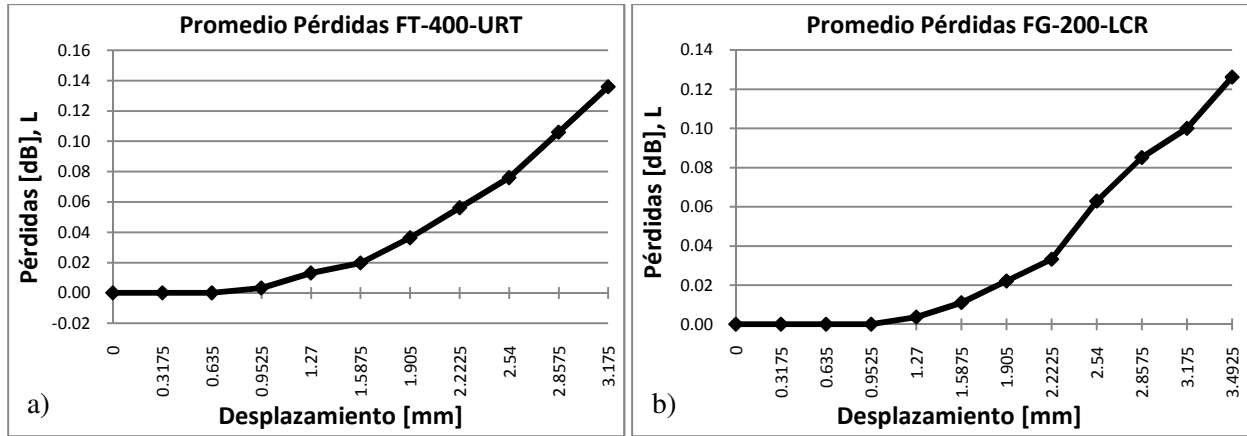


Figura 3.5. Pérdidas promedio  $L$  de la señal de salida vs desplazamiento  $d$  para las fibras ópticas FT-400-URT (a) y FG-200-LCR (b)

Sin embargo, para el caso de la fibra FG-200-LCR de  $AN = 0.22$ ,  $\theta_a = 12.7^\circ$  las pérdidas en la transmisión de la luz resultaron mucho menores comparadas con las obtenidas en [5] para una fibra óptica de iguales características  $AN = 0.22$  y  $\theta_a = 12.7^\circ$  donde las pérdidas alcanzaban valores de hasta 15dB. De acuerdo con [5] el utilizar una fibra óptica con un ángulo de aceptación mucho menor al ángulo de lanzamiento de la fuente genera la excitación de mas modos de alto orden en el núcleo de la fibra óptica haciéndola más sensible a las variaciones en la interfaz núcleo-revestimiento y por lo tanto más susceptible a las pérdidas por efectos de radiación.

Con base en lo anterior, la fibra óptica FG-200-LCR debió mostrar pérdidas mayores debido a que su ángulo de aceptación es menor al de la fibra óptica FT-400-LCR, excitándose mayor cantidad de modos de alto orden para la misma fuente de luz. Sin embargo, se considera que durante la prueba el doblamiento de la fibra FG-200-LCR no se realizo adecuadamente ya que debido al tamaño de su diámetro, ésta no se pudo sostener completamente en el interior de la base de madera deslizándose cada que aumentaba el desplazamiento.

### 3.2.3 Tensión de la fibra óptica en el concreto

La prueba de tensión en la fibra óptica tuvo como objetivo cuantificar y visualizar el comportamiento de la fibra óptica bajo condiciones de tensión o estiramiento, es decir, evaluar las pérdidas en la transmisión de la luz debido a la tensión en la fibra óptica. La figura 3.6 muestra un esquema de la prueba de tensión realizada a los dos tipos de fibras ópticas que se han manejado.

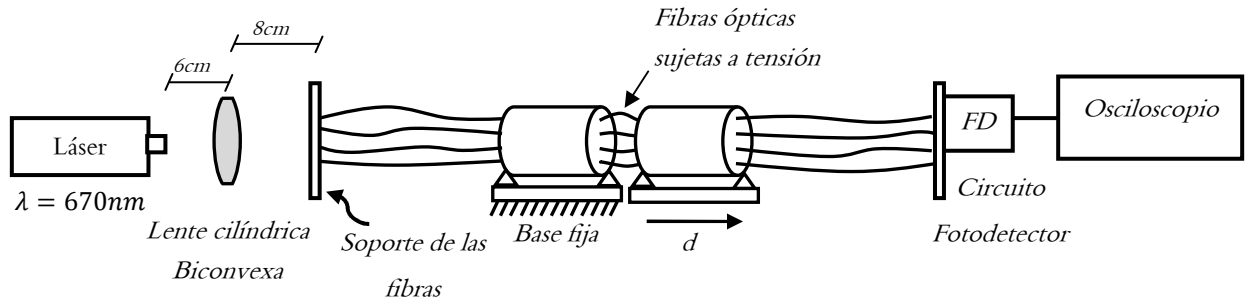


Figura 3.6. Esquema de la prueba de tensión en las fibras ópticas

Se utilizaron dos cilindros de concreto con fibras ópticas integradas y unidos por medio de éstas. La prueba consistió en desplazar uno de los cilindros en dirección paralela al eje de la fibra óptica de manera que las fibras se tensaran y así registrar los valores de amplitud de las 4 fibras ópticas integradas en el concreto. Los desplazamientos tuvieron una resolución de 0.3175mm y se realizó con ayuda del microposicionador Thorlabs. Los resultados promedio obtenidos en forma de gráficas se muestran en la figura 3.7. Las tablas correspondientes a este experimento se muestran en el anexo A.5.

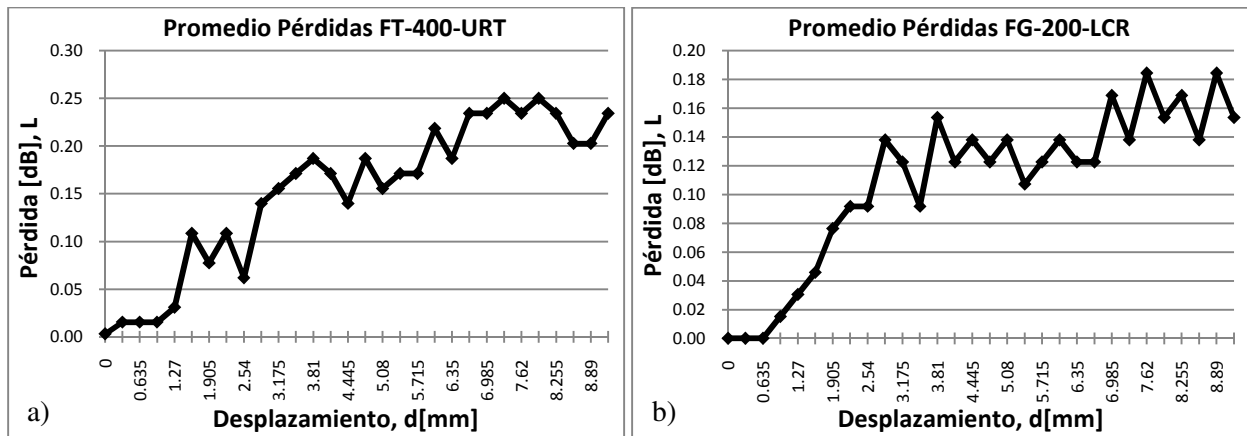


Figura 3.7. Pérdidas promedio  $L$  de la señal de salida vs desplazamiento  $d$  para las fibras ópticas FT-400-URT (a) y FG-200-LCR (b)

Como se puede observar las pérdidas en la transmisión de la luz crecen conforme el desplazamiento aumenta, para el caso de la fibra FT-400-URT, las pérdidas al inicio son muy pequeñas hasta un desplazamiento de 1.27mm, donde las pérdidas comienzan a aumentar aunque con ciertas oscilaciones. Para el caso de la fibra óptica FG-200-LCR las pérdidas en un inicio aumentan de manera lineal hasta un cierto desplazamiento donde comienzan a generarse oscilaciones en la amplitud.

En un principio la fibra óptica comienza a tensarse y las pérdidas se hacen presentes de manera lineal. Sin embargo conforme el desplazamiento aumenta se puede observar que aparecen oscilaciones en las gráficas. De acuerdo con [2] se cree que estas oscilaciones son producto de la fricción presente en la fibra con el concreto debido al deslizamiento de la fibra óptica a través del mismo. Al igual que [2], se noto que la fibra óptica se deslizaba a través del concreto, por lo que las oscilaciones en las gráficas de la figura 3.7 se creen debidas a la fricción entre la fibra óptica y el concreto. Éste resultado es importante ya que nos muestra que la fibra óptica no se adhiere completamente al concreto y es posible que se deslice a través de él.

Por lo tanto, en las gráficas existen dos puntos importantes, el primero donde la fibra óptica esta efectivamente sometida a tensión y presenta pérdidas en la transmisión debidas únicamente a la tensión (elongación), y segundo cuando la fibra óptica ya no se encuentra totalmente sujeta por el concreto y empieza a deslizarse, haciéndose notar por las oscilaciones presentes en las gráficas.

### **3.3 Análisis de los resultados preliminares**

Las pruebas preliminares realizadas tuvieron como objetivo principal demostrar el comportamiento de la fibra óptica bajo condiciones de integración en el concreto, doblamiento, y tensión con el fin de cuantificar las pérdidas producidas por estas situaciones. Con base en estos resultados es posible definir que fibra óptica es la mejor opción para las pruebas a realizar en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM con las vigas de concreto.

La prueba de doblamiento de la fibra óptica mostró que aunque las pérdidas resultaron pequeñas, es posible detectarlas con el osciloscopio. Además se encontró que para la fibra óptica FT-400-URT existen dos puntos en los que las pérdidas aumentan, el primero donde la fibra óptica se quiebra parcialmente y las pérdidas alcanzan los 20dB habiendo aún transmisión de la luz y el segundo donde la fibra óptica se rompe completamente y la transmisión de la luz es nula, mientras que para la fibra óptica FG-200-LCR ésta simplemente se quiebra y la transmisión de la luz es nula. Esta conclusión es importante ya que la fibra FT-400-URT nos permite tener un rango mayor de medición aun cuando la fibra óptica se quiebre.

Por otra parte la prueba de tensión en la fibra óptica demostró dos factores importantes. Las pérdidas por tensión en la fibra óptica son visibles con el osciloscopio y presentan una variación lineal hasta un cierto desplazamiento en ambos tipos de fibras ópticas. Sin embargo posteriormente a este punto las gráficas presentan oscilaciones debidas a la fricción ocasionada por el deslizamiento de la fibra óptica en el concreto, razón por la cual las pérdidas parecen acercarse a un valor asintótico aun al seguir aumentando el desplazamiento que ocasionaba la tensión en las fibras ópticas, es decir, éstas simplemente se deslizan por el concreto sin que las pérdidas aumenten.

De la figura 3.8b) se puede observar que la región sujeta a tensión, es mayor en la fibra FG-200-LCR que en la FT-400-URT, esto es lógico ya que al tener un diámetro mayor la fibra FT-400-URT, la fuerza necesaria para tensarla es mucho mayor y por consecuencia el concreto no logra sujetarla, ocasionando que se deslice antes que la FG-200-LCR. Por otra parte se observa que las oscilaciones debidas al deslizamiento son mayores en la fibra óptica FG-200-LCR, por lo que se puede concluir que el deslizamiento a través del concreto le afecta más a la fibra FG-200-LCR.

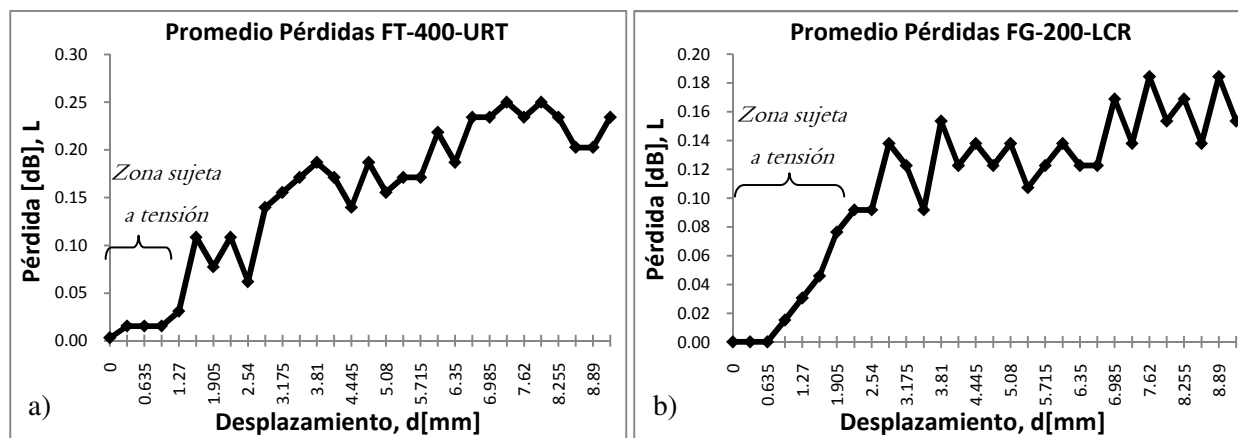


Figura 3.8. Zonas importantes en las gráficas de la prueba de tensión de la fibra óptica

a) FT-400-URT, b) FG-200-LCR

Es importante señalar que en resultados previos a la prueba de tensión, se encontró que el deslizamiento de la fibra óptica se llevaba a cabo cuando la fibra óptica salía del concreto sin ninguna inclinación respecto a la superficie del concreto, mientras que aquellas fibras ópticas que salían del concreto con algún grado de inclinación tendían a romperse justo en ese punto sin dar lugar a que la fibra óptica se deslizará. Por lo que se puede concluir que la fibra óptica se desliza únicamente cuando ésta sale del concreto con una cierta inclinación respecto a la superficie del concreto.

Con base en estos resultados es claro notar que el efecto de doblamiento y tensión en la fibra óptica producen pérdidas en la transmisión de la señal, dichas pérdidas son notorias con ayuda del osciloscopio y pueden indicar la presencia de alguna grieta. De los dos tipos de fibras ópticas utilizadas en las pruebas preliminares, se concluye que la mejor opción es la fibra óptica FT-400-URT, por las siguientes razones:

1. Mayor resistencia a las condiciones de fabricación de los elementos de concreto
2. A diferencia de la fibra FG-200-LCR su quebramiento no representa que la transmisión de la luz se interrumpa completamente
3. El deslizamiento en el concreto le afecta en menor magnitud que a la fibra FG-200-LCR

### **3.4 Definición del método propuesto**

El sistema de monitoreo propuesto consiste en un arreglo de fibras ópticas integradas en vigas de concreto, cuya característica de sensado se basa en las variaciones de la potencia transmitida por las fibras ópticas ocasionadas por pérdidas en la transmisión de la luz. El sistema está basado en el monitoreo de las pérdidas en la fibra óptica ocasionadas por la carga aplicada a la viga de concreto.

La hipótesis que se plantea es que debido a la carga aplicada sobre la viga de concreto, la fibra óptica sufrirá daño en su estructura debido a fenómenos como dobleces, tensión y compresión, que producirán pérdidas en la transmisión de la luz, tal y como lo corroboran las pruebas preliminares. El efecto conjunto de estos fenómenos serán indicios de que la masa de concreto está sufriendo daños debido a la carga aplicada y así predecir la aparición de una posible grieta.

Para esto, se integrarán un total de 4 fibras ópticas por viga de concreto colocadas en posiciones tales que correspondan a las secciones donde la viga sufre de compresión y tensión descritas en el tema 2.3 del capítulo 2. Las fibras ópticas corresponderán al tipo FT-400-URT.

El arreglo del sistema será tal y como se realizaron las pruebas preliminares utilizando un láser de  $\lambda = 670nm$ , una lente cilíndrica biconvexa, soportes de madera para sostener las fibras ópticas, fotodiodos FD-263 y el osciloscopio Tektronix TDS2024B. La prueba se realizó en el Laboratorio

de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, donde la carga aplicada se obtuvo de la máquina universal con una velocidad constante.

La metodología del sistema propuesto consistirá en monitorear los cuatro canales del osciloscopio al mismo tiempo, correspondientes a cada una de las cuatro fibras ópticas integradas en la viga, tomando lecturas de la amplitud de la señal de salida cada 50Kg de carga aplicada con una velocidad constante. Al final de la prueba se obtendrán diversas tablas para cada una de las vigas probadas y monitoreadas con este método. El objetivo del sistema propuesto es determinar si es posible predecir el daño en la viga de concreto de acuerdo al comportamiento en la transmisión de la luz por las 4 fibras ópticas.

### 3.5 Procedimiento de construcción de los elementos de concreto (muestras)

La construcción de los elementos de concreto, en este caso vigas rectangulares de concreto, se llevó cabo con la construcción de 2 moldes de madera de medidas interiores mostradas en la figura 3.9.

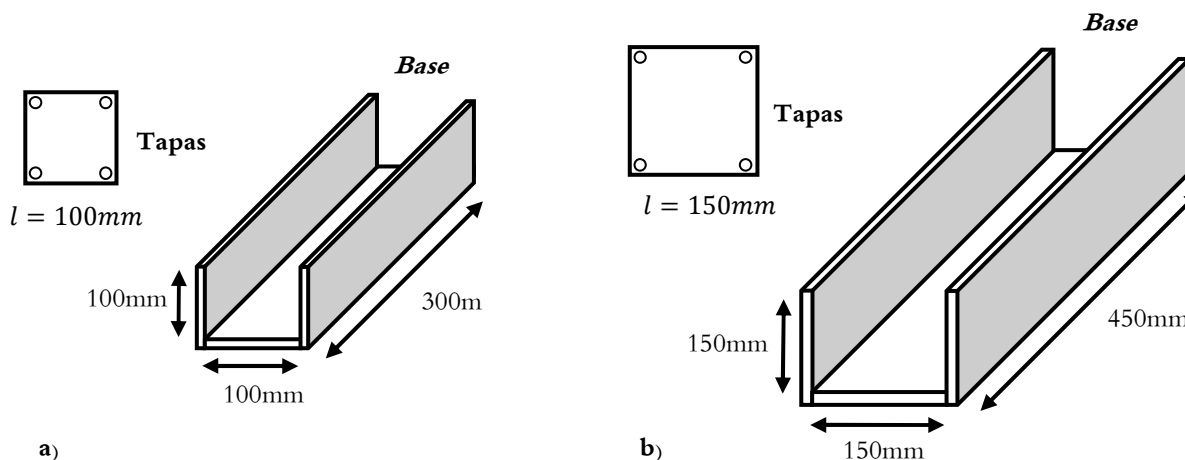


Figura 3.9. Dimensiones de los moldes de madera utilizados para la construcción de las vigas de concreto

Los moldes de madera consistían de una base fija rígida y dos tapas retirables de manera que la viga pudiera desmontarse fácilmente una vez que tuviera las fibras ópticas en su interior. Cada tapa estaba sujeta mediante 4 pijas (tornillos) de 1.5" cada una. Las tapas y las bases fueron construidas con madera de 3/4".



Previamente al llenado de los moldes de madera, éstos fueron engrasados interiormente con aceite para automóvil, con el fin de que el concreto no se adhiriera a la madera y poder desmontar las vigas al día siguiente de su construcción. Para lograr la forma rectangular de las vigas, los moldes fueron llenados con la mezcla de concreto hasta una altura tal correspondiente al lado menor de la base de las vigas. Figura 3.10.

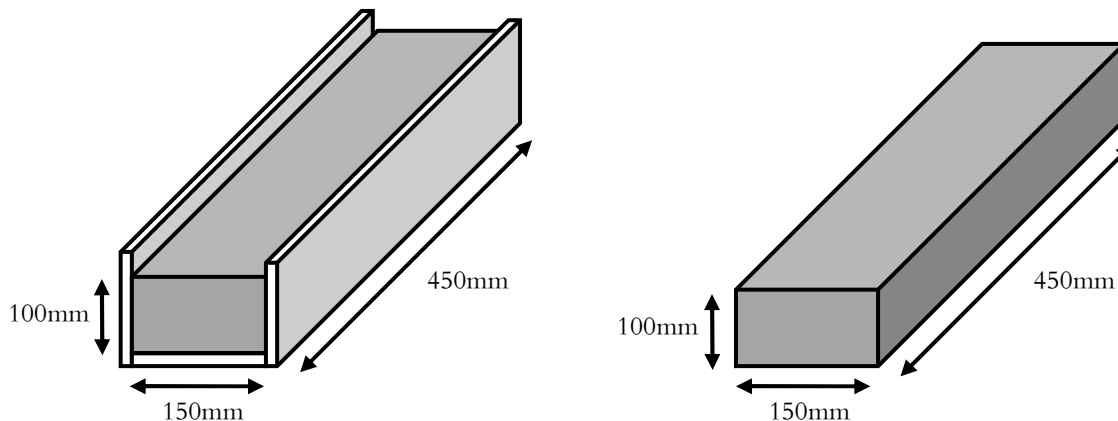


Figura 3.10. Forma de construcción para obtener las vigas rectangulares

### 3.5.1 Materiales utilizados para la mezcla de concreto. Cemento, Arena, Grava

Los materiales utilizados para la mezcla de concreto fueron cemento, arena, grava y agua. Se utilizó cemento marca Tolteca tipo Portland Compuesto 30R RS con las siguientes características:

- Resistencia mínima a 3 días  $204 \text{ Kg/cm}^2$
- Resistencia mínima a 28 días  $306 \text{ Kg/cm}^2$
- Tiempo de fraguado: Inicial: 45 minutos (mínimo)  
Final: 600 minutos (máximo)
- Expansión por ataque de sulfatos a 1 año 10%

De acuerdo a las especificaciones del fabricante este tipo de cemento otorga mayor protección a la corrosión metálica por lo que es recomendable para ambientes agresivos de sulfatos como aguas negras, aguas marinas y suelos salitrosos. Además resulta adecuado para obras de concreto armado en las que se requiere un endurecimiento más rápido de lo normal [3].

Por su parte los agregados empleados para la mezcla fueron arena común de construcción y grava de tamaño de 3/4", elegida conforme a la resistencia deseada para el concreto y porque dicho tamaño es el más empleado en la construcción en general.

### 3.5.2 Diseño de la mezcla de concreto

El diseño de la mezcla se realizó por el método de volumen proporcionado por [4], el cual consiste en determinar los volúmenes necesarios de cada uno de los materiales que conforman el concreto (cemento, arena, grava y agua) a partir de un volumen de referencia del cemento, de acuerdo a la resistencia deseada y al tamaño de grava a utilizar. Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Relaciones de volumen para el diseño de la mezcla. Método por volumen [4]

Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Tamaño de grava 3/4"			
	Cemento	Arena	Grava	Agua
160.62	1	2.35	2.83	0.96
210.56	1	2.07	2.5	0.85
280.46	1	1.86	2.21	0.7

Entonces planteando un volumen inicial  $V_{cemento}$  conocido, es posible determinar el volumen de los demás materiales, utilizando un tamaño de grava de 3/4" para la resistencia que se desee.

En este caso se eligió trabajar con un tamaño de grava de 3/4" debido a que es el tamaño de grano más utilizado en la construcción y una resistencia de  $f'c = 210.56 \text{ Kg/cm}^2$ . Utilizando un recipiente rectangular, se determinó el volumen que ocupan 2Kg de cemento. Primero se obtuvo la altura alcanzada por los 2Kg de cemento y de ahí se obtuvo un volumen de referencia del cemento para calcular los volúmenes correspondientes de la arena, grava y agua. Figura 3.11.

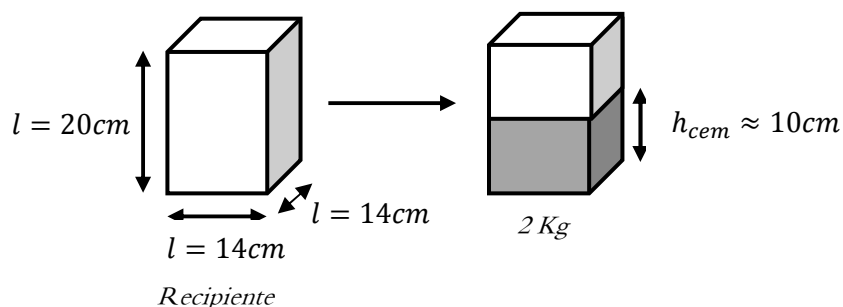


Figura 3.11. Dimensiones del molde utilizado y obtención del volumen que ocupan 2Kg de cemento

Entonces, conociendo la  $h_{cem} = 10cm$ , se obtiene el volumen de referencia del cemento.

$$V_{cem} = l^2 h_{cem}$$

$$V_{cem} = (14cm)^2 (10cm)$$

$$V_{cem} = 1960cm^3$$

Para determinar las cantidades de arena, grava y agua, se calculó la altura a la cual debería de llenarse el recipiente de acuerdo a las relaciones de volumen mostrados en la tabla 3.1.

**a) Arena**

$$V_{arena} = 2.07V_{cem}$$

$$V_{arena} = 2.07(1960cm^3) = 4057.2cm^3$$

$$\therefore h_{arena} = \frac{V_{arena}}{l^2} = \frac{4057.2cm^3}{(14cm)^2} = 20.7cm$$

**b) Grava**

$$V_{grava} = 2.5V_{cem}$$

$$V_{grava} = 2.5(1960cm^3) = 4900cm^3$$

$$\therefore h_{grava} = \frac{V_{grava}}{l^2} = \frac{4900cm^3}{(14cm)^2} = 25cm$$

**c) Agua**

$$V_{agua} = 0.85V_{cem}$$

$$V_{agua} = 0.85(1960cm^3) = 1666cm^3$$

$$\therefore h_{agua} = \frac{V_{agua}}{l^2} = \frac{1666cm^3}{(14cm)^2} = 8.5cm$$

Llenando el molde utilizado hasta una altura correspondiente para cada caso, es como se determinaron las cantidades para la conformación de la mezcla. Cabe resaltar que estas cantidades son las suficientes únicamente para la construcción de una viga de 100mm x 150mm x 450mm, sin que sobre o falte mezcla.

### 3.5.3 Integración y distribución de las fibras ópticas en las vigas de concreto

Para la integración de las fibras ópticas en el concreto, primero se necesitó perforar las tapas retirables de los moldes con el fin de que las fibras ópticas se sostuvieran dentro del concreto a una altura deseada. La distribución de las fibras ópticas en el concreto se basó en los fenómenos presentes en las vigas, es decir, para el caso de la parte superior de la viga se colocó únicamente una fibra óptica, (1 en la figura 3.12b), debido a que en esta zona el área de compresión para el caso de las vigas subreforzadas es muy pequeña, por lo tanto no era necesario colocar más de una fibra óptica. Por esta misma razón en la parte inferior de la viga, se colocaron 3 fibras ópticas, (2, 3, y 4 en la figura 3.12 b), debido a que las grietas en esta zona se hacen presente con mayor magnitud en el caso de una viga subreforzada, figura 3.12 a).

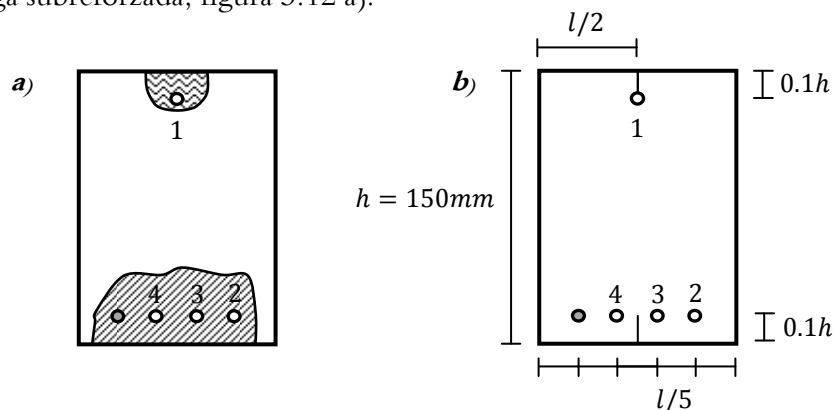


Figura 3.12. Vista transversal de la viga a) zonas de compresión y tensión b) distribución de las fibras ópticas

La fibra 1 se colocó a una altura de  $0.1h$  de la base superior de la viga, donde  $h$  es la altura total de la viga, esta altura es la correspondiente a la cual se coloca comúnmente el refuerzo de acero. Las fibras 2, 3 y 4 igualmente se colocaron a una altura de  $0.1h$  de la base inferior, altura a la cual se decidió colocar una varilla de  $1/8''$  con el fin que la viga no colapsara precipitadamente. La separación entre las fibras ópticas se determinó de acuerdo al lado  $l$  de la base de la viga, figura 3.12 b). Por otra parte las fibras ópticas 1, 3 y 4, fueron tensadas una vez integradas en el concreto de tal manera que se mantuvieran de forma paralela a las superficies superior e inferior de la viga. La fibra óptica 2 se colocó en forma de zigzag, a manera de visualizar el comportamiento descrito en [2], sujetándola con pedazos de alambre metálico, retirados junto con el molde de madera al otro día de la construcción de la viga. La figura 3.13 muestra la distribución de las fibras ópticas 2, 3 y 4.

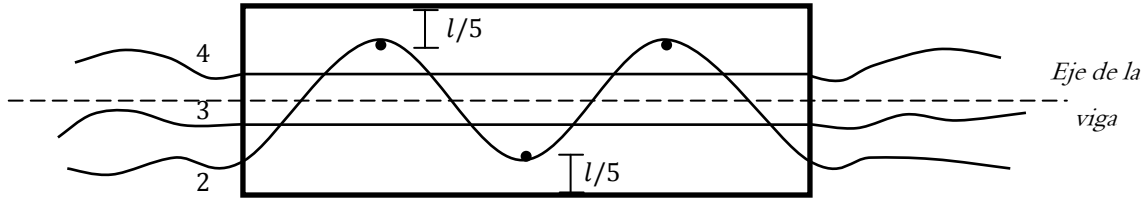


Figura 3.13. Vista inferior de la viga. Distribución de las fibras ópticas 2, 3 y 4.

### 3.6 Montaje del experimento

En esta sección se describe el montaje del experimento en el Laboratorio de Materiales. La figura 3.14 muestra un esquema de los elementos utilizados durante la prueba con una configuración de carga a  $1/3$  y  $2/3$  de la distancia de los apoyos.

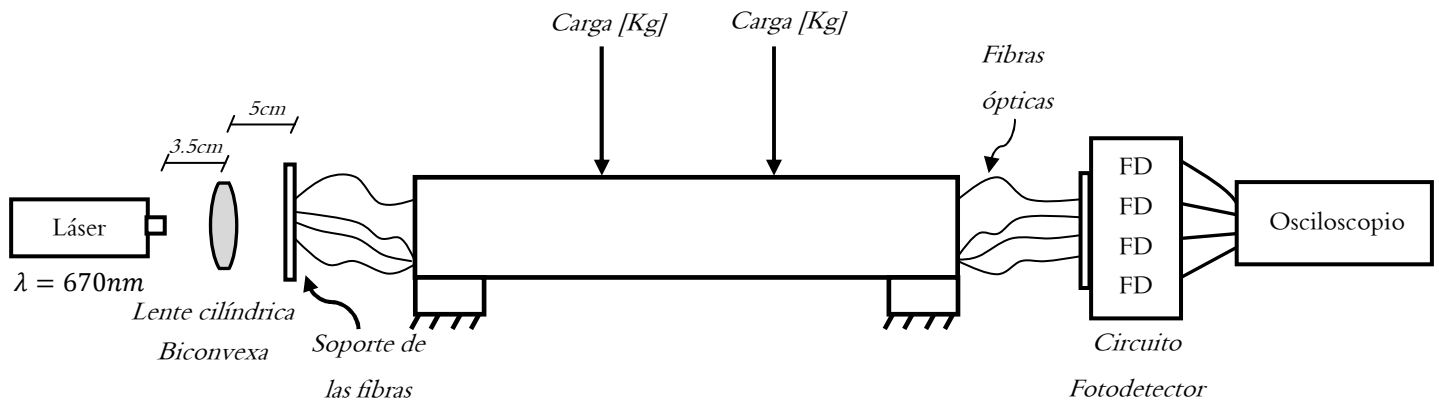


Figura 3.14. Esquema de la prueba realizada en el Laboratorio de Materiales. Arreglo experimental

El arreglo consiste en un láser, una lente cilíndrica biconvexa, un soporte de madera para sujetar las 4 fibras ópticas FT-400-URT, 4 fotodiodos FD-263 y un osciloscopio de 4 canales marca Tektronix TSD2024B.

#### 3.6.1 Descripción y consideraciones del montaje experimental

Debido al tipo de prueba realizada, todos los elementos tuvieron que ser montados en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para esto se utilizaron dos placas ópticas móviles de  $300\text{mm} \times 250\text{mm}$  donde se montaron por un lado la parte transmisora: el láser, la lente cilíndrica biconvexa y el soporte de las fibras ópticas, mientras que en la otra placa, la parte receptora: los circuitos fotodetectores y sus salidas hacia el osciloscopio.

Durante el montaje de los elementos, se fijaron ambas placas ópticas a la base de madera que soportaba la viga de concreto y se trato de ajustar todos los elementos de la mejor manera. Las fibras ópticas fueron preparadas por ambos extremos, cortándolas y desprendiendo la cubierta de plástico en alrededor de 1cm. Una vez instalado todos los elementos, la prueba consistió en aumentar la carga proveniente de la maquina universal con una velocidad de carga constante y tomar los valores de amplitud mostrados en el osciloscopio para las 4 fibras ópticas cada 50Kg de carga. La carga fue aplicada a 1/3 y 2/3 de la distancia de los apoyos y el láser se utilizó de forma continua, es decir, no se aplico ninguna señal para modularlo. La figura 3.15 es una foto del arreglo experimental montado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

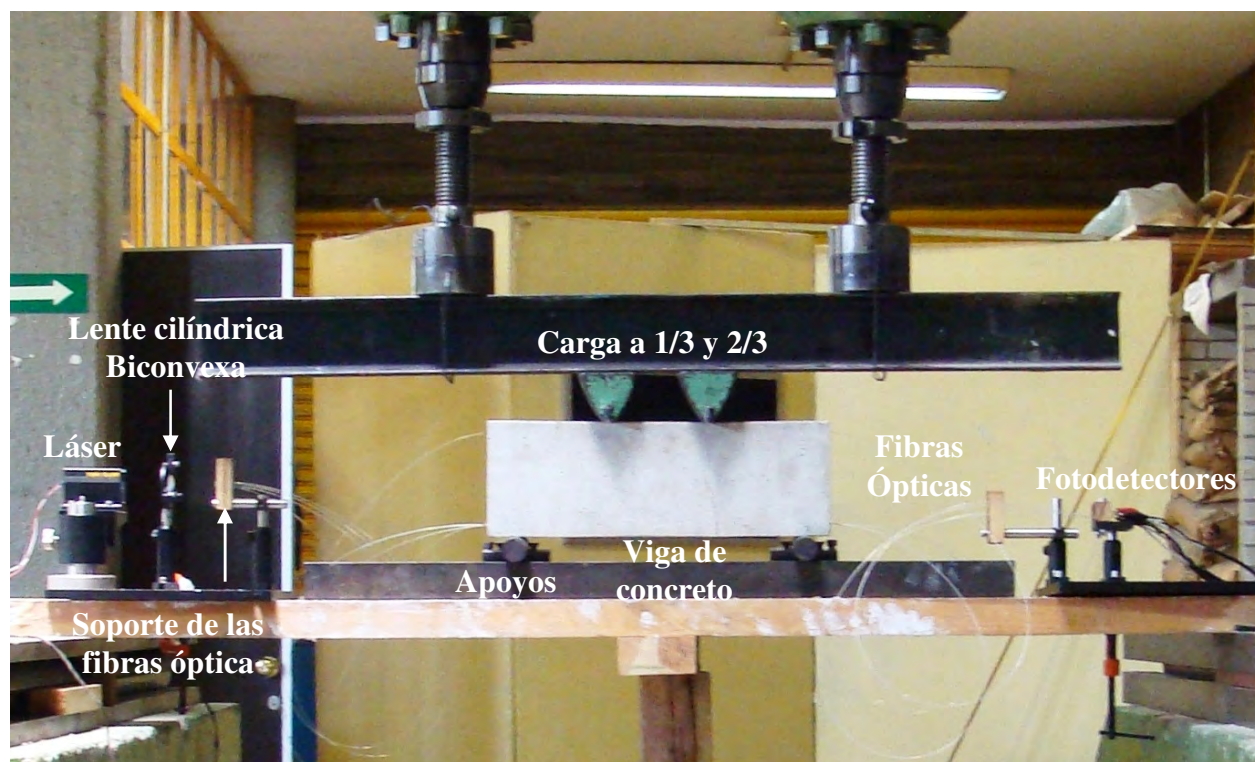


Figura 3.15. Foto real del arreglo experimental montado en el Laboratorio de Materiales FI, UNAM.

### 3.7 Conclusiones

1. Las pérdidas excesivas en la transmisión de la luz debido a daños o modificaciones en la estructura física de la fibra óptica fueron corroboradas experimentalmente durante las pruebas preliminares de doblamiento y tensión en la fibra óptica.
2. El doblamiento de la fibra óptica genera una pérdida pequeña en la transmisión de la luz (menor a 1 dB) hasta el punto en el que la fibra óptica se fractura y la pérdida aumenta drásticamente (más de 20dB). Las pérdidas por doblamiento se empiezan hacer presentes a partir de un desplazamiento aproximado de 1mm.
3. Las pérdidas por efecto de la tensión en la fibra óptica presentan una característica lineal hasta el punto en el que las fibras ópticas se deslizan a través del concreto. El deslizamiento de la fibra genera oscilaciones en la amplitud de la señal y las pérdidas se acercan a un valor asintótico.
4. La elección de la fibra óptica FT-400-URT para las pruebas en el Laboratorio de Materiales se baso en tres puntos principales: su resistencia al proceso de construcción de los elementos de concreto, la característica de que al fracturarse aun existía transmisión de la luz y el hecho de que las oscilaciones debido al deslizamiento a través del concreto eran menores respecto a la fibra FG-200-LCR.
5. La ubicación, distribución y orientación de las fibras ópticas dentro de la viga de concreto se baso en los fenómenos ocurridos en la viga de concreto durante la prueba de flexión simple. Para el caso de las vigas subreforzadas utilizadas, la mayoría de las fibras ópticas fueron colocadas en la zona sujeta a tensión.

### 3.8 Referencias

- [1] Montgomery, D.C. Design and analysis of experiments, 5th edition, John Wiley and Sons, 2001.
- [2] Tang, T.-G., Chen, C.-H., Liu, H.-W., Application of distributed optical fiber sensors into crack monitoring of dam's foundation, Chinese Journal of Sensors and Actuators, pp. 2357-2360, 2007.
- [3] Corporación Moctezuma, Cemento Portland Compuesto CPC 30R/RS/BRA <[http://www.cmoctezuma.com.mx/prod\\_cem04.htm](http://www.cmoctezuma.com.mx/prod_cem04.htm)>
- [4] Método de volumen para la elaboración de concreto, Laboratorio de Materiales, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- [5] Olson, N., Leung, C.K.Y., Meng, A., Crack sensing with a multimode fiber: Experimental and theoretical studies, Sensors and Actuators, 2005.

# Capítulo 4

## Discusión de los resultados

---

### 4.1 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos durante la prueba en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, consisten en una serie de datos que muestran la relación entre la amplitud de la luz transmitida por las múltiples fibras ópticas y la carga aplicada a las vigas.

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 3 en el tema de diseño estadístico de los experimentos, el tamaño de la muestra necesario para un nivel de confianza de 95% y una precisión de  $0.7\sigma$ , debía ser un total de 8 muestras o vigas a probar. Sin embargo por motivos de material, tiempo y espacio disponibles, la prueba en el Laboratorio de Materiales consistió únicamente en probar 3 vigas de concreto con las siguientes dimensiones.

1. **Viga 1:** 100 x 150 x 450 mm
2. **Viga 2:** 100 x 150 x 450 mm
3. **Viga 3:** 70 x 100 x 300 mm

La viga 1 y 2 tenían integradas 4 fibras ópticas FT-400-URT con la misma distribución espacial, mientras que la viga 3 tenía integradas únicamente 3 fibras ópticas FT-400-URT. La distribución de las fibras ópticas se llevó a cabo conforme a lo expuesto en el capítulo 3.

Los resultados mostrados a continuación se presentan en forma de gráficas, para cada una de las fibras ópticas integradas en cada una de las vigas de concreto. Las gráficas muestran la respuesta en amplitud normalizada ( $A$ ) de la luz transmitida por las fibras ópticas en relación con la carga aplicada ( $C$ ) sobre las vigas. Debido a que las variaciones en las gráficas son muy pequeñas se ha agregado una



línea de tendencia denominada media móvil de 6 períodos, la cual es un método utilizado en la estadística para analizar un conjunto de datos por medio de una serie de promedios. La media móvil se forma a partir de un conjunto de números en donde el primer número es el promedio de un subconjunto de los datos originales correspondiente al número de períodos anteriores, en este caso 6, así el primer punto de la línea de tendencia media móvil es el promedio de los datos 1 al 6 de los datos originales. Este método es utilizado en la interpretación y análisis de datos cuando estos presentan múltiples fluctuaciones y/o variaciones, el efecto de la media móvil es suavizar estas variaciones mostrando la tendencia general de los datos aun si estos presentan variaciones muy pequeñas [1]. La figura 4.1 muestra los resultados correspondientes a la viga 1.

1) **Viga 1: 100 x 150 x 450 mm**

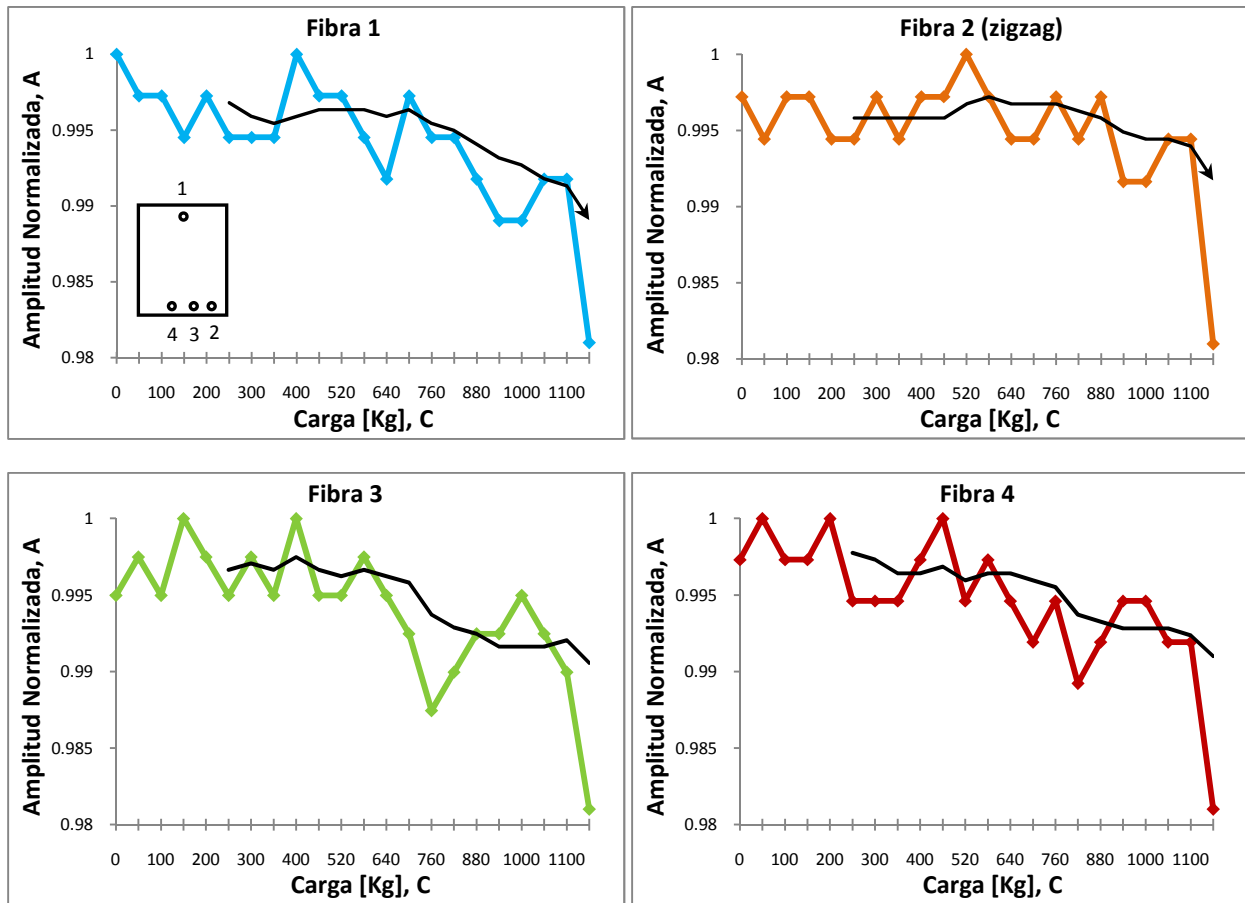


Figura 4.1. Resultados correspondientes a la viga 1. Amplitud normalizada (A) de la señal de salida en función de la carga aplicada (C) a la viga en Kg

Observando la línea de tendencia en las graficas de la figura 4.1 es posible notar que en un principio la amplitud normalizada ( $A$ ) se mantiene casi constante hasta un cierto punto de carga aplicada ( $C$ ) donde empieza a disminuir. Relacionando el comportamiento de la línea de tendencia con los fenómenos presentes en la viga durante la flexión simple se observó que la amplitud normalizada ( $A$ ) empieza a disminuir alrededor del valor de carga ( $C$ ) para la cual las grietas en el concreto sujeto a tensión empezaron a hacerse visibles. Como se mencionó en el capítulo 2 figura 2.16, la gráfica carga-deflexión de una viga de concreto, muestra las principales etapas que sufre el concreto en la prueba de flexión simple; 1. Agrietamiento del concreto en tensión, 2. Fluencia del acero 3. Carga máxima y 4. Aplastamiento o colapso [2].

En un inicio, el comportamiento de la viga es elástico hasta el momento en que aparecen las primeras grietas en la zona sujeta a tensión [2]. En el caso de la viga 1, el agrietamiento del concreto en tensión se observó a una carga alrededor de los 800Kg. De las gráficas mostradas en la figura 4.1, se puede observar que la amplitud normalizada ( $A$ ) de las fibras ópticas 3 y 4 presentan un pico de atenuación alrededor de los 800Kg de carga, que se cree ocasionado por la aparición de las primeras grietas y la ruptura parcial del concreto en la zona de tensión, justo en ese punto la línea de tendencia deja de ser constante y empieza a decrecer. La fibra óptica 2, ubicada también en la zona de tensión al igual que las fibras ópticas 3 y 4, no reflejó ningún pico de atenuación alrededor de los 800Kg, de hecho el comportamiento observado en esta fibra óptica no fue el esperado conforme a lo planteado en [4], ya que se esperaba tener una mayor cantidad de pérdidas por el simple hecho de haber sido colocada en forma de zigzag y presentar una cierta inclinación ante las grietas. No obstante se encontró que una posible causa de esto fue que la fibra óptica no resultó adecuadamente colocada en el interior del concreto ya que la inclinación de la fibra óptica se dio en zonas donde no era propenso que las grietas aparecieran, es decir, no se tuvo una inclinación de la fibra óptica en la zona de estudio o zona media de la viga de concreto.

Una vez agrietado el concreto, la tensión en el acero se incrementa rápidamente apenas al aumentar la carga, hasta que alcanza su valor de fluencia. Posteriormente la viga alcanza su carga máxima y finalmente el colapso [2]. En el caso del experimento realizado, la carga máxima alcanzada por las vigas era indicada por la maquina universal. Para la viga 1, la carga máxima se alcanzó alrededor de los 950Kg, en este punto se considera que la resistencia de todo el elemento empieza a disminuir y el colapso es inminente. Las fibra óptica 1 muestra una ligera caída alrededor de los 950Kg.

Finalmente el colapso de la viga se generó de forma súbita, fracturando incluso el acero colocado en la parte inferior de la viga. Por efecto del colapso, las fibras ópticas 1 y 2, se rompieron completamente, mientras que las fibras ópticas 3 y 4 se deslizaron a través del concreto.

Para el caso de la viga 2, cuyas características eran idénticas a la viga 1, su comportamiento resultó similar. El agrietamiento del concreto en tensión se originó alrededor de los 800Kg, la carga máxima alrededor de los 1130Kg y el colapso se produjo en 1240 Kg. La figura 4.2, muestra las gráficas correspondientes a la viga 2.

2) **Viga 2: 100 x 150 x 450 mm**

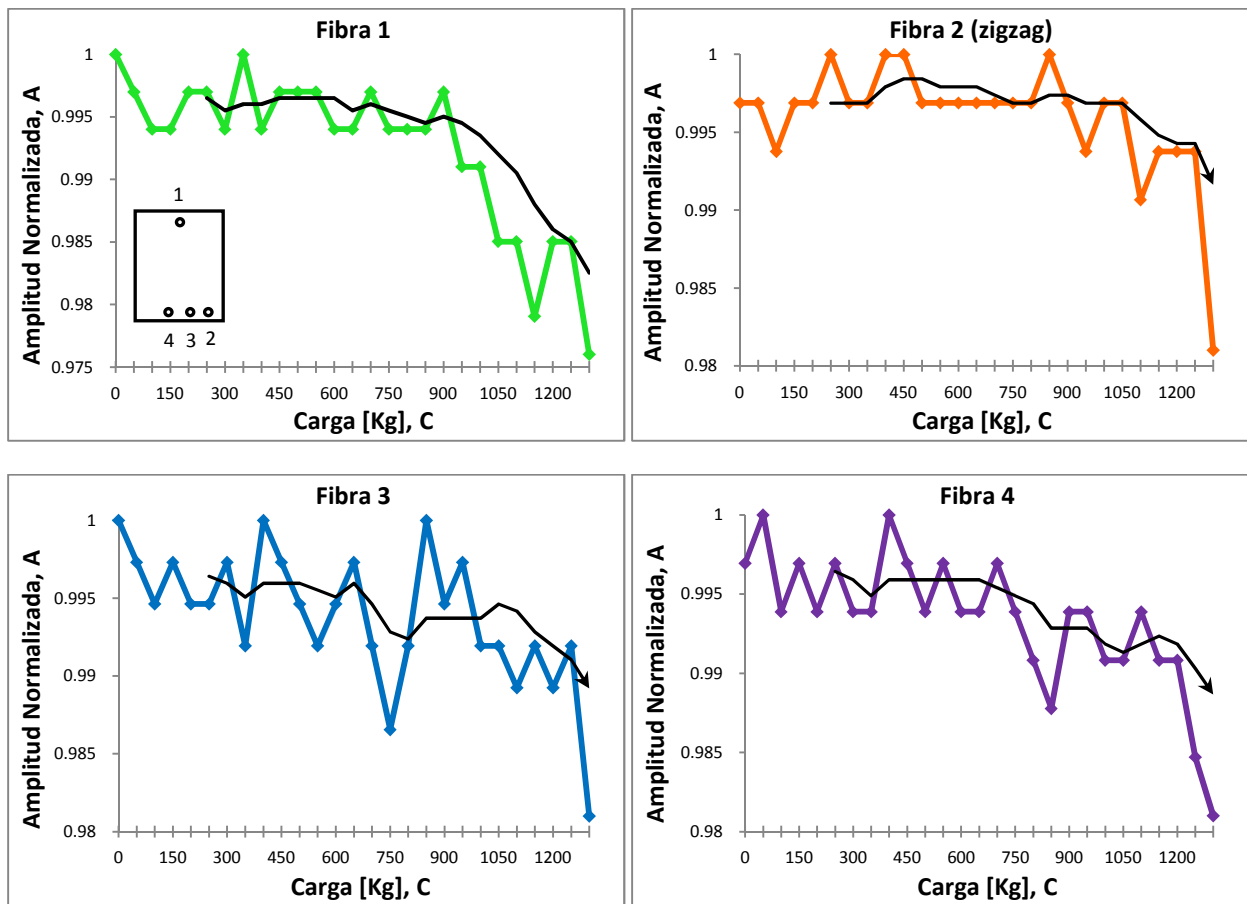


Figura 4.2. Resultados correspondientes a la viga 2. Amplitud normalizada (A) de la señal de salida en función de la carga aplicada (C) a la viga en Kg

Observando nuevamente el comportamiento de la línea de tendencia se nota que la amplitud normalizada (A) se mantiene constante hasta antes del agrietamiento del concreto sujeto a tensión alrededor de los 800Kg de carga. Las gráficas de las fibras ópticas 3 y 4 muestran una caída abrupta

en la amplitud de la luz transmitida alrededor de esta carga, que se cree ocasionada por la aparición de las grietas en el concreto sujeto a tensión, mientras que en la fibra óptica 1, se puede apreciar una caída progresiva en la amplitud normalizada. El colapso de la viga generó que las fibras ópticas 2, 3 y 4 se rompieran, mientras que la fibra óptica 1 simplemente se deslizó.

Por último la viga 3, correspondiente a las dimensiones de 70 x 100 x 300 mm, obtuvo los siguientes resultados mostrados en la figura 4.3.

### 3) Viga 3

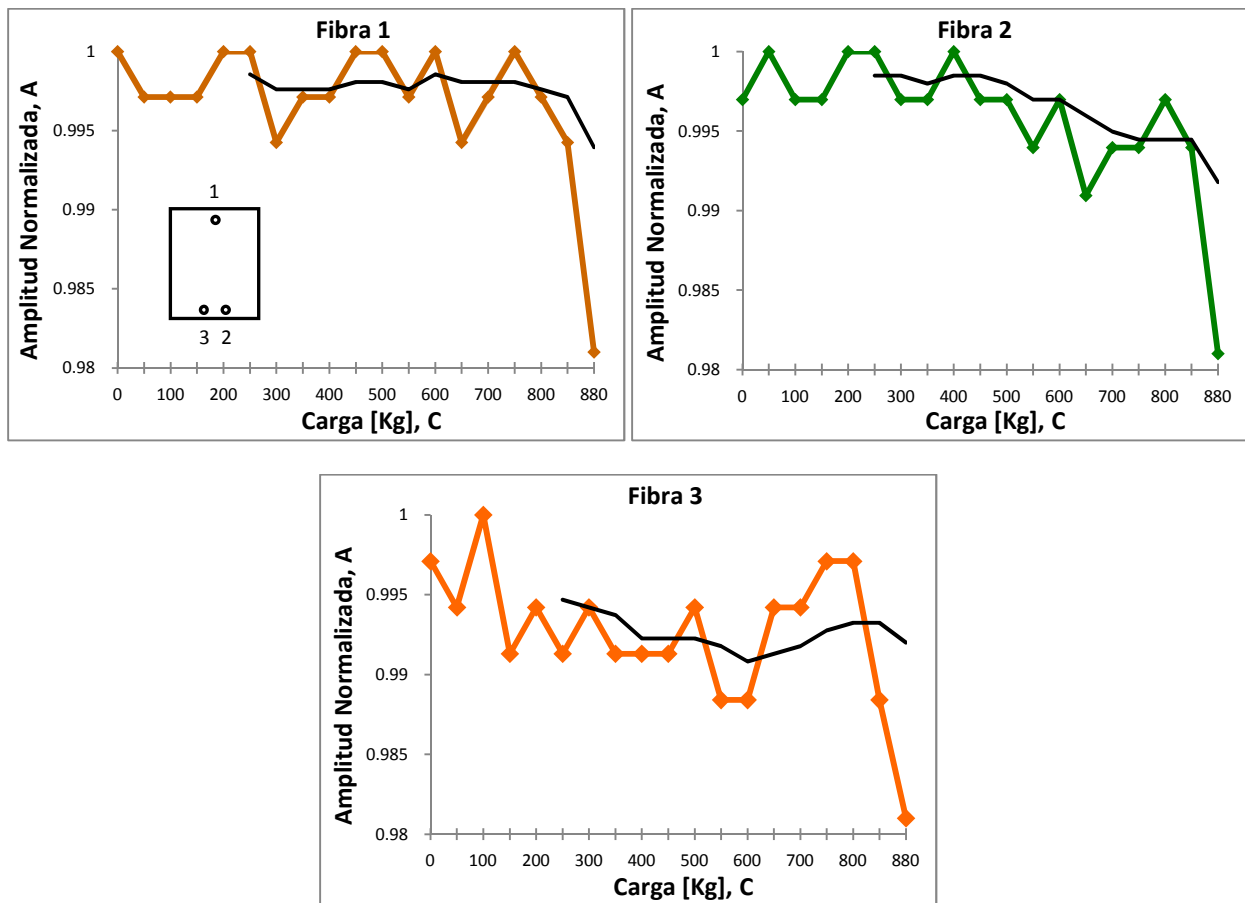


Figura 4.3. Resultados correspondientes a la viga 3. Amplitud normalizada  $A$  de la señal de salida en función de la carga aplicada  $C$  a la viga en Kg

En el caso de esta última viga, el agrietamiento del concreto en tensión se observó entre los 650Kg y 700Kg, la carga máxima se alcanzó a los 850Kg, y el colapso se generó poco después de los 850 Kg. Los resultados obtenidos con esta viga no muestran claramente un comportamiento similar a las vigas anteriores. Se puede observar que en la gráfica de las fibra óptica 2 la línea de tendencia

muestra una disminución de la amplitud normalizada, sin embargo en la gráfica de la fibra óptica 3 este comportamiento no se repite. Es importante resaltar que durante el proceso de fabricación de esta viga, el molde de madera utilizado no resistió la presión ejercida por el concreto durante las primeras horas posteriores al vertido de éste, generando que la viga no resultara completamente rectangular y que parte del material que conformaba las paredes de la viga se desprendiera al momento del descimbrado, por lo que las fibras ópticas no quedaron integradas completamente en el concreto y por consecuencia no se encontraron en condiciones similares a las fibras ópticas de las vigas 1 y 2, generando así la posible discrepancia entre los resultados de esta viga y los de las vigas anteriores.

Por último, es importante mencionar que las gráficas mostradas en las figuras 4.1–4.3 presentan oscilaciones en la respuesta en amplitud no esperadas durante el diseño del método. De acuerdo a lo expuesto en los capítulos anteriores, las oscilaciones en la amplitud eran producto de la fricción presente entre la fibra óptica y el concreto al momento de deslizarse a través de éste [3]. Sin embargo, esta explicación no justifica que las oscilaciones se presenten desde el inicio de la prueba, ya que el deslizamiento de la fibra óptica puede ocurrir únicamente cuando la masa del concreto se fractura y se separa formándose la grieta. Por lo tanto se cree que estas oscilaciones son causadas por otros factores, como la vibración natural de la maquina universal al desalinearse la mancha del láser sobre las fibras ópticas, o bien la aplicación de la carga con una cierta velocidad constante, causando una continua redistribución de la potencia luminosa en el núcleo de la fibra óptica y por consecuencia generando las oscilaciones en la amplitud. Otra posible causa de esto pudiera ser la inestabilidad de la fuente de poder que alimentaba el láser, en el anexo A.6 se muestra un experimento extra que verifica que la fuente no es la responsable de dichas oscilaciones.

## **4.2 Determinación del daño estructural**

Con base en la respuesta en amplitud de la luz transmitida por las fibras ópticas respecto a la carga aplicada, es posible realizar un monitoreo básico de la integridad de vigas de concreto sujetas a condiciones de flexión simple.

Los resultados obtenidos durante la prueba en el Laboratorio de Materiales, muestran que la carga aplicada sobre las vigas de concreto genera un efecto en la transmisión de la luz por las fibras ópticas, que puede ser visualizado con ayuda del osciloscopio. La determinación del daño estructural en las vigas de concreto puede llevarse a cabo mediante el monitoreo de los picos de atenuación generados por el agrietamiento del concreto o bien visualizando el comportamiento de la línea de tendencia, estableciendo un nivel de umbral en donde estas caídas de amplitud señalen un indicio de alguna posible grieta o daño en la viga.

### 4.2.1 Hipótesis sobre la determinación del daño estructural

Para determinar el daño estructural presente en las vigas de concreto utilizando el método propuesto, se plantea establecer un nivel de umbral en la respuesta en amplitud de la luz transmitida, para el cual una vez sobrepasado se pueda concluir que la viga ha presentado algún daño por el agrietamiento del concreto en la zona de tensión.

Como se mostró en las gráficas de los resultados, a pesar de las oscilaciones presentes en las gráficas, es posible apreciar ciertos picos de atenuación alrededor de la carga en la que se observó la aparición de las primeras grietas en la zona del concreto sujeto a tensión. La figura 4.4, muestra algunas de las gráficas presentadas anteriormente, donde se visualiza un nivel de umbral.

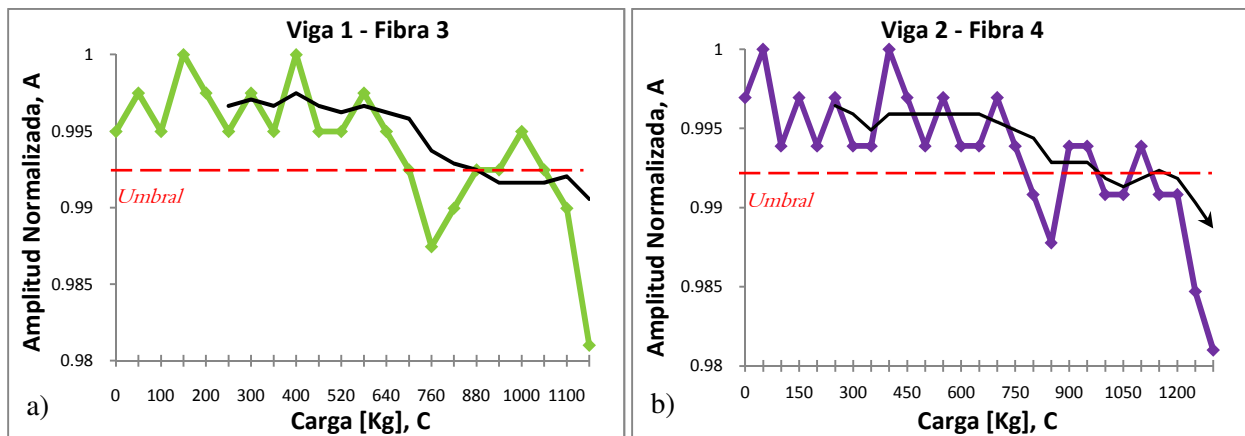


Figura 4.4. Nivel de umbral propuesto en la respuesta en amplitud de la fibra óptica 3. a) Viga 1, b) Viga 2

Nótese que se citó como ejemplo las fibras ópticas colocadas de manera paralela en la zona sujeta a tensión. El efecto del agrietamiento del concreto en esa zona involucra fuerzas de tensión que generan que el concreto se fracture dando lugar a las grietas. Se cree que la fibra óptica es afectada

por estas fuerzas de tensión al momento de partirse la masa de concreto. La figura 4.5 muestra un esquema del efecto de las fuerzas de tensión en la estructura de la fibra óptica.

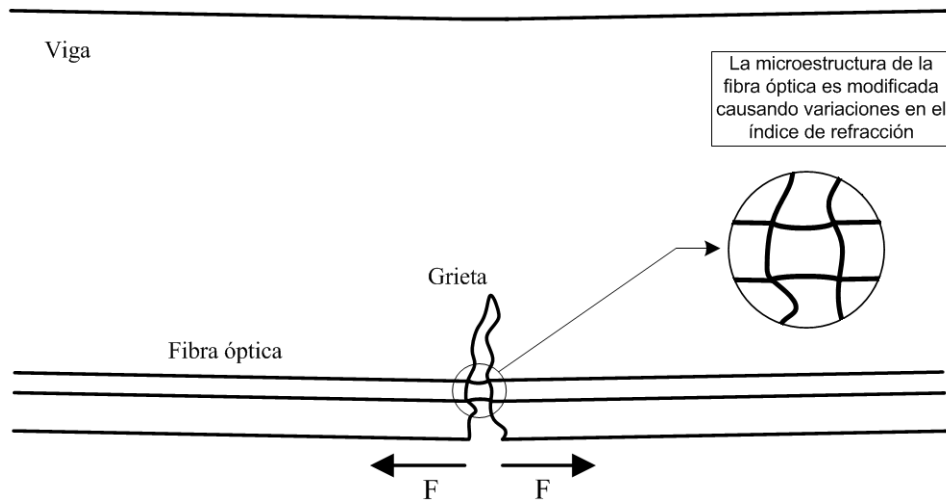


Figura 4.5. Efecto de las fuerzas de tensión en la microestructura de la fibra óptica

Al fracturarse la masa de concreto, la fibra óptica es modificada en su microestructura. Esta modificación genera variaciones en el índice de refracción debido a que la densidad del material se altera ocasionando pérdidas por reflexión, además de esto, la modificación de la interfaz núcleo-revestimiento genera pérdidas por radiación de los modos de alto orden.

Por lo tanto, si el objetivo es determinar un primer daño en la viga, las fibras ópticas de mayor importancia en el monitoreo son aquellas colocadas en la zona de tensión. Si los picos de atenuación sobrepasan el nivel de umbral establecido, es válido inferir que las grietas se están haciendo presentes y que la viga está sufriendo daños por el agrietamiento del concreto.

En conclusión, la hipótesis sobre el monitoreo y detección de las grietas en la masa de concreto, se basa en el monitoreo principal de aquellas fibras ópticas colocadas en la zona de la viga sujeta a tensión, ya que dichas fibras ópticas se encuentran sometidas a tensión por efecto de la deflexión en la viga. Si la respuesta en amplitud de las fibras ópticas presenta un pico de atenuación que sobrepase el nivel de umbral establecido, es posible inferir que el agrietamiento se está haciendo presente en esa zona. El nivel de umbral puede establecerse visualizando la magnitud de las oscilaciones presentes en la respuesta en amplitud de las gráficas. Es importante señalar que las respuestas en amplitud mostradas anteriormente, se obtuvieron probando una viga subreforzada, donde la zona de tensión es mayor a la zona de compresión, por lo que se cree, que el comportamiento de la

respuesta en amplitud de las fibras ópticas puede ser diferente si la viga se tratara del tipo balanceada o sobrerreforzada, donde las zonas de tensión y compresión son diferentes a la de la viga subreforzada.

### **4.3 Comparación con los métodos existentes**

Conforme a lo establecido en el capítulo 1, actualmente existen distintos métodos basados en fibras ópticas enfocados al monitoreo de elementos de concreto. Como se indicó en dicho capítulo, muchos de estos métodos resultan costosos y complejos ya que se basan en sensores de rejillas, o bien en la utilización de equipo OTDR y acopladores ópticos. El método experimental propuesto en este trabajo de tesis, presenta ciertas ventajas y desventajas respecto a éstos métodos.

Considerando sus bases teóricas y el equipo utilizado, el método propuesto puede definirse como un método simple y de bajo costo que posee las siguientes ventajas adicionales:

1. Monitoreo en el interior del elemento de concreto.
2. Principio de operación simple basado en aquellos efectos que producen pérdidas excesivas en la fibra óptica por modificaciones en su estructura.
3. Utilización de fibras ópticas con dimensiones fáciles de maniobrar.
4. Integración sencilla de las fibras ópticas durante la construcción de las vigas de concreto.

Por otro lado, la utilización de equipo de medición sencillo como el osciloscopio ocasiona que el método se vea restringido únicamente en la detección del agrietamiento presente en las vigas a través del voltaje de salida de los fotodetectores, es decir, a diferencia de los métodos basados en la técnica de OTDR, el método propuesto no es capaz de predecir la ubicación de las grietas, ni la apertura de las mismas.

Así mismo, la utilización de más de una fibra óptica para realizar el monitoreo representa otra desventaja respecto a los métodos que solo utilizan una sola fibra óptica. La desventaja se presenta al implementar un sistema de acoplamiento para las múltiples fibras ópticas con una misma fuente de luz. Como se explicó en el capítulo 3, el acoplamiento de las fibras ópticas se llevó a cabo mediante el láser y una lente cilíndrica biconvexa, sin embargo su ajuste resultó difícil durante el transcurso de



la prueba en el Laboratorio de Materiales, debido a que el láser tendía a desajustarse por la vibración natural de la maquina universal. Por lo tanto, la utilización de más de una fibra óptica integrada en el elemento de concreto implica tener un sistema de acoplamiento o bien tener múltiples fuentes de luz, lo cual es una desventaja notable.

#### **4.4 Identificación de problemas y posibles mejoras**

Durante el desarrollo de las pruebas efectuadas en las vigas de concreto se lograron determinar algunos problemas respecto al método propuesto y a su ejecución. Como primer punto se tiene que el tamaño de las vigas utilizadas ocasionó que su comportamiento bajo la prueba de flexión simple no resultará tan notorio como en el caso de vigas diseñadas por compañeros de la carrera de Ingeniería Civil. Durante el diseño del presente trabajo se tuvo la oportunidad de asistir a una prueba de vigas en flexión simple correspondiente a una de las asignaturas de la carrera de Ingeniería Civil. En dicha prueba, las vigas experimentadas tenían dimensiones mucho mayores que las utilizadas en este trabajo, principalmente el largo de las vigas era mucho mayor que sus dimensiones transversales. Debido a esto, las zonas de tensión y compresión en vigas subreforzada y sobrerreforzada abarcaban un área mayor, notándose claramente el concreto sujeto a tensión y el correspondiente sujeto a compresión. Por ejemplo, en la viga subreforzada, la zona de tensión era claramente mayor a la zona de compresión, presentándose múltiples grietas que fueron claramente visibles tanto en su aparición como en su evolución. Para el caso de las vigas utilizadas en el presente trabajo, la zona de tensión resultó muy pequeña y el número de grietas aparecidas resultó en un máximo de 2 o 3, mientras que la zona de compresión ni si quiera se pudo distinguir. Por lo tanto, se cree que el tamaño de las vigas no permitió que la zona de tensión fuera mayor, y por consecuencia su efecto sobre las fibras ópticas resultó mínimo. Sumado a esto, las fibras ópticas utilizadas fueron integradas sin retirar el recubrimiento de protección Tefzel<sup>25</sup>, ya que durante la planeación del método se consideró que sin esta protección las fibras ópticas no resistirían el proceso de integración en las vigas y se romperían, por lo tanto, dicha protección influyó también que el efecto de las grietas sobre la estructura de la fibra óptica se atenuara aun más (tema 2.2.4).

---

<sup>25</sup> Capa que protege a la fibra óptica de esfuerzos mecánicos

Por otro lado, el número de vigas probadas resultó menor al tamaño de la muestra calculada en el capítulo 3 para un nivel de confianza del 95% y una precisión de  $0.7\sigma$ . Al tener un tamaño de muestra menor, el margen de error se incrementó y el comportamiento del sistema no fue tan claro. Conforme a la tabla 3.1 del capítulo 3, el nivel de confianza para una muestra de 3 elementos es del 90% con una precisión de una  $\sigma$ . Por lo tanto, el no contar con más elementos a probar restringió en cierta manera, determinar con mayor certeza el comportamiento de las fibras ópticas, caracterizar la respuesta del sistema, explicar las posibles causas de las oscilaciones presentes en la respuesta en amplitud y justificar el hecho de que los picos de atenuación fueran instantáneos y no se mantuvieran en ese nivel de amplitud posteriormente.

Con base en lo anterior, es posible enunciar algunas mejoras acerca del método propuesto, como por ejemplo: utilizar un tamaño de viga mayor especialmente en el largo de la viga, utilizar las fibras ópticas sin el recubrimiento Tefzel, construir y probar un tamaño de muestra mayor con el fin de corroborar el comportamiento de las fibras ópticas y finalmente implementar un sistema de acoplamiento fijo entre las fibras ópticas y la fuente de luz para evitar errores de apuntamiento que tenga un ángulo de lanzamiento mayor al ángulo de aceptación de las fibras ópticas.

## 4.5 Conclusiones

1. El agrietamiento del concreto en tensión genera una pérdida excesiva en la transmisión de la luz por las fibras ópticas colocadas en la zona de tensión, que se cree ocasionado por la modificación en la microestructura de la fibra óptica generando variaciones en el índice de refracción.
2. La línea de tendencia media móvil muestra que la amplitud de la luz transmitida es constante en un principio y comienza a decrecer a partir de la aparición de las grietas.
3. Las pérdidas excesivas en la transmisión se reflejan como picos de atenuación en la respuesta en amplitud de las fibras ópticas respecto a la carga aplicada. Los picos de atenuación se presentan alrededor de la carga en la que se observaron las primeras grietas.
4. Las fibras ópticas que corroboran este resultado son aquellas colocadas de manera paralela al eje de la viga en la zona de tensión. Mientras que la fibra óptica colocada en forma de zigzag no

presentó un claro comportamiento conforme a lo que se esperaría de presentar mayores pérdidas por ser colocada de esa forma.

5. La fibra óptica colocada en la zona de compresión presentó un ligero pico de atenuación alrededor de la carga en la que la viga alcanzaba su carga máxima. Sin embargo, este pico de atenuación se presenta poco antes del colapso de la viga, por lo que su detección es tardía.
6. El colapso de las vigas ocasionó que algunas fibras ópticas se rompieran mientras que otras simplemente se deslizaron a través del concreto. Las fibras ópticas colocadas en forma de zigzag fueron más propensas a romperse debido a que presentaban una inclinación respecto a la masa de concreto que colapsaba.

## 4.6 Referencias

- [1] Media móvil, <[http://es.wikipedia.org/wiki/Media\\_m%C3%B3vil](http://es.wikipedia.org/wiki/Media_m%C3%B3vil)>
- [2] González Cuevas, Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado, 1ª edición, Limusa, México 1974.
- [3] Wan, K.T., Leung, C.K.Y., Applications of a distributed fiber optic crack sensor for concrete structures, Sensors and Actuators, 2007.
- [4] Olson, N., Leung, C.K.Y., Meng, A., Crack sensing with a multimode fiber: Experimental and theoretical studies, Sensors and Actuators, 2005.

# Capítulo 5

## Conclusiones Generales

---

### 5.1 Conclusiones Generales

1. Se investigó experimentalmente la factibilidad de utilizar a la fibra óptica simple como sensor para la detección de grietas en elementos de concreto. Los resultados obtenidos durante las pruebas expuestas sustentan que la detección de grietas es posible si se analiza a detalle los fenómenos involucrados en el elemento de concreto cuando es sometido a una carga.
2. Las pruebas preliminares muestran que las modificaciones en la estructura física de la fibra óptica generan pérdidas en la transmisión de la luz. El doblamiento de la fibra óptica genera pérdidas pequeñas menores a 1dB hasta el momento en que la fibra se fractura y la transmisión cae drásticamente más de 20dB. Las pérdidas por efecto de la tensión crecen de forma lineal hasta el momento en que la fibra óptica comienza a deslizarse por el concreto presentándose oscilaciones en la amplitud y acercándose a un valor asintótico de pérdidas.
3. El empleo de vigas rectangulares de concreto como elemento básico a probar, permitió visualizar el comportamiento de la fibra óptica bajo los fenómenos de tensión y compresión durante la prueba de flexión simple en la viga de concreto, encontrándose que la fibra óptica es más sensible al efecto de la tensión, al modificar su microestructura.
4. La línea de tendencia media móvil mostró que la amplitud de la luz transmitida por la fibra óptica es casi constante hasta el momento en el que aparecen las primeras grietas, a partir de ese punto la amplitud de la luz comienza a disminuir. El agrietamiento del concreto genera picos de atenuación en la respuesta en amplitud de las fibras ópticas colocadas en la zona de tensión.
5. Las pérdidas en la transmisión de la luz son muy pequeñas apenas del 1%, sin embargo su detección es posible con el osciloscopio. Considerando que las fibras ópticas tenían el recubrimiento Tefzel que disminuye los esfuerzos en un 10%, la pérdida en la fibra óptica por los efectos del agrietamiento estaría alrededor del 10%.

# Anexos

## A.1 Especificaciones y dimensiones del láser utilizado

Tabla A.1. Características del láser utilizado VLM2 de la empresa Coherent

ESPECIFICACIONES	VALORES @ 25°C
<b>ÓPTICAS</b>	
Modo	CW, Onda coherente
Longitud de onda	670nm
Potencia de salida	4.2mW ±5%
Clase	IIIa
Tamaño de la mancha	4.6mm x 1.3mm (elíptico)
Divergencia del haz	0.2 x 0.7mrad
Temperatura de operación	-10°C~40°C
<b>ELÉCTRICAS</b>	
Voltaje de operación	Cable rojo: 6~10VDC, recomendado 6VDC Cable blanco: Cable de control Cable negro: Tierra
Corriente de operación	190mA, típica 260mA, máxima
<b>Cable de control</b>	Modulación Directa
Ancho de banda máximo	500KHz
Rango lineal	Inicio 1.6~1.9V Fin 3.0~3.5V
Voltaje máximo	5V
Resistencia de entrada	5.5KΩ
Voltaje de entrada TTL	5V
Tiempo de subida TTL	500ns

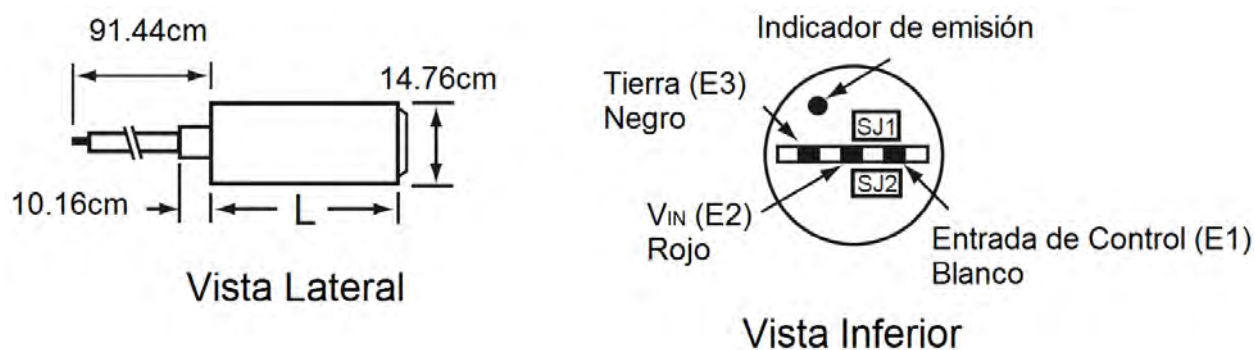


Figura A.1. Dimensiones de láser VLM2 de la empresa Coherent

Coherent Inc, Miniature Diode Laser Modules, VLM2 and VLM3 style packages, part number 0221-202-00  
 <<http://www.coherent.com/downloads/0221-202-00.pdf>>

## A.2 Características de las fibras ópticas utilizadas

Tabla A.2. Características de las fibras ópticas utilizadas

Fibra óptica	FT-400-URT	FT-200-URT	FG-200-LCR
Tipo	Multimodo índice escalonado	Multimodo índice escalonado	Multimodo índice escalonado
Diámetro Núcleo ( $\mu\text{m}$ )	$400 \pm 2\%$	$200 \pm 2\%$	$200 \pm 2\%$
Diámetro Revestimiento ( $\mu\text{m}$ )	$430 \pm 2\%$	$225 \pm 5$	$240 \pm 2\%$
Diámetro Buffer ( $\mu\text{m}$ )	--	--	$260 \pm 3\%$
Diámetro Recubrimiento ( $\mu\text{m}$ )	$730 \pm 5\%$	$500 \pm 5\%$	$400 \pm 5\%$
Apertura Numérica (AN)	$0.48 \pm 0.02$	$0.48 \pm 0.03$	$0.22 \pm 0.02$
Ángulo de Aceptación ( $\theta_a$ )	$28.6^\circ$	$28.6^\circ$	$12.7^\circ$
Temperatura de operación	$-40^\circ\text{C}$ a $150^\circ\text{C}$	$-40^\circ\text{C}$ a $150^\circ\text{C}$	$-40^\circ\text{C}$ a $150^\circ\text{C}$
Concentración OH	Alta	Alta	Baja

Thorlabs Inc., Multimode Fiber Step Index, FT-400-URT ó BFH48-400. <[http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=362&PN=BFH48-400](http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=362&PN=BFH48-400)>, FG-200-LCR ó BFL22-200. <[http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup\\_ID=360&PN=BFL22-200](http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=360&PN=BFL22-200)>

### A.3 Parámetros del fotodiodo PIN FD-263

Tabla A.3. Parámetros del fotodiodo FD-263

Parámetro	Valor	Unidad
Área activa	3 x 3	mm <sup>2</sup>
Temperatura de trabajo	20 ± 5	°C
Tensión de trabajo	0.2	V
Sensibilidad espectral	0.4 – 1.1	μm
Picos de sensibilidad espectral	0.8 – 0.9	μm
Corriente de oscuridad	5	nA
Sensibilidad @ $\lambda = 0.55\mu\text{m}$	15	A/W
Resistencia de aislamiento	100	MΩ
Intensidad de fallas	$2 \times 10^{-8}$	h <sup>-1</sup>
Peso cuerpo metálico	3	g
Material ventana	Cristal	Cristal-149

Quartz Inc., < <http://www.quartz.cv.ua/products/product3.html>>, Fotodiodo de silicio FD-263.

### A.4 Resultados prueba de doblamiento de la fibra óptica

Tabla A.4. Resultados promedio obtenidos para la prueba de doblamiento de la fibra óptica

Desplazamiento [mm]	FT-400-URT		FG-200-LCR	
	Amplitud [V]	Pérdida [dB]	Amplitud [V]	Pérdida [dB]
0.000	3.298	0.000	2.948	0.000
0.318	3.298	0.000	2.948	0.000
0.635	3.298	0.000	2.948	0.000
0.953	3.296	0.003	2.948	0.000
1.270	3.293	0.013	2.946	0.004
1.588	3.290	0.020	2.944	0.011
1.905	3.284	0.036	2.940	0.022
2.223	3.276	0.056	2.936	0.033
2.540	3.269	0.076	2.926	0.063
2.858	3.258	0.106	2.919	0.085
3.175	3.246	0.136	2.914	0.100
3.493	0.328	27.410	2.905	0.126
3.810	0.135	27.757	0.107	28.832
4.128	0.072	33.246	0.094	29.953

## A.5 Resultados prueba de tensión en la fibra óptica

Tabla A.5. Resultados promedio obtenidos para la prueba de tensión en la fibra óptica

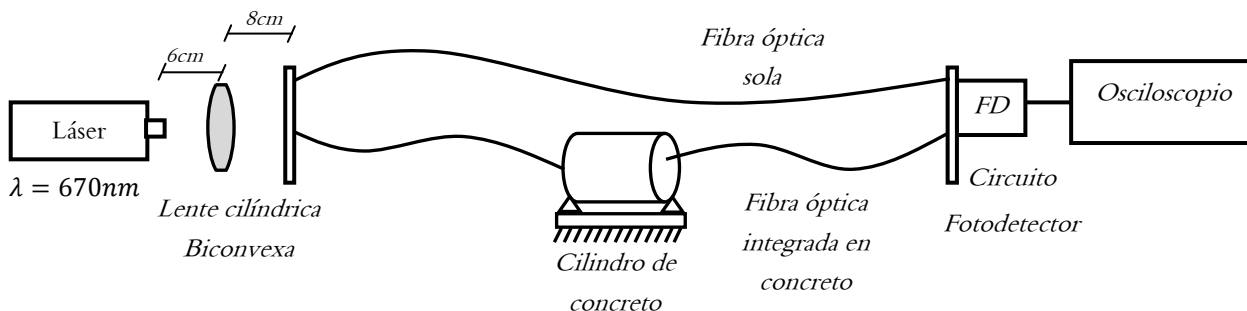
Desplazamiento [mm]	FT-400-URT		FG-200-LCR	
	Amplitud [V]	Pérdida [dB]	Amplitud [V]	Pérdida [dB]
0.000	2.820	0.003	2.855	0.000
0.318	2.815	0.015	2.855	0.000
0.635	2.815	0.015	2.855	0.000
0.953	2.815	0.015	2.850	0.015
1.270	2.810	0.031	2.845	0.030
1.588	2.785	0.108	2.840	0.046
1.905	2.795	0.077	2.830	0.076
2.223	2.785	0.108	2.825	0.092
2.540	2.800	0.062	2.825	0.092
2.858	2.775	0.140	2.810	0.138
3.175	2.770	0.155	2.815	0.123
3.493	2.765	0.171	2.825	0.092
3.810	2.760	0.187	2.805	0.153
4.128	2.765	0.171	2.815	0.123
4.445	2.775	0.140	2.810	0.138
4.763	2.760	0.187	2.815	0.123
5.080	2.770	0.155	2.810	0.138
5.398	2.765	0.171	2.820	0.107
5.715	2.765	0.171	2.815	0.123
6.033	2.750	0.218	2.810	0.138
6.350	2.760	0.187	2.815	0.123
6.668	2.745	0.234	2.815	0.123
6.985	2.745	0.234	2.800	0.169
7.303	2.740	0.250	2.810	0.138
7.620	2.745	0.234	2.795	0.184
7.938	2.740	0.250	2.805	0.153
8.255	2.745	0.234	2.800	0.169
8.573	2.755	0.203	2.810	0.138
8.890	2.755	0.203	2.795	0.184
9.208	2.745	0.234	2.805	0.153



## A.6 Comprobación de la estabilidad de la fuente de poder

Esta prueba se realizó posteriormente de realizar las distintas pruebas presentadas en este trabajo de tesis y tuvo como objetivo principal descartar la posibilidad de que la inestabilidad de la fuente que alimentaba al láser VLM2 fuera la responsable de las oscilaciones presentes en los resultados mostrados en el capítulo 4.

El esquema de la prueba se muestra en la siguiente figura:

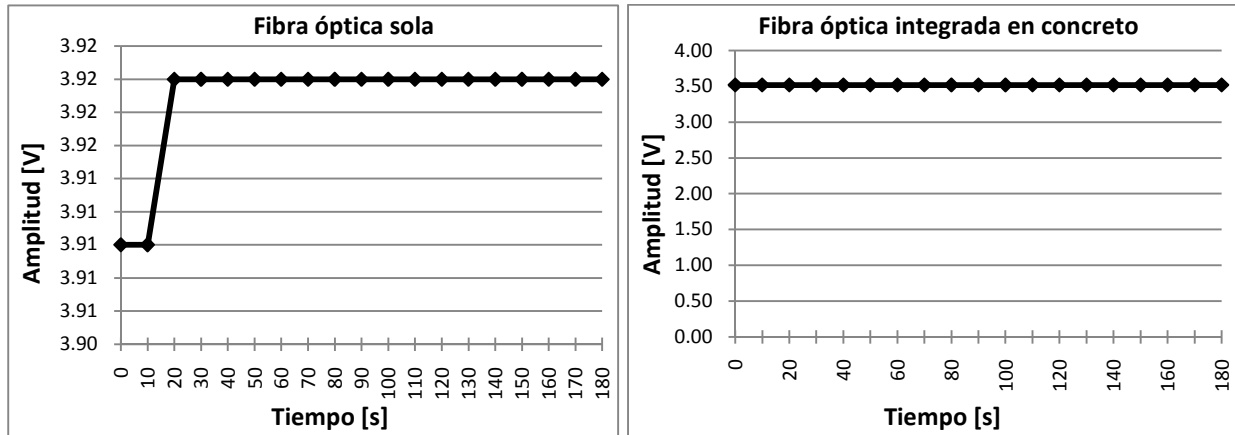


La prueba consistió en recabar los valores de la amplitud de la señal eléctrica en el osciloscopio en intervalos de tiempo de 10s. La prueba se realizó para una fibra óptica sola y otra integrada en el concreto. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Fibra óptica Sola		Fibra Óptica integrada en concreto	
Tiempo [s]	Amplitud [V]	Tiempo [s]	Amplitud [V]
0	3.91	0	3.52
10	3.91	10	3.52
20	3.92	20	3.52
30	3.92	30	3.52
40	3.92	40	3.52
50	3.92	50	3.52
60	3.92	60	3.52
70	3.92	70	3.52
80	3.92	80	3.52
90	3.92	90	3.52
100	3.92	100	3.52
110	3.92	110	3.52
120	3.92	120	3.52
130	3.92	130	3.52
140	3.92	140	3.52

150	3.92	150	3.52
160	3.92	160	3.52
170	3.92	170	3.52
180	3.92	180	3.52

Las graficas de las tablas se muestran a continuación:



Se observa de las graficas que la amplitud de la señal eléctrica en el osciloscopio se mantiene prácticamente constante, por lo que se puede concluir que la fuente de poder utilizada para alimentar el láser VLM2 no es la causante de las oscilaciones presentes en las graficas de los resultados obtenidos.