

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 μm . 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]

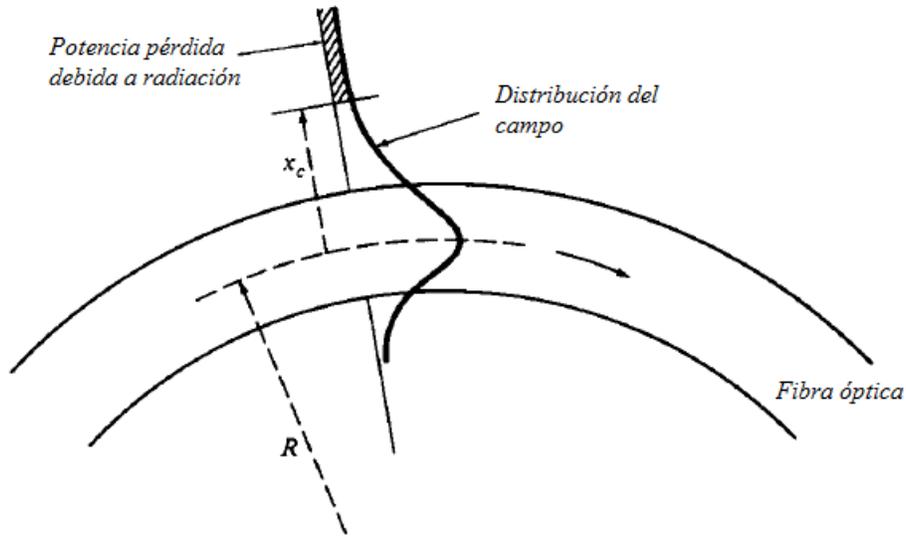


Figura 2.1. Esquema de la distribución de campo del modo fundamental cuando la fibra es doblada [14]

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 θ_i menor o igual al ángulo θ_a serán propagados en el núcleo por el principio de Reflexión Total Interna. En cambio, cualquier rayo que incida con un ángulo mayor a θ_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 α_i menor al ángulo crítico α_c . [11] [14]

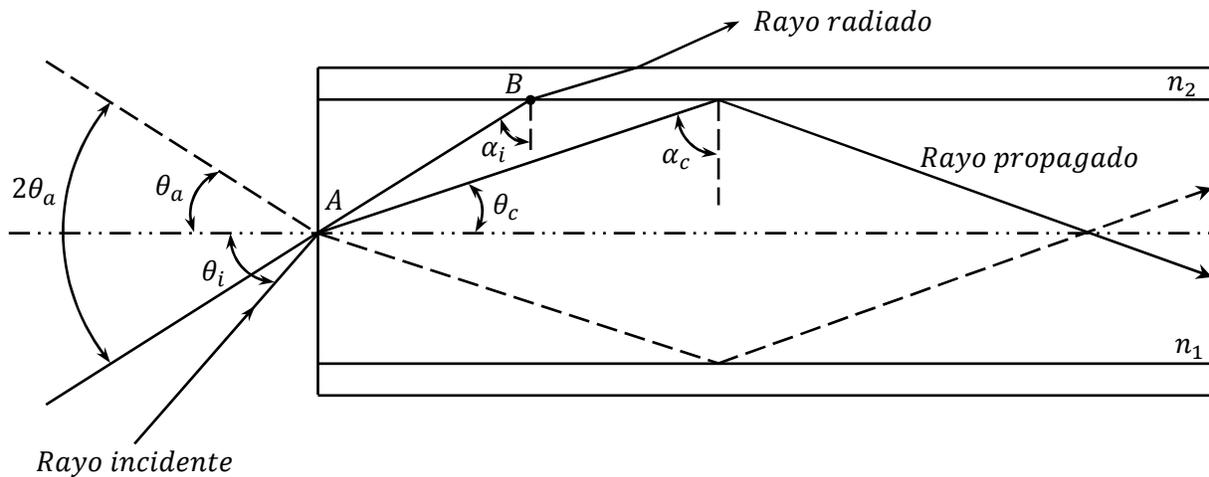


Figura 2.2. Esquema de la propagación de la luz de acuerdo a la óptica geométrica [12]

Entonces, cualquier rayo que incida en la interfaz núcleo-revestimiento con un ángulo mayor o igual a α_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 α_c , cuanto menor sea el valor del ángulo crítico α_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 θ_i en la interfaz núcleo-revestimiento son cercanos o iguales al valor del ángulo crítico α_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).

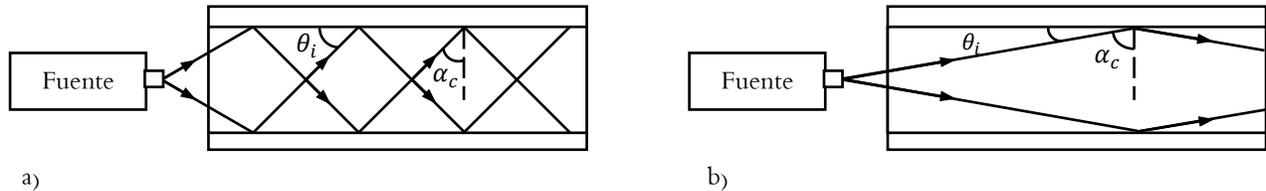


Figura 2.3. a) Modos de alto orden y b) modos de bajo orden [12]

Los modos de alto orden representan una pérdida considerable de la potencia transmitida, ya que estos son altamente sensitivos 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 θ_1 alcanza el punto A, su ángulo de propagación θ'_1 resulta mayor a θ_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.

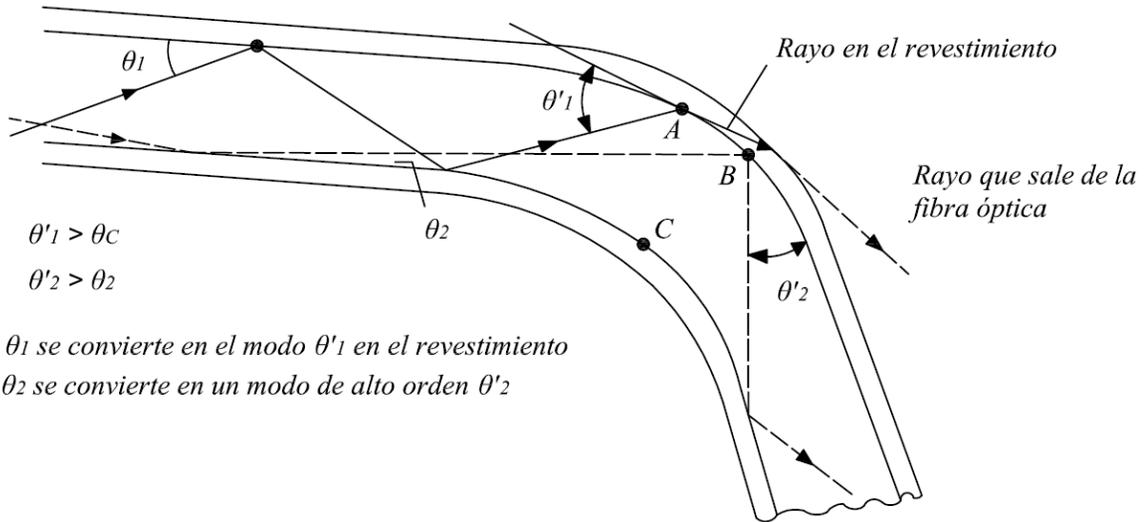


Figura 2.4. Efecto de una macrocurvatura en los modos de propagación [12]

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 elipticidad⁵ y errores de concentricidad⁶ [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]

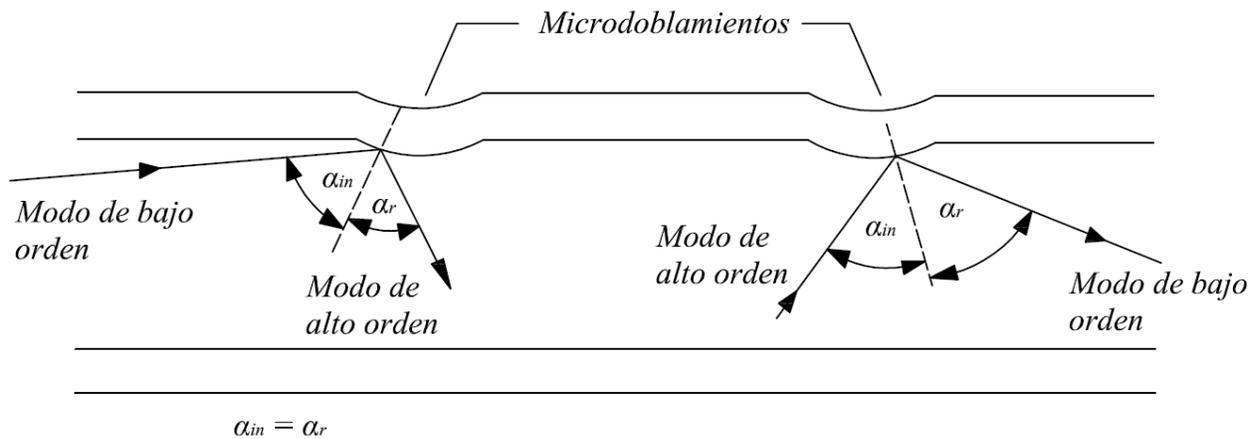


Figura 2.5. Conversión de los modos debido a microcurvaturas [12]

⁵ Fluctuaciones del diámetro

⁶ 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.

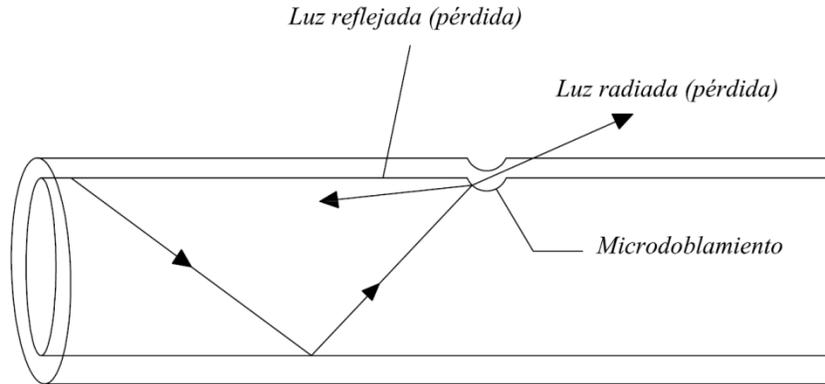


Figura 2.6. Pérdidas por radiación y retroesparcimiento de la luz debido a una microcurvatura [12]

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 Δ 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]

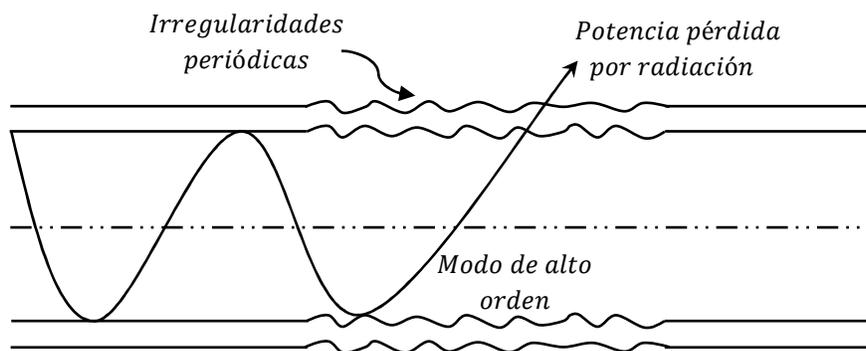


Figura 2.7. Pérdidas por radiación debido a irregularidades periódicas [11]

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]

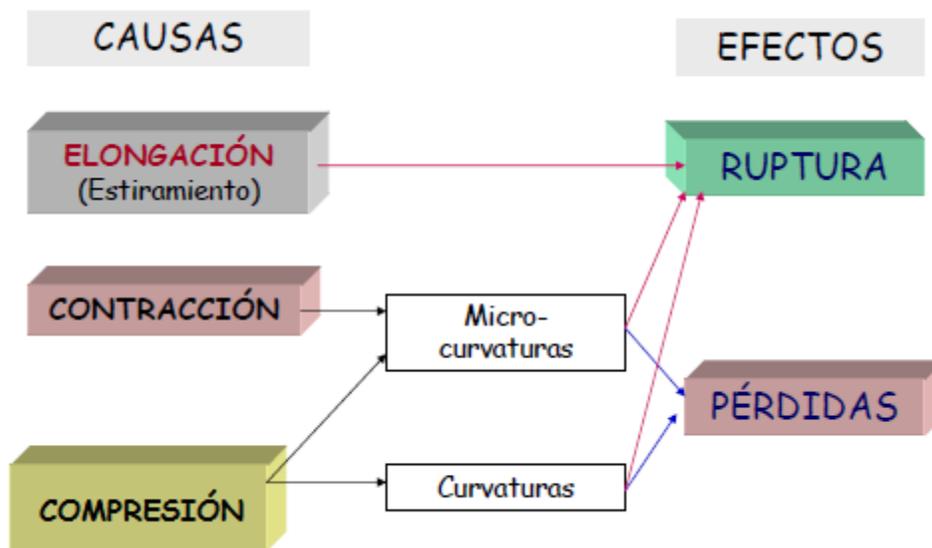


Figura 2.8. Deterioro de la fibra óptica debido a distintas causas externas [15]

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 tracción⁷ 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 cohesión⁸ propias de la fibra, resultando en un material muy débil a esfuerzos de tensión. [15]

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

⁸ 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]

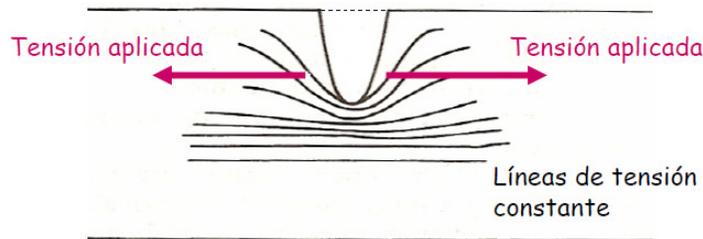


Figura 2.9. Contracción en un punto de la fibra [15]

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]

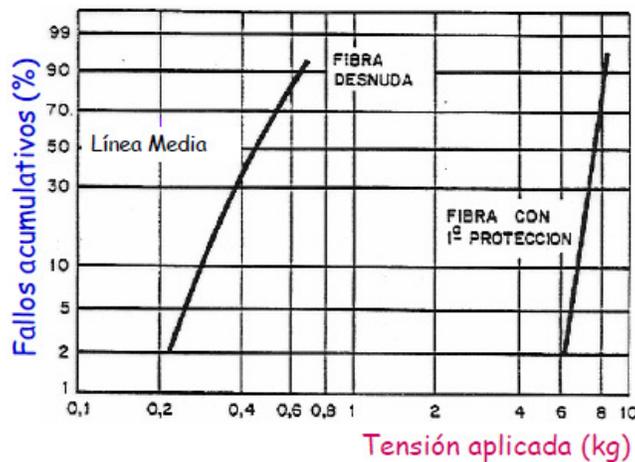


Figura 2.10. Comparación entre una fibra desnuda y una con protección [15]

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

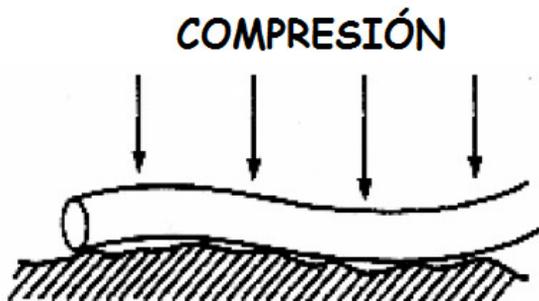


Figura 2.11. Fuerzas distribuidas sobre la fibra que generan la compresión [15]

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 deformación⁹ varía en un intervalo de 0.0015 a 0.002¹⁰, 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]

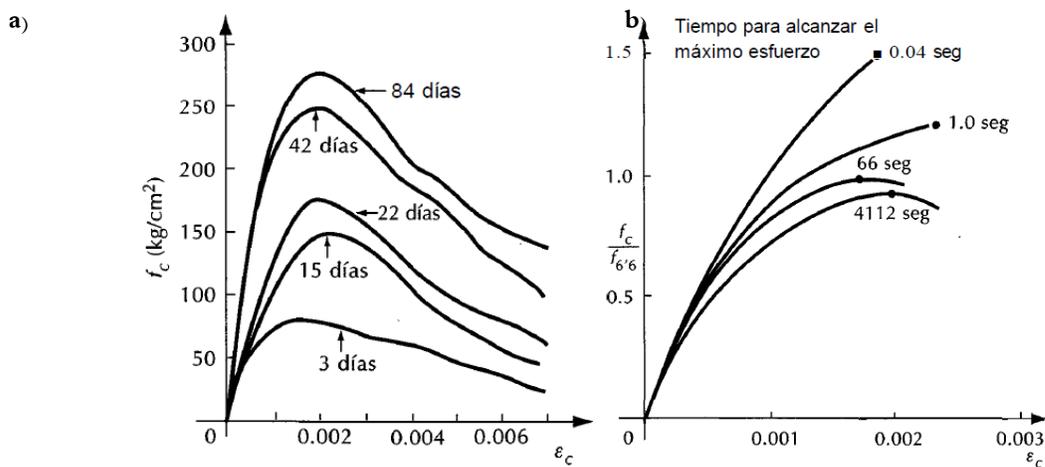


Figura 2.12. a) Efecto de la edad y b) la velocidad de carga en la resistencia del concreto

⁹ 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]

¹⁰ 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 dimensiones¹¹ se muestran en la figura 2.13.

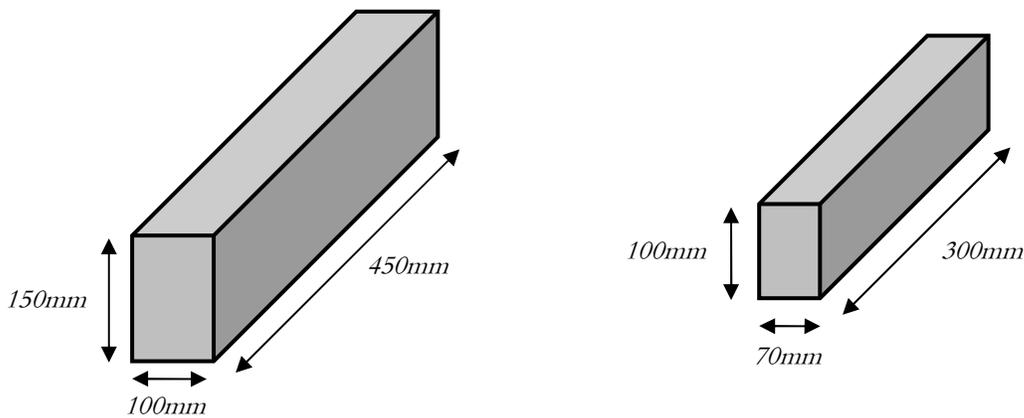


Figura 2.13. Dimensiones de las vigas utilizadas

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]

¹¹ Las dimensiones se eligieron con el fin de poder maniobrar con las vigas y poder transportarlas

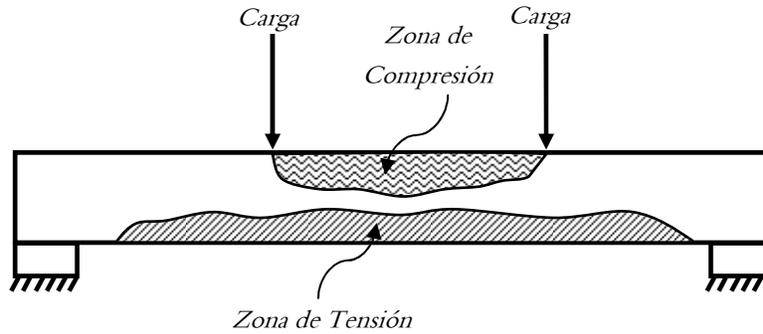


Figura 2.14. Zonas de Tensión y compresión presentes en las pruebas de vigas [18]

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 refuerzo¹² 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].

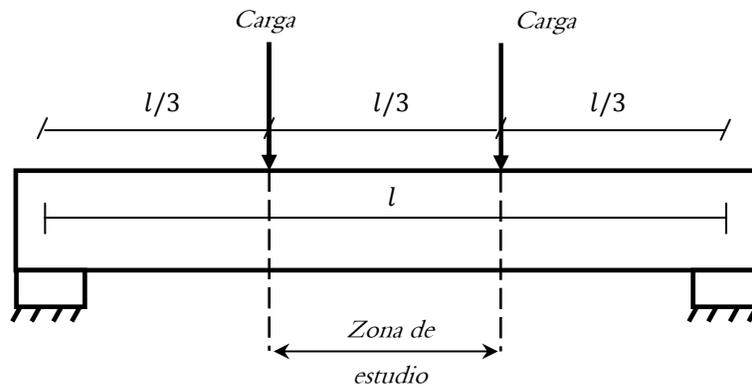


Figura 2.15. Modo de carga de la viga sujeta a flexión [18]

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

¹² 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 deflexiones¹³ crecen considerablemente sin que apenas se aumente la carga. Figura 2.16. [18]

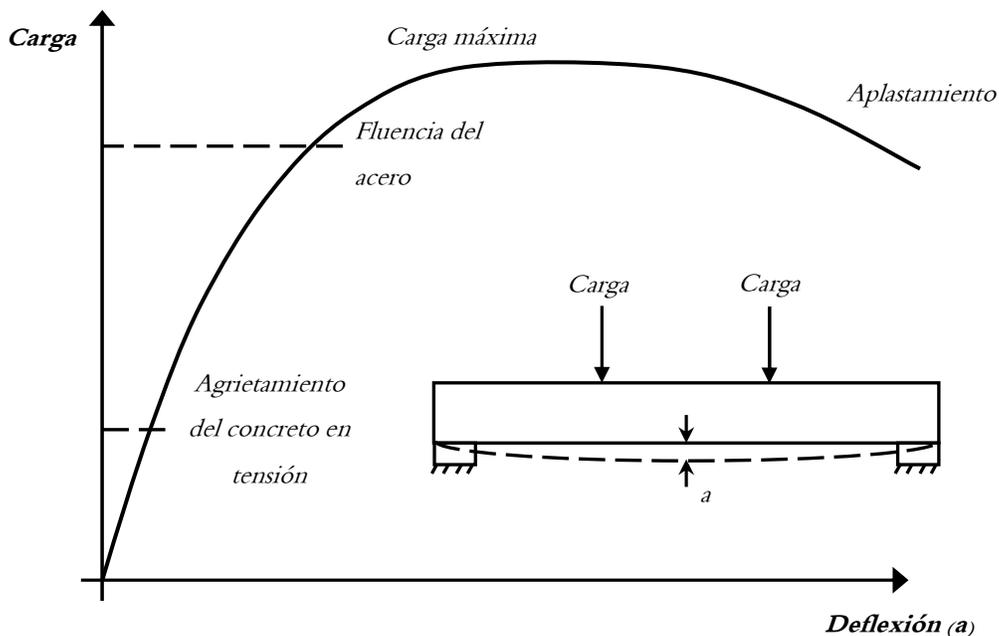


Figura 2.16. Gráfica carga-deflexión de una viga de concreto, con un porcentaje de acero balanceado [18]

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]

¹³ 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]

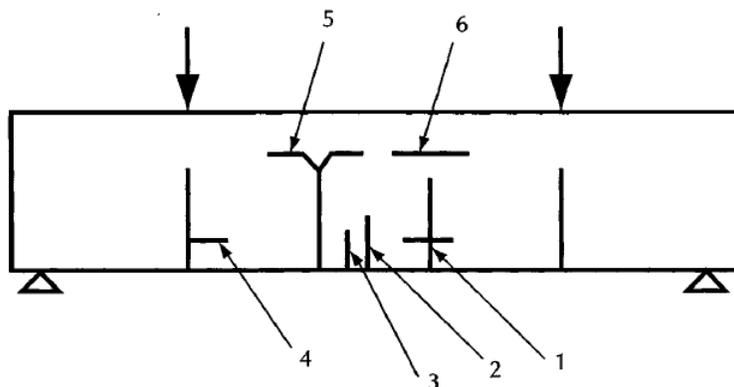


Figura 2.17. Configuración de agrietamiento de una viga sujeta a flexión simple [18]

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]

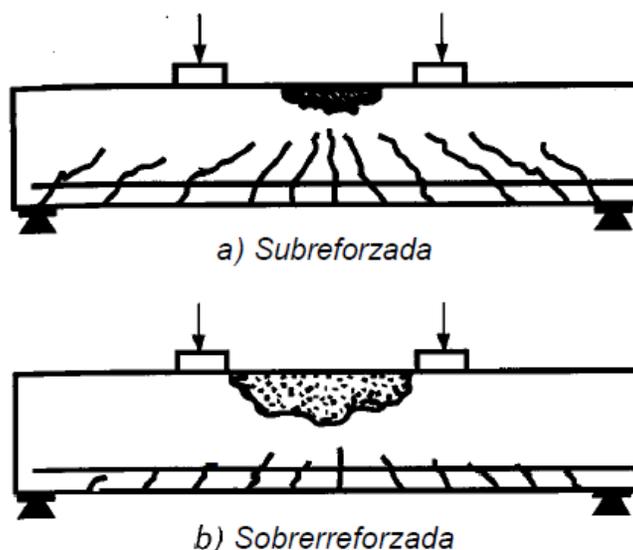


Figura 2.18. Agrietamiento de las vigas de acuerdo al porcentaje de acero

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]

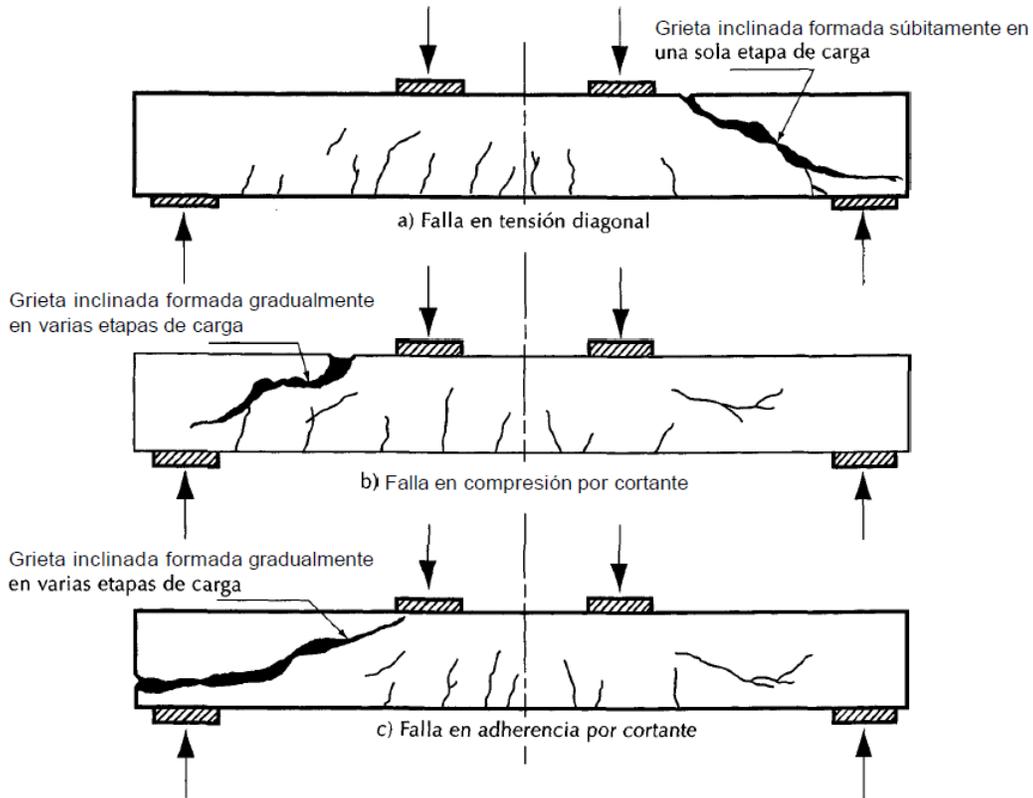


Figura 2.19. Representación esquemática de los diferentes tipos de falla [18]

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 IIIa¹⁴, 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]

¹⁴ 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 θ_s es menor al ángulo de aceptación de la fibra óptica θ_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 θ_s mayor al ángulo de aceptación θ_a de la fibra óptica.

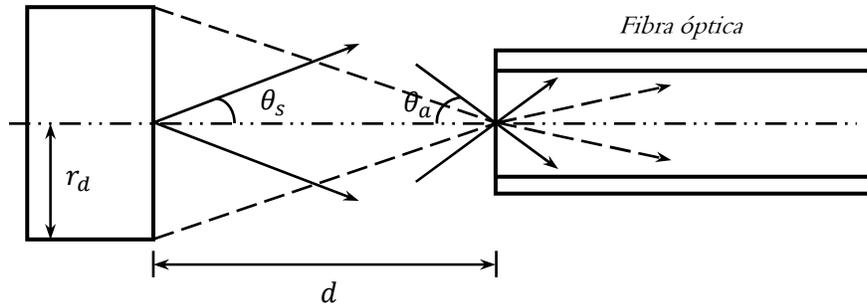


Figura 2.20. Efecto del ángulo de lanzamiento en la excitación de los modos en la fibra óptica [21]

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]

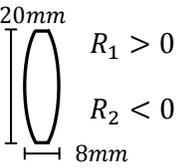
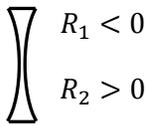
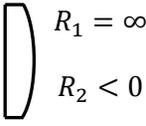
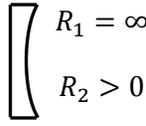
2.4.3 Lente

Una lente es un dispositivo óptico¹⁵, 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

¹⁵ 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]

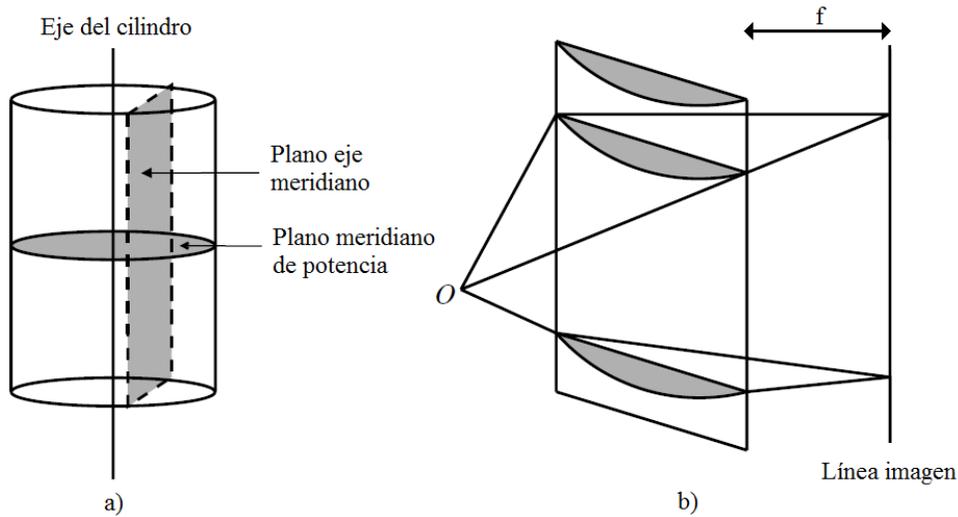


Figura 2.22 a) Conformación de la lente cilíndrica, b) Refracción de la luz en una línea imagen [24]

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*¹⁶ 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]

¹⁶ 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]

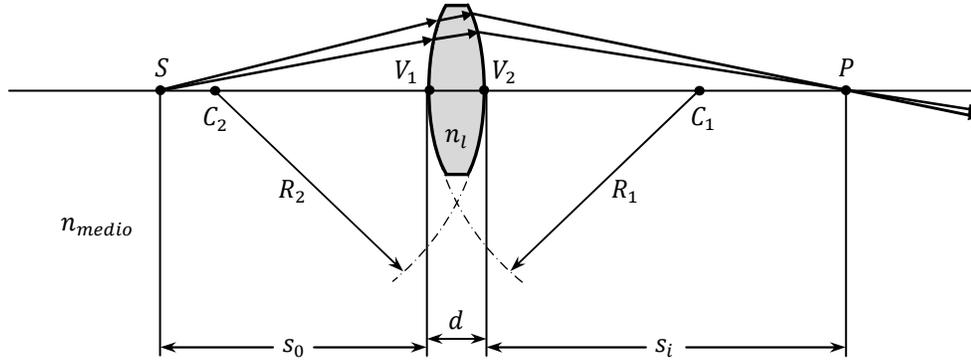


Figura 2.23. Geometría, parámetros y trayectoria de los rayos en una lente biconvexa [23]

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]

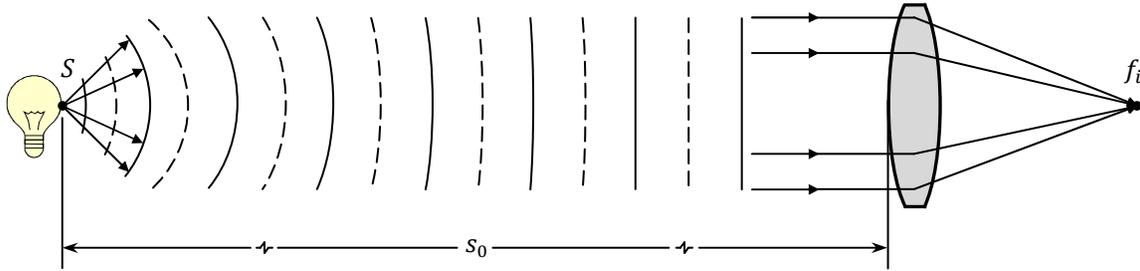


Figura 2.24. Rayos que inciden en la lente de manera paralela de una fuente lejana [23]

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.

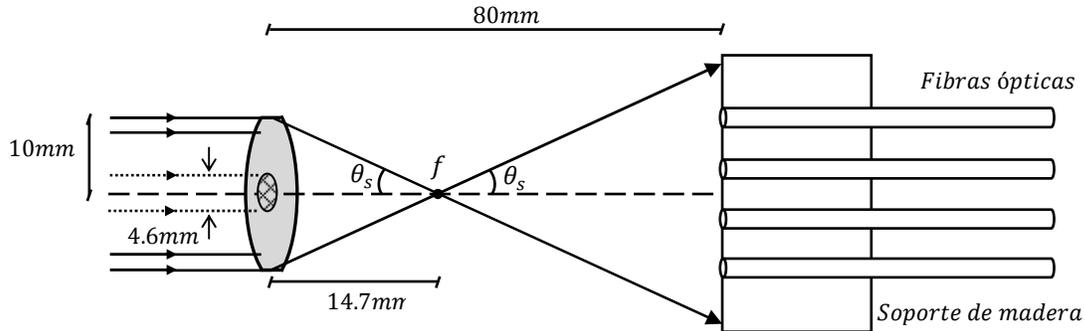


Figura 2.25. Geometría del arreglo entre la lente biconvexa y las fibras ópticas

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)¹⁷, 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

¹⁷ 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.

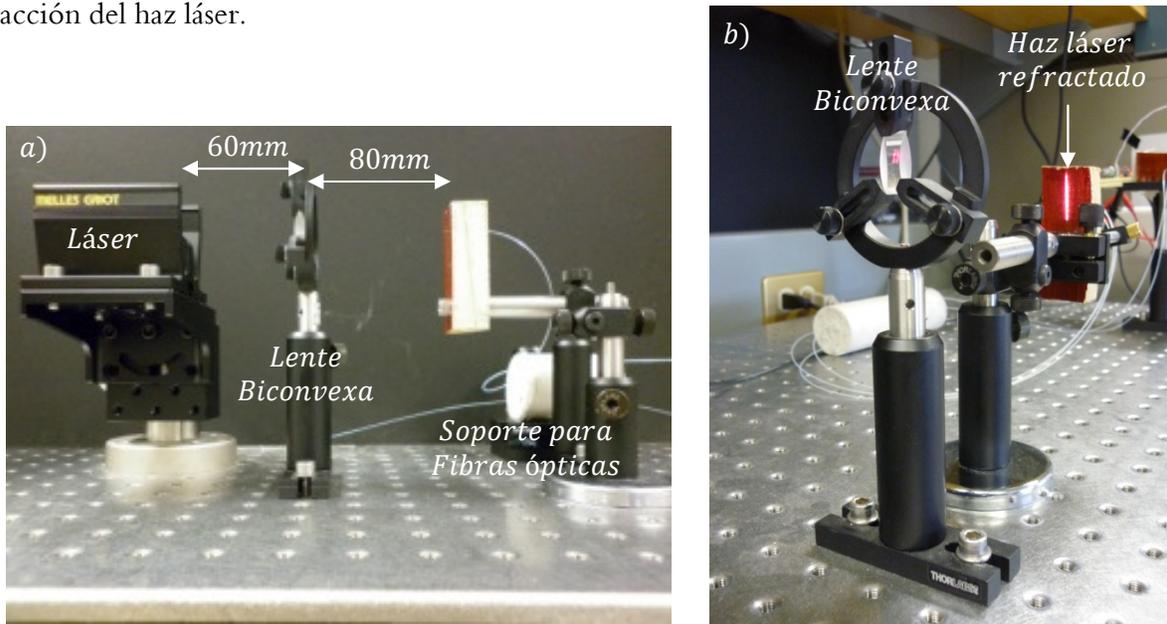


Figura 2.26. a) Instalación del láser, lente biconvexa y fibras ópticas, b) Haz láser refractado por la lente biconvexa

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, η es la eficiencia cuántica, q es la carga del electrón (1.6×10^{-9} *Coulomb*), h es la constante de Planck y ν 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 56Ω . Figura 2.27.

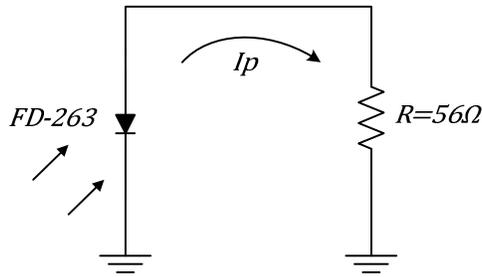


Figura 2.27. Circuito fotodetector, fotodiodo con una resistencia de carga [24]

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 inversa¹⁸ 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 56Ω , 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.

¹⁸ Modo Fotoconductorivo

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>
- [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>
- [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>, FG-200-LCR ó BFL22-200. <http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=360&PN=BFL22-200>
- [23] Hecht Eugene, *Optics*, 3rd edition, Addison Wesley Longman, United States, 1998.
- [24] Sharma K. K., *Optics Principles and Applications*, 1st edition, Academic Press by Elsevier, United States, 2006.
- [25] Desmarais Louis, *Applied Electro-Optics*, 1st edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, United States, 1998.