

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 0.7σ , 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**

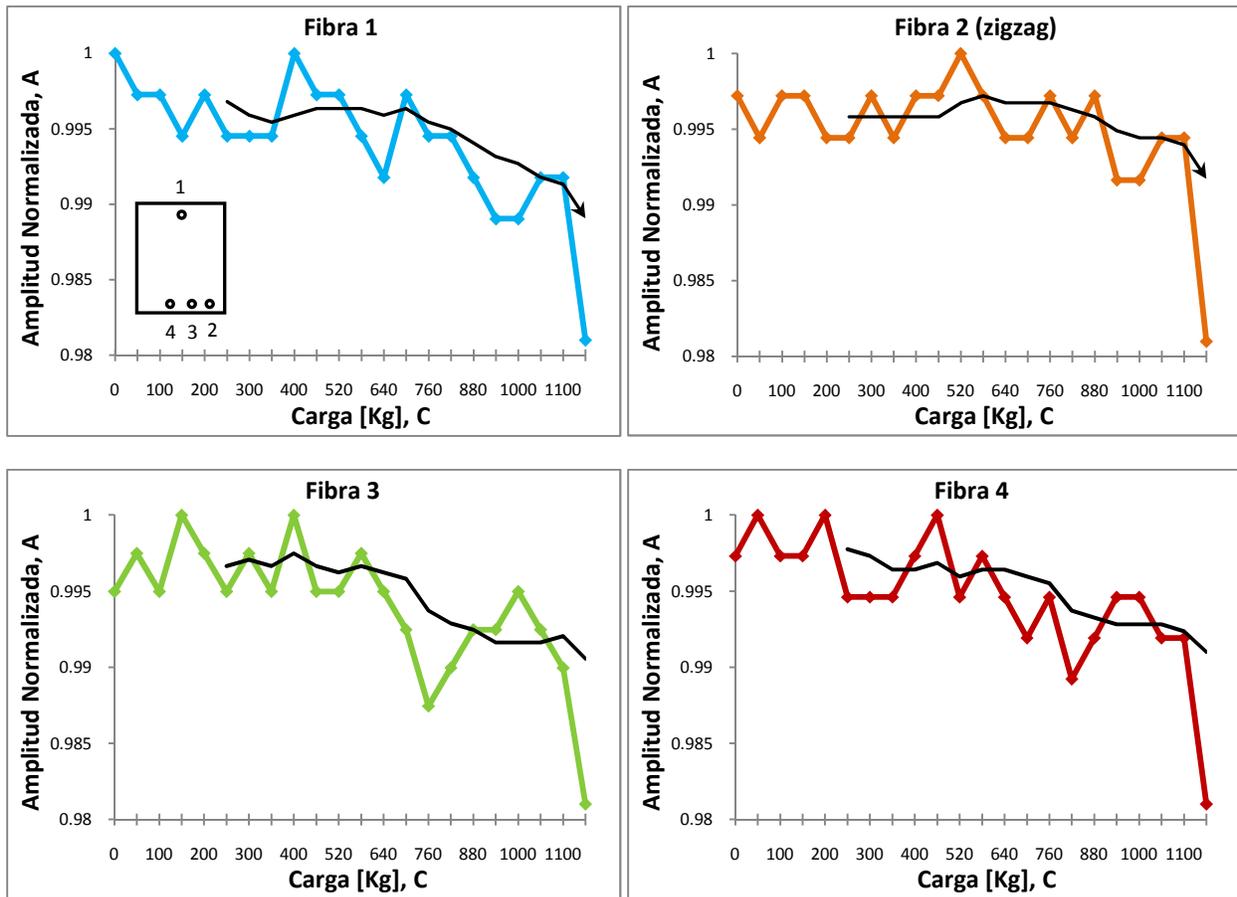


Figura 4.1. Resultados correspondientes a la viga 1. Amplitud normalizada (A) de la señal de salida en función de la carga aplicada (C) a la viga en Kg

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

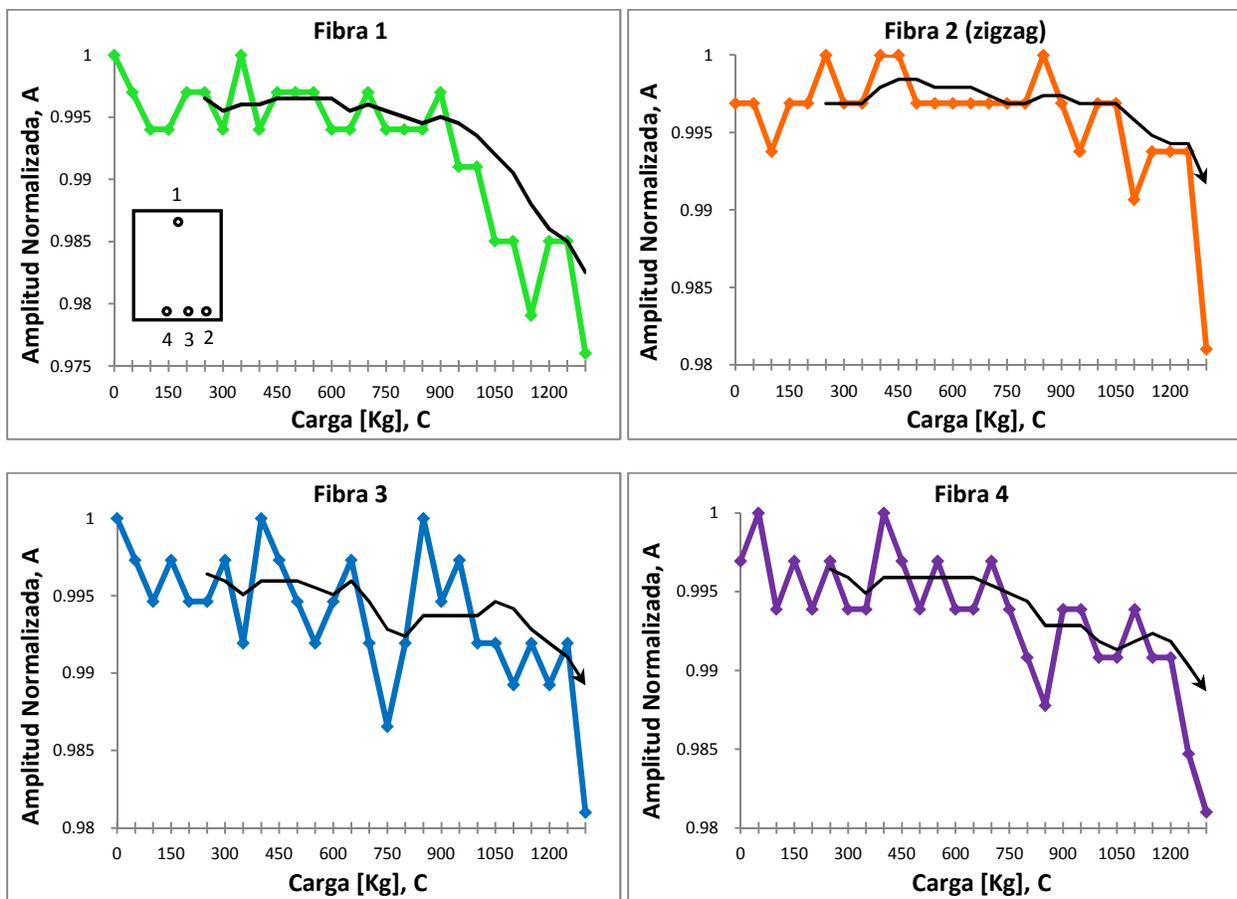


Figura 4.2. Resultados correspondientes a la viga 2. Amplitud normalizada (A) de la señal de salida en función de la carga aplicada (C) a la viga en Kg

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

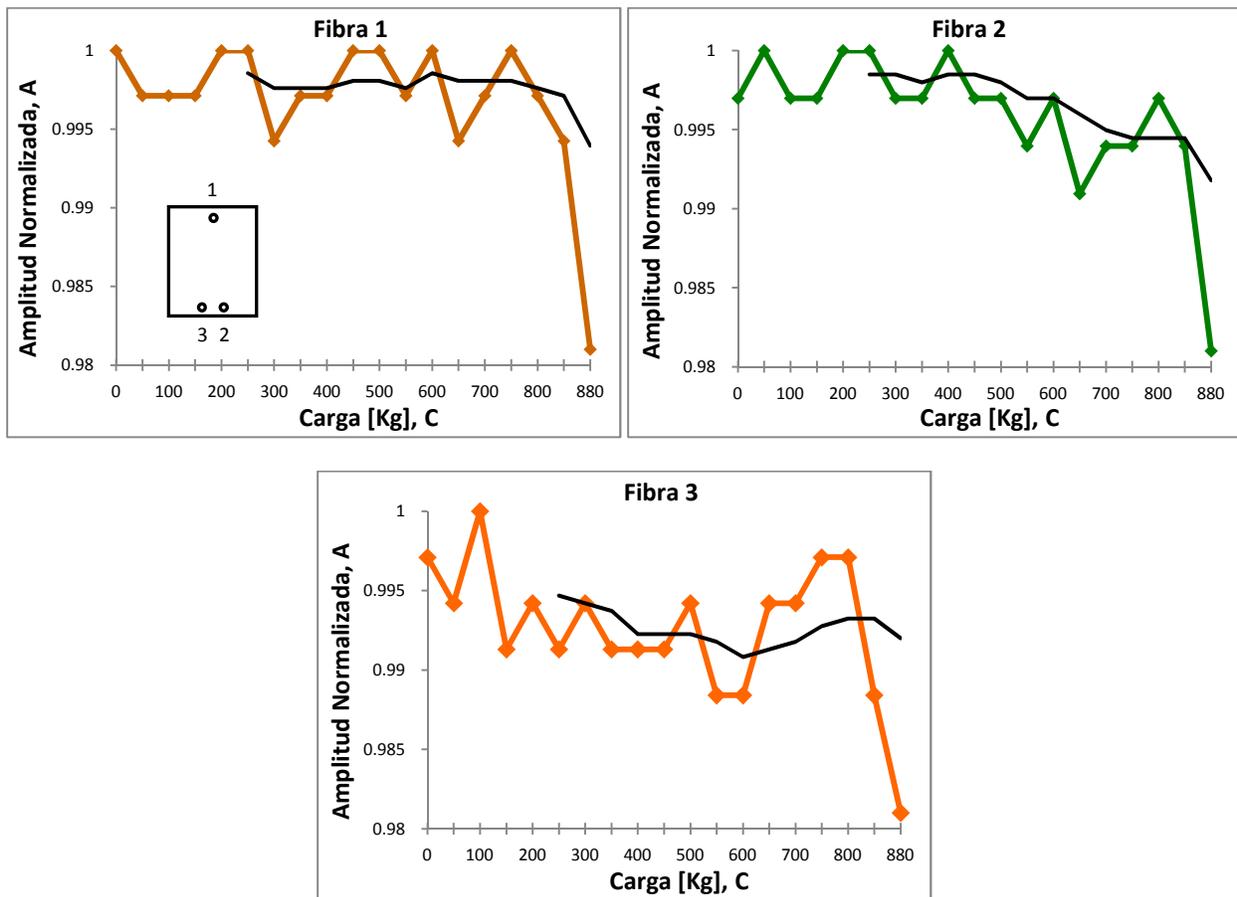


Figura 4.3. Resultados correspondientes a la viga 3. Amplitud normalizada A de la señal de salida en función de la carga aplicada C a la viga en Kg

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.

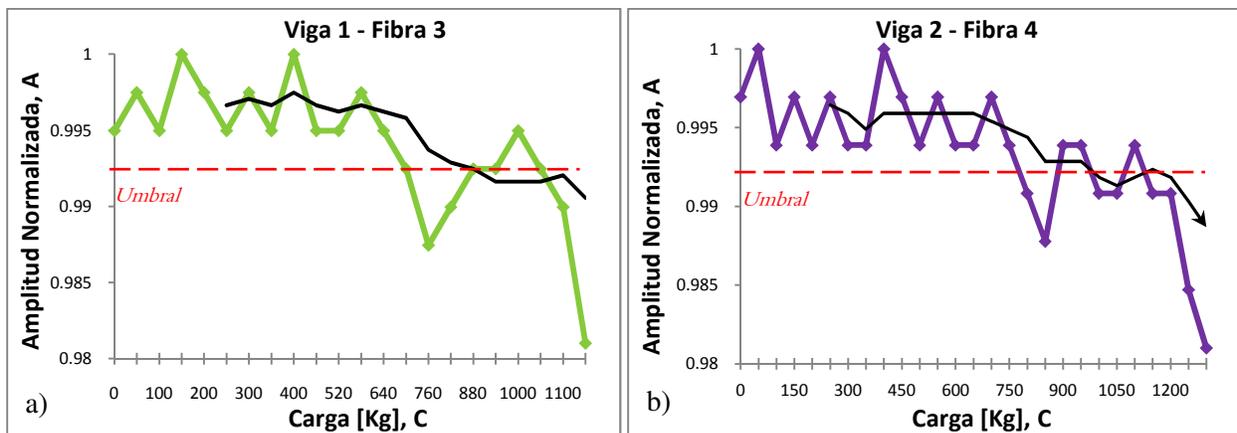


Figura 4.4. Nivel de umbral propuesto en la respuesta en amplitud de la fibra óptica 3. a) Viga 1, b) Viga 2

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.

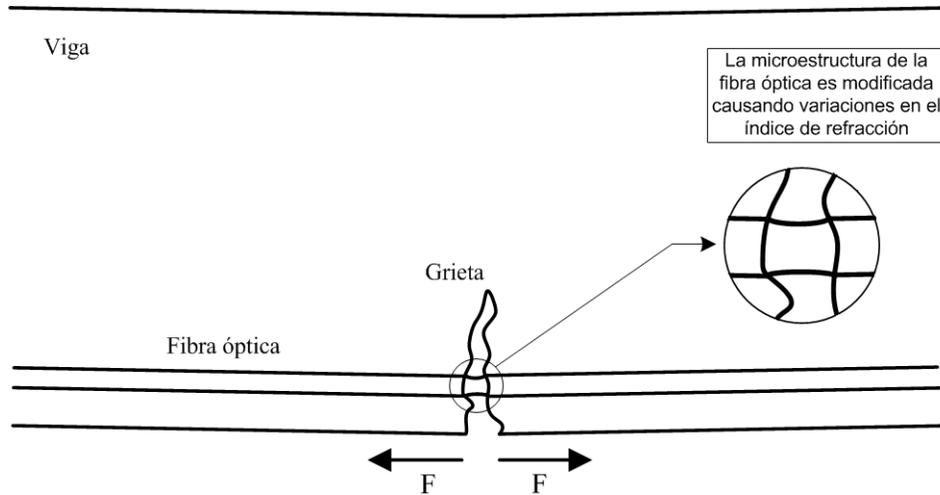


Figura 4.5. Efecto de las fuerzas de tensión en la microestructura de la fibra óptica

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 Tefzel²⁵, 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).

²⁵ 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 0.7σ . 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 σ . 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>
- [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.