

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 perturbadores¹⁹, y factores de ruido²⁰.
- 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.

¹⁹ Factor que no es controlable pero puede medirse

²⁰ 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 confianza²¹ 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,

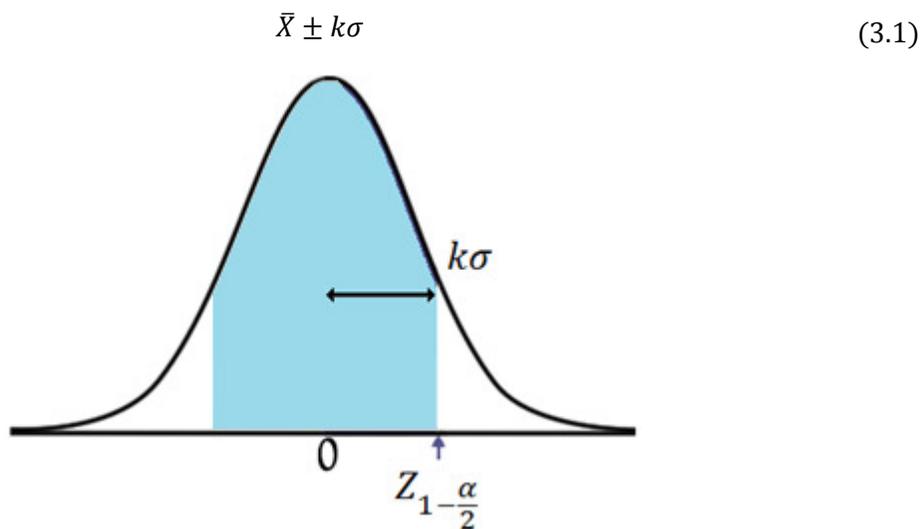


Figura 3.1. Forma de la distribución normal estándar

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}

σ – desviación estándar de la población

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

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

α = Probabilidad de que el valor estimado NO caiga con una precisión k

²¹ 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 (μ) 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

Precisión k	Nivel de confianza = 90%	Nivel de confianza = 95%
	$n = \left(\frac{1.65}{k}\right)^2$	$n = \left(\frac{1.96}{k}\right)^2$
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	7.84
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 experimental²². 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

²² 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 cilindros²³ 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 μ 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.

²³ 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.

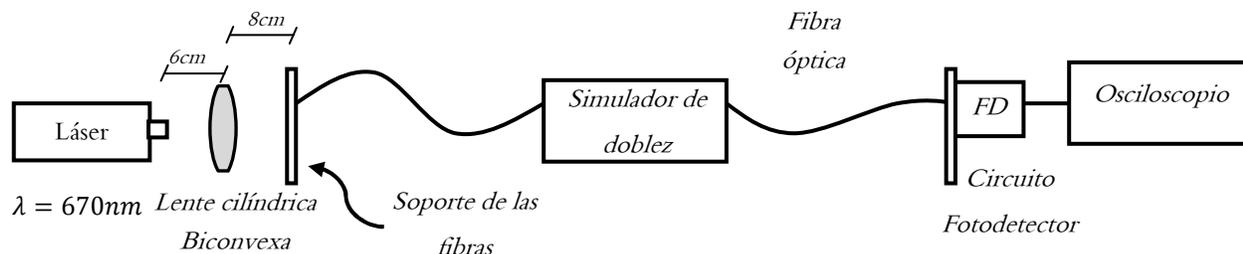


Figura 3.2. Esquema de la prueba de doblamiento en la fibra óptica

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.

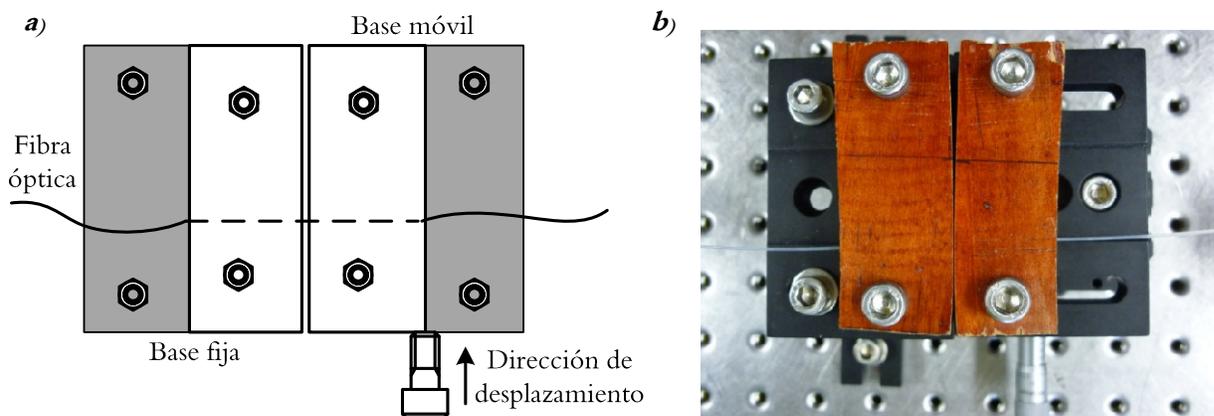


Figura 3.3. a) Esquema del simulador de doblamiento y b) foto real del implementado

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 óptica²⁴. La figura 3.4 muestra un esquema de la prueba para distintos desplazamientos (d).

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

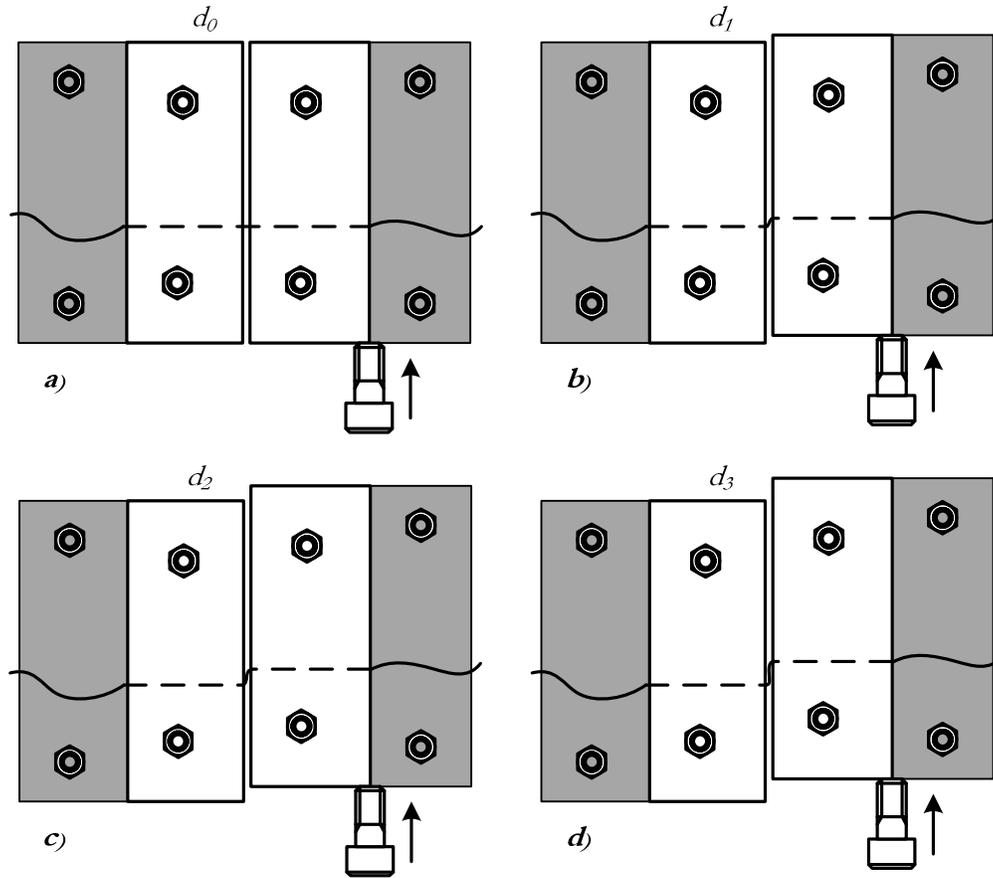


Figura 3.4. Esquema de la prueba de doblamiento para distintos valores de desplazamiento (d)

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.

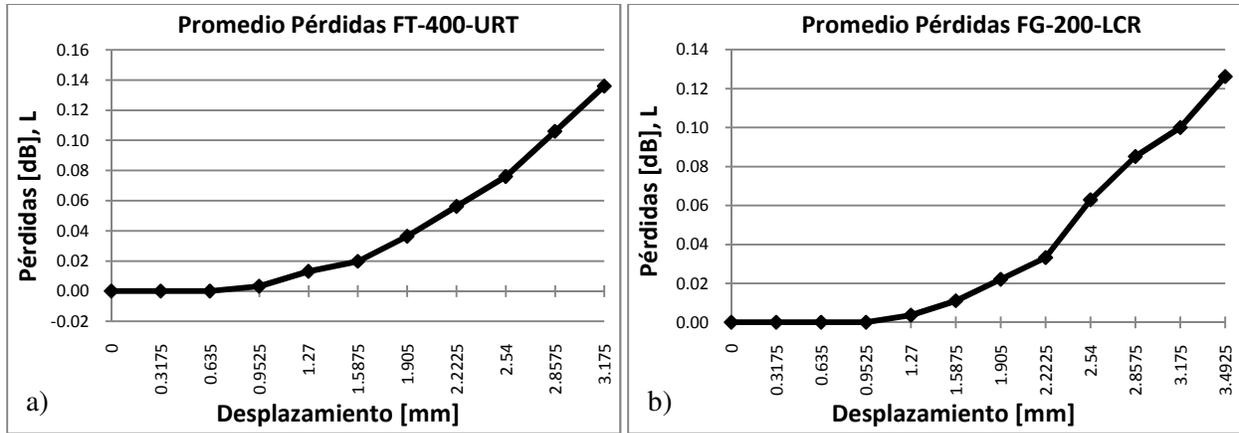


Figura 3.5. Pérdidas promedio L de la señal de salida vs desplazamiento d para las fibras ópticas FT-400-URT (a) y FG-200-LCR (b)

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.

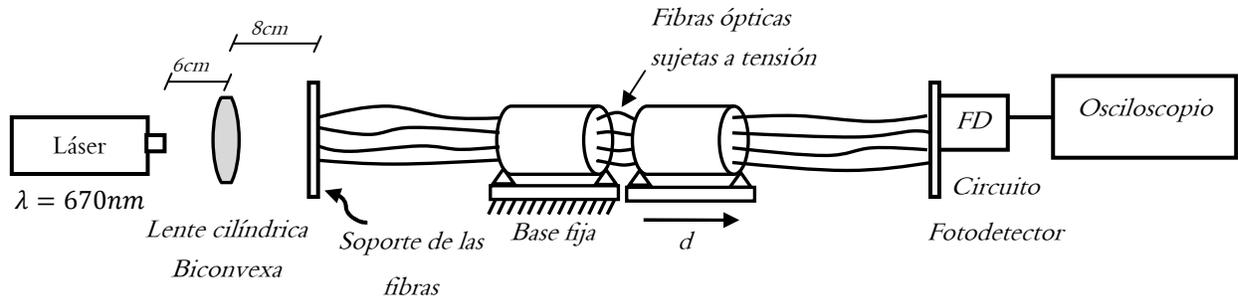


Figura 3.6. Esquema de la prueba de tensión en las fibras ópticas

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.

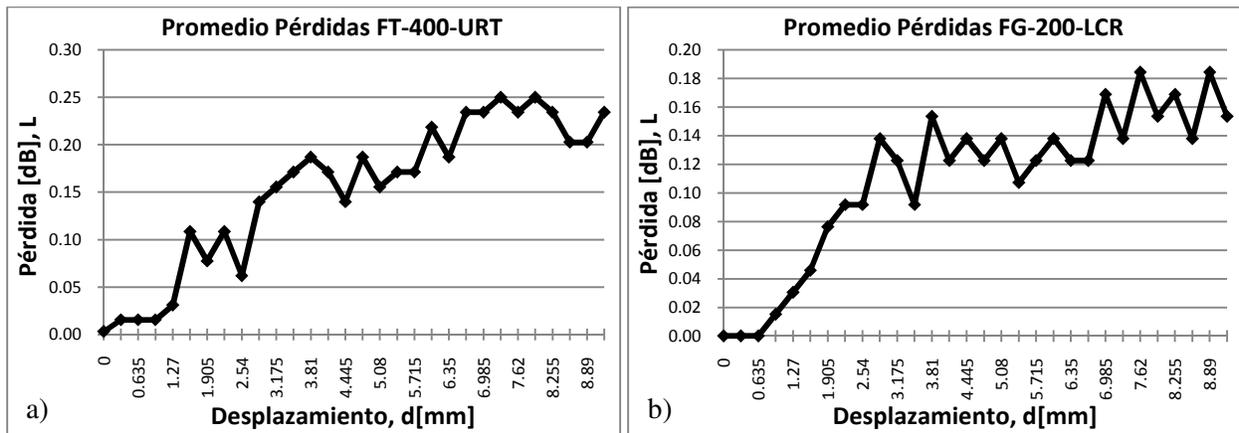


Figura 3.7. Pérdidas promedio L de la señal de salida vs desplazamiento d para las fibras ópticas FT-400-URT (a) y FG-200-LCR (b)

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 graficas 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.

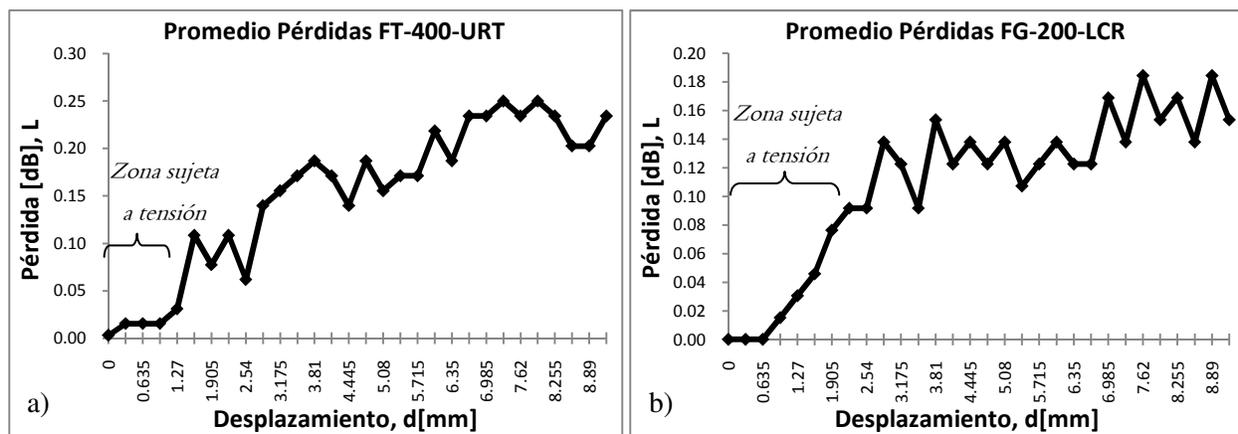


Figura 3.8. Zonas importantes en las gráficas de la prueba de tensión de la fibra óptica

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.

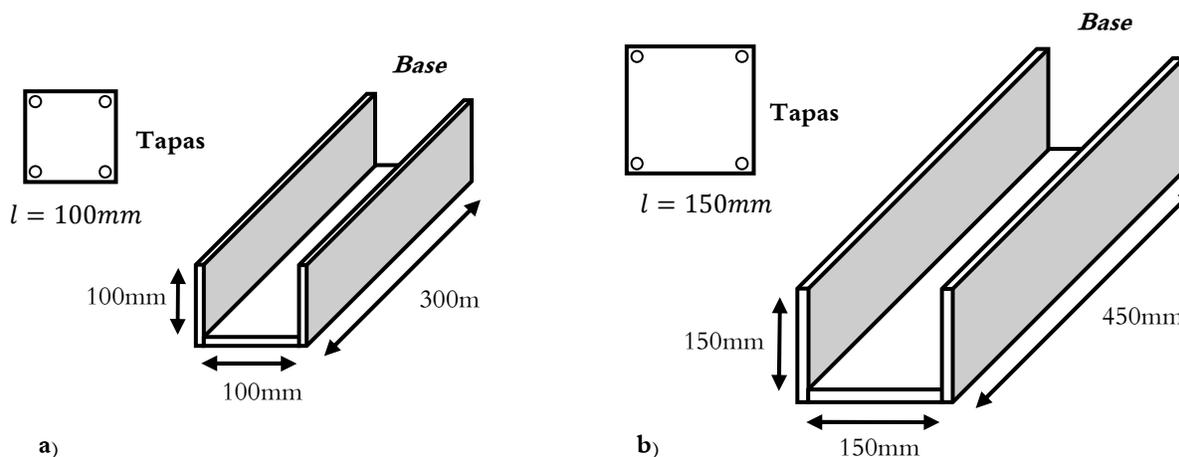


Figura 3.9. Dimensiones de los moldes de madera utilizados para la construcción de las vigas de concreto

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.

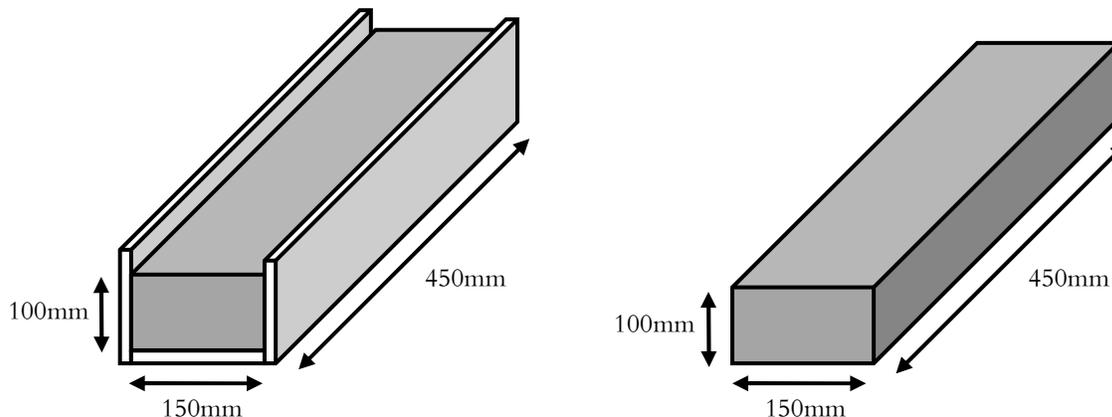


Figura 3.10. Forma de construcción para obtener las vigas rectangulares

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 Kg/cm^2
- Resistencia mínima a 28 días 306 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 ²	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.

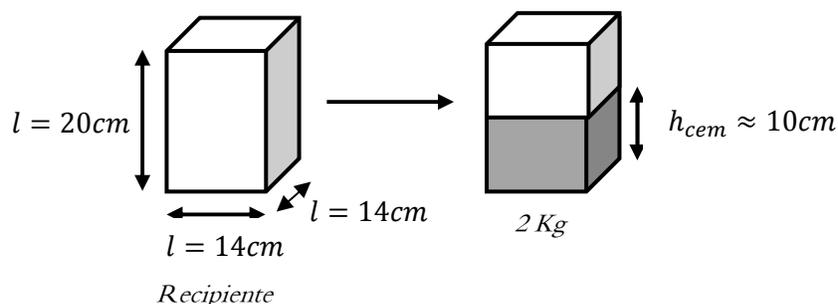


Figura 3.11. Dimensiones del molde utilizado y obtención del volumen que ocupan 2Kg de cemento

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).

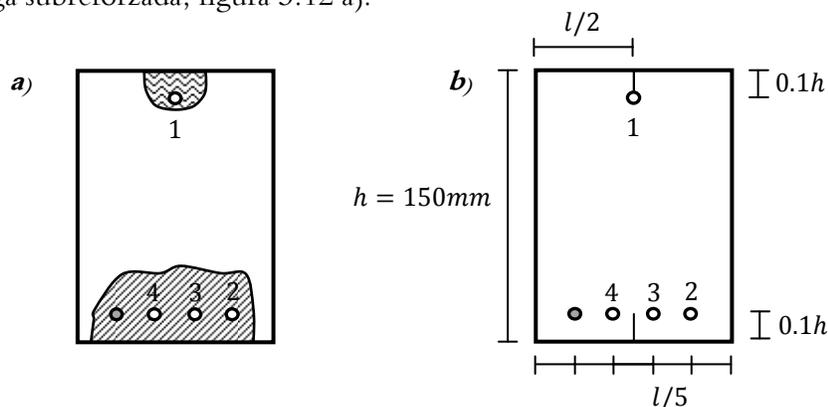


Figura 3.12. Vista transversal de la viga a) zonas de compresión y tensión b) distribución de las fibras ópticas

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.

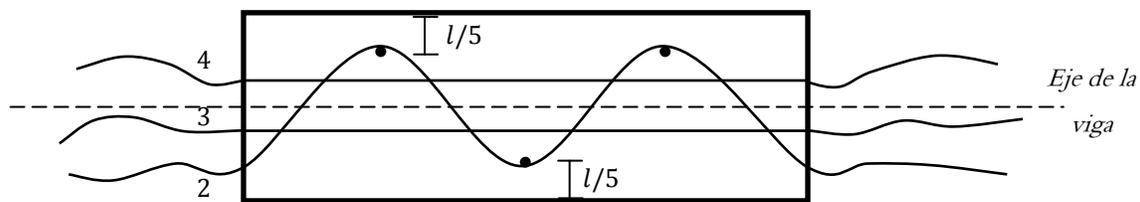


Figura 3.13. Vista inferior de la viga. Distribución de las fibras ópticas 2, 3 y 4.

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.

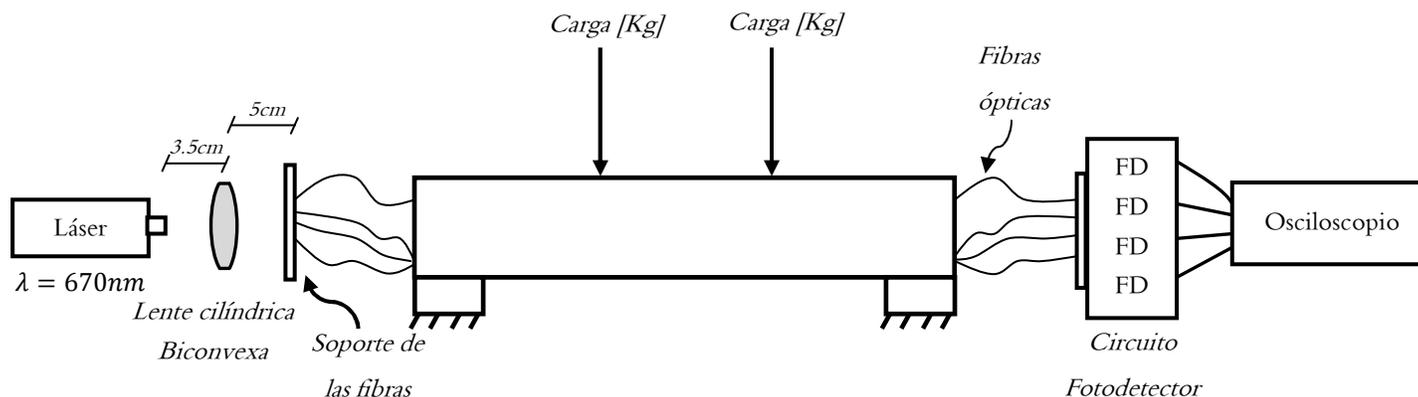


Figura 3.14. Esquema de la prueba realizada en el Laboratorio de Materiales. Arreglo experimental

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 300mm x 250mm 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.

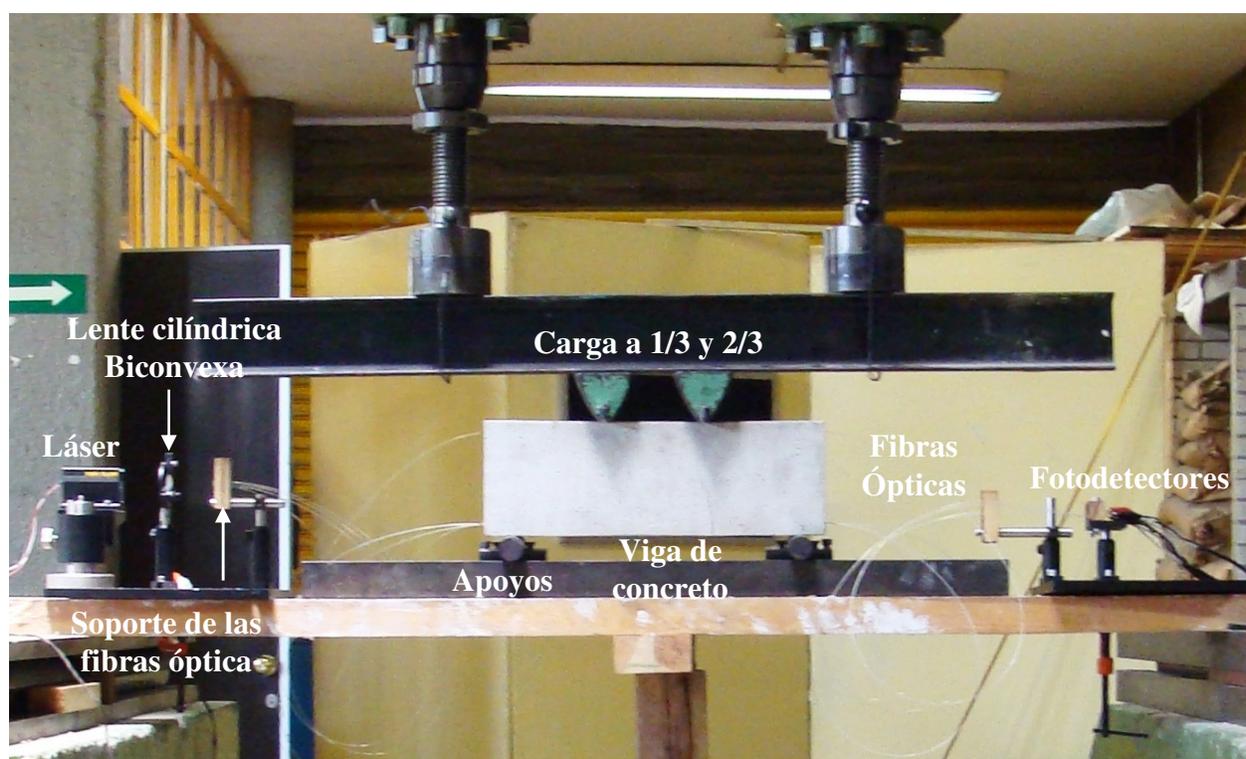


Figura 3.15. Foto real del arreglo experimental montado en el Laboratorio de Materiales FI, UNAM.

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 basó 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 basó 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>
- [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.