

3. IMPLEMENTACIÓN DE UN EXPERIMENTO PARA EL MONITOREO DE ELEMENTOS DE CONCRETO CON FIBRAS ÓPTICAS

3.1 Instrumentación del experimento

En éste capítulo se describirán los dispositivos empleados en los experimentos así como una breve descripción de sus características funcionales.

3.1.1 Tipos de fibras ópticas

Una manera de clasificar a las fibras ópticas es dependiendo de su modo de propagación:

- 1) Las fibras monomodo (SMF) son las más delgadas y sólo permite viajar al rayo óptico central. No sufre el problema de atenuación de las fibras multimodo, por lo que logra transmisiones a distancias mayores. Su inconveniente es que es difícil de construir, manipular y es más costosa.

- 2) Las fibras multimodo son de mayores dimensiones y permite la transmisión de varios rayos ópticos simultáneamente. Dentro de las fibras multimodo se pueden clasificar a su vez por la distribución del índice de refracción en la cubierta, es decir, en fibras multimodo de índice escalonado y fibras multimodo de índice gradual.

A continuación en la tabla 3.1 se muestran las características físicas y de fabricación de diferentes fibras ópticas disponibles en el laboratorio y que fueron empleadas en los experimentos.

Implementación del experimento

Tabla 3.1 Especificaciones de las fibras ópticas

Parámetro	FG-200 UCR (Silice)	FG-200 LCR (Silice)	GFIB (Monomodo)	FG-365 LEC (Silice)	FT-200 URT	FT-400 URT	AFS 50/125	AFS 105/125
Diámetro núcleo	200 ± 8 μm	200 ± 8 μm	10.4 ± 0.8 μm	365 ± 14 μm	200 ± 5 μm	400 ± 8 μm	50 μm	105 μm
Diámetro cladding	240 ± 5 μm	240 ± 5 μm	125 ± 1.0 μm	400 ± 8 μm	225 ± 5 μm	425 ± 10 μm	125 μm	125 μm
Diámetro coating	260 ± 6 μm	260 ± 6 μm	245 ± 15 μm	425 ± 10 μm	-----	-----	-----	-----
Diámetro Buffer	400 ± 30 μm	400 ± 30 μm	-----	730 ± 30 μm	500 ± 30 μm	730 ± 30 μm	250 μm	250 μm
Apertura numérica	0.22 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.13	0.22 ± 0.02	0.48 ± 0.2	0.48 ± 0.03	0.22	0.22
Atenuación	@ 850 nm 12 dB/km	@ 850 nm 12 dB/km	@ 1550 nm < 0.09 dB	@ 850 nm 12 dB/km	@ 820 nm 12 dB/km	@ 820 nm 12 dB/km	-----	-----
Temperatura de operación °C	-65 a 135	-65 a 135	-55 a 85	- 65 a 135	-40 a 150	-40 ^a 150	-269 a 750	-269 a 750
Nivel de prueba kpsi	105	105	>100 (0.7 GN/m ²)	100	70	70	50 – 70	50 – 70
Concentración OH	Alta	Baja	-----	Baja	Alta	Alta	Baja	Baja

Implementación del experimento

3.1.1.1 Características de las fibras ópticas

La figura 3.1 muestra los diagramas físicos y las características de aplicación de las diferentes series de fibras ópticas.

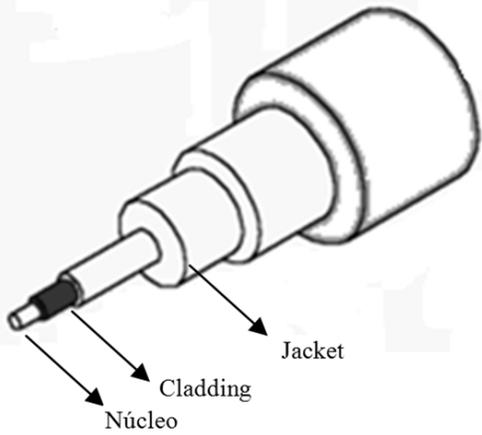
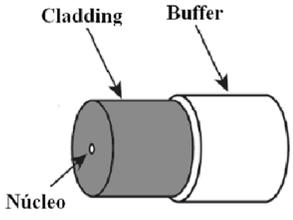
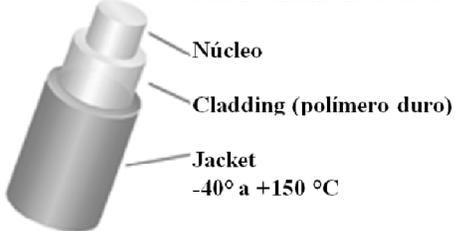
<p>SERIES FG</p> 	<p>SERIES GFIB (MONOMODO)</p> <ul style="list-style-type: none">- Mejora fotosensitividad- Bajas perdidas por empalme- Muy buena uniformidad 
<p>SERIES FT</p> <ul style="list-style-type: none">- Alta apertura numérica- Acoplamientos sobre 370% más que las fibras con silica-clad estándar- Menos requerimientos de alineación de fibra- Reducida curva de pérdidas. <p>Fibra Multimodo 0.48 AN</p> 	<p>SERIES AFS</p> <ul style="list-style-type: none">- Bajas perdidas en el infrarrojo cercano- Baja concentración de OH provee alta eficiencia de transmisión- Rango de transmisión espectral útil de 400 a 2400 nm

Figura 3.1 Características de las fibras

3.1.2 Descripción de la Fuente de luz

Diodo láser

El laser se caracteriza porque su emisión es siempre coherente, es decir, los trenes de ondas que emergen de él están siempre en fase, independientemente de cuál sea su ancho espectral de emisión (que siempre es mucha más reducido que el de los LED, hasta en órdenes de magnitud)

El Diodo laser con respecto al LED es mucho más rápido, su potencia de salida es mayor y su haz es coherente, por lo que acopla más potencia óptica a la fibra, su construcción es más compleja, su potencia óptica de salida depende fuertemente de la temperatura, es bastante susceptible a transitorios, es más costoso y requiere de un circuito de excitación con compensación de temperatura, con compensación contra envejecimiento y de protección contra transitorios. Tiene una alta eficiencia de acoplamiento, puede modularse a velocidades altas (GHZ) y su ancho espectral es menor de 5nm. [1]

Para los experimentos se utilizó un diodo laser marca COHERENT con las siguientes especificaciones:

- Longitud de onda típica de 670 [nm]
- Clase III a. Seguro para la vista sin ayuda de protectores de la luz visible o infrarroja, pero posiblemente inseguro cuando es visto con instrumentos.
- Superficie emisora: 4.6 mm x 1.3mm
- Potencia de salida de 4.1 [mW].
- Ancho espectral máximo 500 kHz
- Temperatura de operación -10° C a +40°C y por consiguiente encaja con el rango de temperatura de fibras perfectamente.
- Corriente de operación umbral 190 mA. Es la corriente mínima a la cual el laser opera.

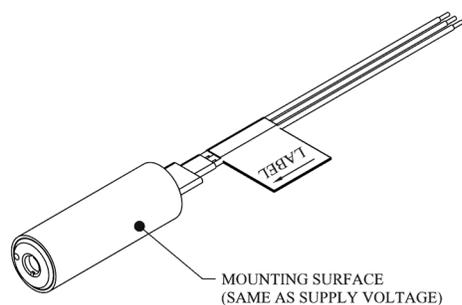


Figura 3.2 Diodo laser COHERENT

Del otro extremo del diodo se adaptaron dos conectores BNC - hembra, uno de ellos sirve para polarizar el diodo y encenderlo, el otro puede servir para modularlo dependiendo del tipo de señal y frecuencia introducida.

3.1.3 Descripción del fotodiodo

El fotodiodo es un dispositivo electrónico que convierte señales ópticas en señales eléctricas. Por lo tanto, se puede utilizar el fotodiodo en muchos experimentos o aplicaciones como un detector de radiación. Existen dos formas de operación de un fotodiodo que son:

- 1) Modo Fotovoltaico
- 2) Modo Fotoconductorivo

La elección de uno de estos dos modos de operación dependerá del tipo de resultado. Para los experimentos realizados se utilizó un fotodiodo **ФД-263** (figura 3.3) configurado en modo fotoconductorivo.

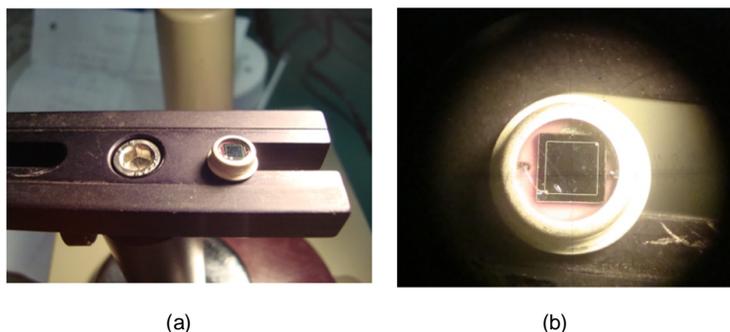


Figura 3.3 a) Fotodiodo vista frontal b) Fotodiodo vista desde microscopio

Implementación del experimento

Modo fotoconductorivo

En el modo fotoconductorivo se conecta el fotodiodo en serie con R_L , con polarización inversa. El comportamiento de este modo se muestra en el tercer cuadrante de la Figura 3.4. En este modo se puede usar resistencias de carga R_L muy altas sin perder la linealidad. La capacitancia de la unión disminuye con la polarización dado que la zona de agotamiento es ampliada. Aquí el valor típico de la capacitancia es 10 pF/mm^2 que es 10 veces más pequeña que en el modo fotovoltaico. Debido a esto, la frecuencia del codo de respuesta es aumentada, y en consecuencia el límite es el valor RC del circuito externo.

La desventaja de este modo con respecto al modo fotovoltaico es que el PER (Potencia Equivalente de ruido) es más grande. Para el uso de frecuencias por debajo de 1 kHz es preferible usar el modo fotovoltaico.

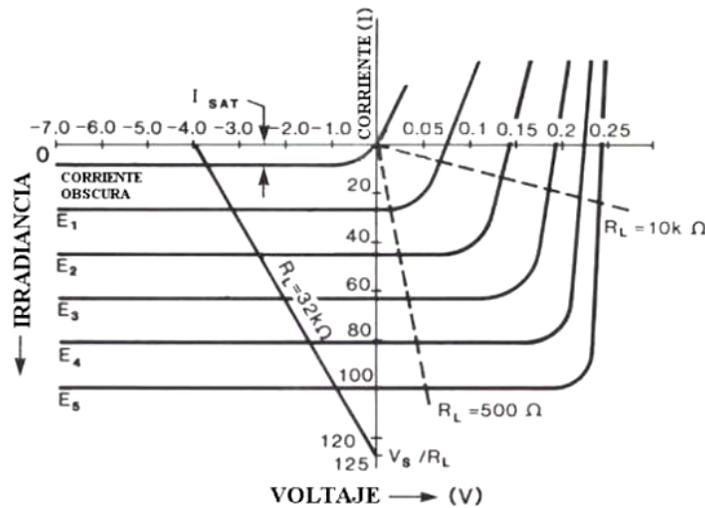


Figura 3.4 Características típicas corriente-voltaje de un fotodiodo de unión

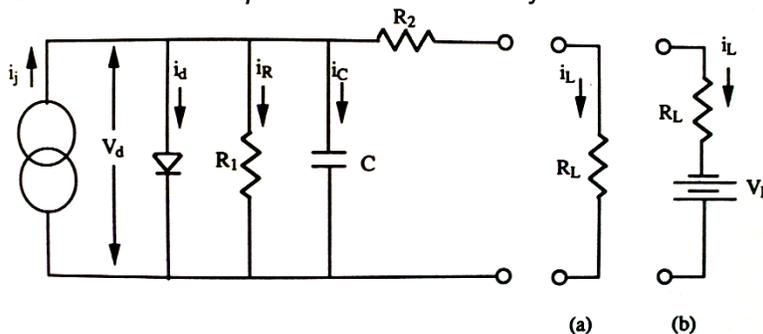


Figura 3.5 Circuito equivalente de un fotodiodo en modo fotovoltaico(a) y modo fotoconductorivo (b)

3.1.3.1 Características del fotodiodo

A continuación se presentan las principales características técnicas del fotodiodo **ФД-263**, así como sus dimensiones físicas de acuerdo a las hojas de especificaciones disponibles en [2] [3].

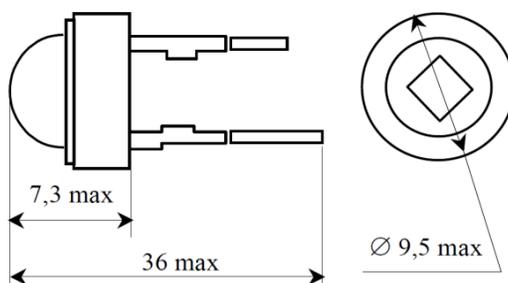


Figura 3.6 Dimensiones físicas del fotodiodo de silicio **ФД-263**

Tabla 3.2 Especificaciones del fotodiodo **ФД-263**

Descripción	Valor
Material	Silicio
Área celda [mm ²]	3x3
Temperatura [°C]	20 +/- 5
Voltaje de Trabajo [V]	0.2
Intervalo de λ [μm]	0,4 – 1,1
Intervalo de λ_{MAX} [μm]	0,8 – 0,9
Corriente de oscuridad [μA]	5
Responsividad [A/Watt] @ $\lambda=0.55$ [μm]	15
R aislamiento [M Ω]	100
Masa [g]	3

3.1.4 Coeficiente de absorción α

El coeficiente de absorción para un semiconductor en equilibrio térmico, ya sea intrínseco o dopado está determinado por [4]:

$$\alpha(\nu) = \frac{\sqrt{2} m_r^{3/2} \lambda^2}{h^2 \tau_r} (h\nu - E_g)^{1/2} [f(E_1) - f(E_2)] \quad (3.1)$$

Donde:

m_r = Es la masa reducida de un par electrón-hueco en un semiconductor.

τ_r = Es el tiempo de vida de una recombinación radiante electrón-hueco (constante)

E_1 y E_2 son las energías del electrón-hueco interactuando con un fotón en la banda de conducción y valencia respectivamente.

E_g = Energía del gap (eV)

Si el nivel de Fermi está situado en la banda del gap pero alejado del borde de la misma por una energía equivalente a varias veces $K_B T$, entonces $f(E_1) \approx 1$ y $f(E_2) \approx 0$, así que $f(E_1) - f(E_2) \approx 1$. En este caso, la contribución directa banda a banda a el coeficiente de absorción es [4].

:

$$\alpha(\nu) = \frac{\sqrt{2} c^2 m_r^{3/2}}{\tau_r} \frac{1}{(h\nu)^2} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.2)$$

La masa reducida m_r de un par electrón-hueco en un semiconductor está en función de la masa efectiva de un electrón en la banda de conducción (m_c) y la masa efectiva de un hueco en la banda de valencia (m_v), cuyos valores se muestran en la siguiente tabla y se determinan por la siguiente fórmula.

$$m_r = \frac{m_c m_v}{m_c + m_v} \quad (3.3)$$

Implementación del experimento

Tabla 3.3 Promedio de las masas efectivas de los electrones y huecos en el Si y

GaAs

	m_c / m_o	m_v / m_o
Si	0.33	0.5
GaAs	0.07	0.5

$m_o = \text{masa del electrón} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$

La region espectral en donde el material cambia de un inicio relativamente transparente ($h\nu < E_g$) a una absorcion fuerte ($h\nu > E_g$) es conocida como borde de absorción. El mecanismo más importante para los fotoemisores y fotodetectores es le proceso de absorcion y emision banda a banda. La absorción e emision directa banda puede darse solo a frecuencias para las cuales la energía del fotón es mayor que la energía del gap ($h\nu_g > E_g$).

La mínima frecuencia necesaria para que esto ocurra es $h\nu_g = \frac{E_g}{h}$, así que la maxima longitud de onda correspondiente se obtiene al expresar la energia en eV y sustituyendo ν_g y h en unidades apropiadas. Por lo tanto la longitud de onda de gap en μm esta dada por:

$$\lambda_g = \frac{1.24}{E_g} \quad (3.4)$$

Donde:

λ_g = Longitud de onda del gap (μm)

E_g = Energia del gap (eV)

Los valores representativos de E_g y λ_g son mostrados en la siguiente tabla para mteriales semiconductores intrinsecos seleccionados.

Implementación del experimento

Tabla 3.4 Semiconductores elementales y binarios III-V con sus energías de Gap y longitud de onda Gap λ_g a $T=300K$.

Material	Energía de Gap E_g (eV)	Longitud de onda de gap λ_g (μm)	Tipo
Ge	0.66	1.88	I
Si	1.11	1.15	I
AlP	2.45	0.52	I
AlAs	2.16	0.57	I
AlSb	1.58	0.75	I
GaP	2.26	0.55	I
GaAs	1.42	0.87	D
GaSb	0.73	1.70	D
InP	1.35	0.92	D
InAs	0.36	3.5	D
InSb	0.17	7.2	D

La absorción de un fotón de una apropiada energía provoca la transición de un electrón excitado de la banda de valencia a la banda de conducción generando un par electrón-hueco, que se suma a la concentración de portadores móviles de carga e incrementa la conductividad del material. Las condiciones para que se realice este proceso de absorción son la conservación de energía y conservación del momento. En un semiconductor de gap indirecto este proceso se realiza en dos pasos, como se ilustra en la siguiente figura.

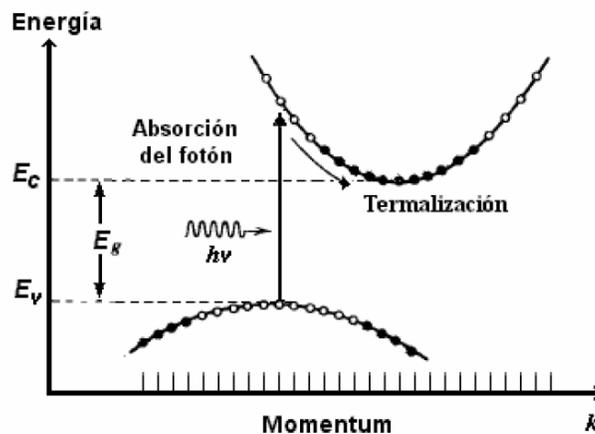


Figura 3.7 Absorción de un fotón en un semiconductor de gap indirecto y visualización del proceso de thermalización

El electrón es excitado en el nivel de energía más alto hacia la banda de conducción por medio de una transición vertical. Éste rápidamente se esparce en

Implementación del experimento

la parte inferior de la banda de conducción por un proceso llamado termalización (dispersión portador-fotón), en el cual su momentum es transferido a los fotones. El hueco generado se comporta similarmente. Debido a que este proceso ocurre secuencialmente no requiere la presencia simultánea de tres cuerpos (electrón - fotón y fonón). Es así que el Si es un fotodetector muy eficiente.

3.1.5 Eficiencia cuántica (η)

Una cantidad estrechamente relacionada con los detectores es la eficiencia cuántica η y está definida como la probabilidad de que un fotón individual incidente en el dispositivo, genere un par de fotoportadores que contribuyan a la corriente eléctrica del detector. Cuando 2 o más fotones están incidiendo, η es la razón entre el flujo de pares electrón-hueco generados que contribuyen a la corriente eléctrica del detector y el flujo de fotones incidentes.

$$\eta = \frac{\# \text{ electrones colectados}}{\# \text{ Fotones incidentes}}$$

Así

$$\eta = \frac{r_e}{r_p} \quad \text{Donde:}$$

r_p es la tasa de fotones incidentes (fotones por segundo)

r_e electrones colectados (electrones por segundo)

No todos los fotones incidentes producen pares electrón-hueco por qué no todos los fotones son absorbidos. Algunos fotones simplemente son absorbidos por la probabilidad natural del proceso de absorción. Otros pueden ser reflejados en la superficie del detector reduciendo la eficiencia cuántica. Además, algunos pares electrón-hueco se recombinan rápidamente y son incapaces de contribuir a la corriente del detector.

Si la luz no está enfocada apropiadamente dentro del área activa del detector, que es el área en donde se realiza la detección, algunos fotones se perderán. Este

Implementación del experimento

efecto no está incluido en la definición de eficiencia cuántica, sin embargo está asociado con el uso del dispositivo más que con sus propiedades intrínsecas.

La expresión que define a la eficiencia cuántica es la siguiente [4]:

$$\eta = (1 - R)\zeta[1 - \exp(-\alpha \cdot d)] \quad (3.5)$$

Donde:

R = reflectancia de la potencia óptica en la superficie

ζ = Fracción de pares electrón-hueco que contribuyen exitosamente a la corriente del fotodetector

α = coeficiente de absorción del material (cm^{-1})

d = profundidad del detector

- El factor $(1 - R)$ representa el efecto de reflexión en la cara del dispositivo y está en función del índice de refracción de los materiales utilizados en la fabricación del fotodetector. La reducción puede ser reducida por el uso de materiales de antireflexión.
- El segundo factor ζ es la fracción de los pares electrón-hueco que evitan exitosamente la recombinación en la superficie del material y que contribuyen a la fotocorriente útil.
- El tercer factor $[1 - \exp(-\alpha \cdot d)]$ representa la fracción del flujo de fotones absorbidos en el material, el cual debe tener un valor de d suficientemente grande para maximizar este factor. El valor de d debe ser mayor al coeficiente de absorción para asegurar que los fotones incidentes sean completamente absorbidos [4].

La eficiencia cuántica está en función de la longitud de onda principalmente por que el coeficiente de absorción α depende de la misma, como se ilustra en la figura 3.8. Para los diferentes materiales semiconductores de los fotodetectores, η

Implementación del experimento

es grande con una ventana espectral que está determinada por las características del material. Las ventanas para diferentes semiconductores se pueden observar en la figura 3.9.

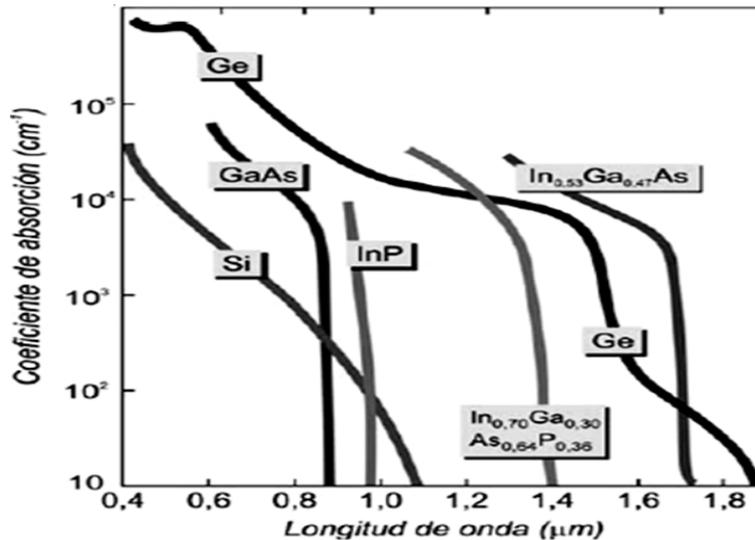


Figura 3.8 Coeficientes de absorción de diferentes semiconductores

La eficiencia cuántica no puede ser mayor a 1 debido a la definición formal, sin embargo valores mayores a 1 son posibles si η es definida como la razón de los electrones de salida y los fotones de entrada. También se pueden lograr valores mayores a 1 por medio de la amplificación interna, que es el efecto de producir múltiples electrones en la salida por un simple fotón absorbido [5], [6].

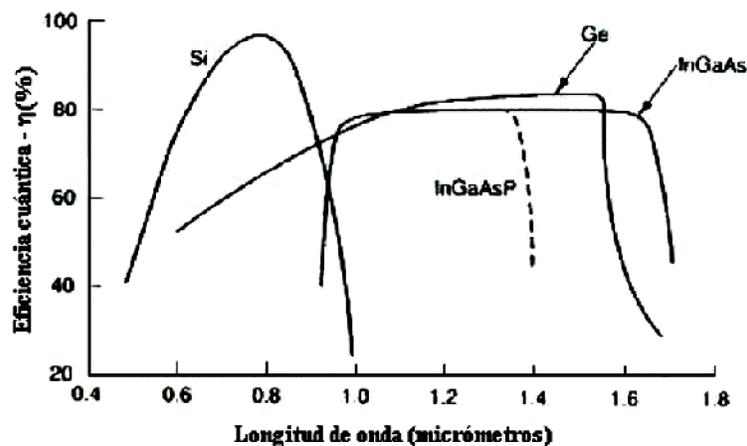


Figura 3.9 Valores típicos de eficiencia cuántica en diferentes longitudes de onda para distintos materiales semiconductores

Implementación del experimento

La eficiencia cuántica es comúnmente escrita como un porcentaje, por ejemplo: una eficiencia cuántica de 75% es equivalente a 75 electrones recaudados por cada 100 fotones incidentes). Finalmente, de igual manera que el coeficiente de absorción, la eficiencia cuántica es una función de la longitud de onda del fotón y por consiguiente debería ser expresada para una longitud de onda específica [5].

3.1.6 Sensibilidad o Responsividad, \mathfrak{R} (A/W).

La expresión de eficiencia cuántica no involucra la energía del fotón, por lo tanto la Responsividad R es comúnmente más utilizada cuando se caracteriza el desempeño de un Fotodetector. Es definida como:

$$R = \frac{I_p}{P_0} (AW^{-1}) \quad (3.6)$$

Donde:

I_p es la fotocorriente de salida en amperes y P_0 es la potencia óptica incidente en watts. La responsividad es un parámetro muy útil y muestra la transferencia característica del fotodetector, es decir, fotocorriente por potencia óptica incidente unitaria.

La ecuación que relaciona la responsividad con la eficiencia cuántica a una determinada longitud de onda es la siguiente:

$$R = \frac{\eta e \lambda}{hc} \quad \text{ó} \quad \eta = \frac{R[A/W] * 1.24}{\lambda[\mu m]} \quad (3.7)$$

Donde:

η Eficiencia cuántica

e Carga del electrón 1.602176×10^{-19}

h Constante de Planck 6.626068×10^{-34}

λ Longitud de onda del fotón incidente

c Velocidad de la luz en el vacío 3×10^8

Implementación del experimento

La responsividad se incrementa con la longitud de onda, mientras λ crece la potencia óptica es llevada por mas fotones los cuales producen más electrones. La región sobre la cual incrementa R respecto a λ está limitada, debido a la dependencia que existe entre η y λ .

La responsividad depende de los siguientes dos factores:

- a) Si el semiconductor tiene un índice de refracción n_3 y el medio externo tiene un índice de refracción n_1 , la reflectividad en la interfaz para una onda plana es:

$$R_1 = \left(\frac{n_3 - n_1}{n_3 + n_1} \right)^2 \quad (3.8)$$

- b) Dentro del semiconductor la radiación es absorbida acorde con la ley exponencial

$$P(x) = P_0 \exp[-\alpha(\lambda)x] \quad (3.9)$$

Si $h\nu < E_g$, α es muy pequeña y el material no la absorbe; en otro caso, si $h\nu > E_g$ hay un alta probabilidad de absorción de fotones, por consiguiente, se da una generación de pares electrón – hueco.

Para minimizar la reflexión en un fotodetector, una capa con un adecuado índice de refracción n_2 ($n_1 < n_2 < n_3$) puede ser interpuesta, como se ilustra en la figura 3.9.

La reflectividad total entre el medio 1 y el medio 3 puede ser reescrita como:

$$R_1 = \left(\frac{n_3 n_1 - n_2^2}{n_3 n_1 + n_2^2} \right)^2 \quad (3.10)$$

Implementación del experimento

Entonces, si $n_2 = (n_1 \cdot n_3)^{1/2}$, R_1 es cero en la longitud de onda del fotón incidente (λ_0), y puede ser pequeña para un estrecho intervalo de longitud de onda alrededor de λ_0 .

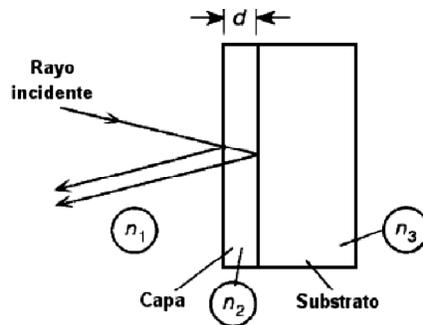


Figura 3.10 Esquema de los índices de refracción que existen en la interacción de un fotón en fotodetector

En el caso de los detectores de silicio ($n_3=3.5$) con interfaz de aire ($n_1=1$) la capa antirreflexiva debe tener $n_2 \cong 1.86$. Así que, los materiales disponibles para esta aplicación son SiO ($n=1.9$), SiO_2 ($n=1.46$), Si_3N_4 ($n=2.06$), Al_2O_3 ($n=1.76$). Ignorando la absorción en la capa antirreflexiva, la eficiencia para la reflexión es:

$$\eta_R = 1 - R_1 \quad (3.11)$$

La responsividad ideal contra la longitud de onda característica de un fotodiodo de silicio con eficiencia cuántica unitaria es ilustrada en la siguiente figura. También se muestra la responsividad típica de un dispositivo de silicio convencional [5].

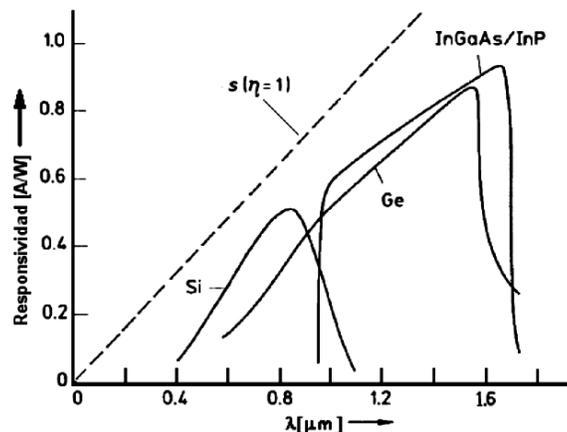


Figura 3.11 Responsividad de un fotodiodo típico

3.2 Descripción de los Experimentos

Los primeros experimentos consistieron en la elaboración de dos cilindros de concreto con las siguientes dimensiones: Largo = 300 mm y radio = 54 mm. A cada uno de los cilindros se les introdujo diez diferentes tipos de fibras ópticas de acuerdo a la tabla 3.1. La elección de cilindros fue conforme a la Norma ASTM C39 en donde establece las dimensiones de los cilindros para determinar la resistencia a compresión.

Con el primer cilindro se trataron de proteger las fibras con tubos pequeños de plástico y cobre con el fin de evitar algún daño. Para el segundo cilindro se dejaron las fibras sueltas cuidando de no desalinearlas durante el vertido de la mezcla.



Figura 3.12 Elementos de protección

Cilindro con protección



Figura 3.13 Cilindro con protección

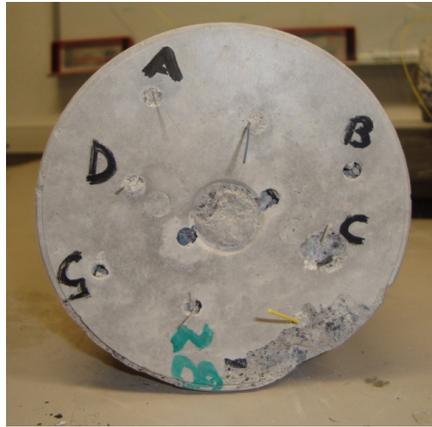


Figura 3.143 Cilindro con protección (Vista lateral)

Cilindro sin protección



Figura 3.15 Cilindro sin protección

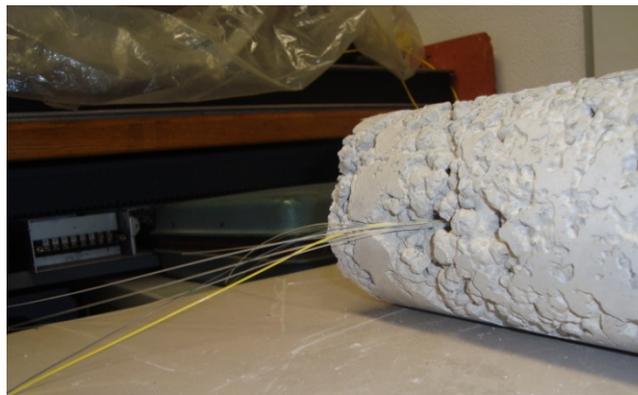


Figura 3.16 Desalineamiento de fibras

Implementación del experimento

Como se puede observar en la figura 3.16, la totalidad de las fibras tendieron a un solo lado del cilindro debido a que los agregados del concreto, especialmente la grava, no permite que las fibras se mantengan en la posición predefinida.

3.2.1 Formación del hormigón y fabricación de las muestras experimentales

Para las siguientes rondas de cilindros se utilizaron las siguientes cantidades de agregados:

- $\frac{1}{2}$ Kg cemento,
- 1 Kg Arena
- $\frac{1}{4}$ Kg Grava andesítica de 3/8
- $\frac{1}{2}$ litro de agua

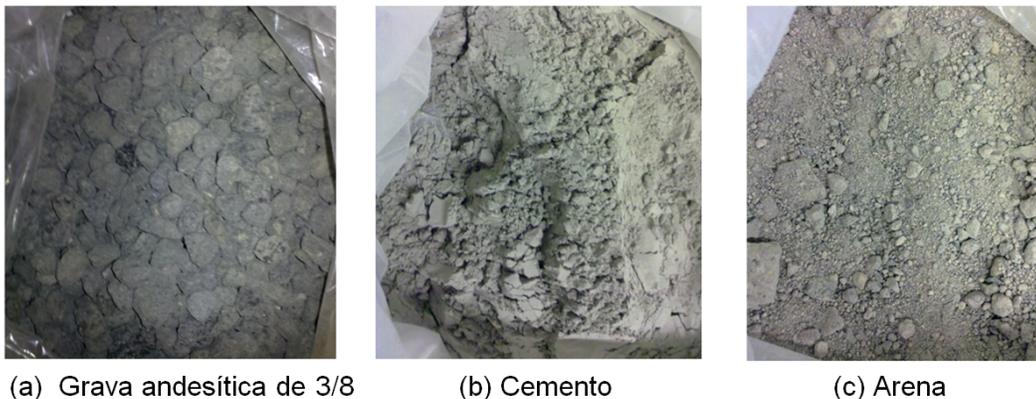


Figura 3.17 Agregados

Con estas cantidades fueron suficientes fabricar: 4 Cilindros de 255 mm largo x 50 mm radio y 2 cilindros de 75 mm de largo y 50 mm de diámetro (figura 3.18).

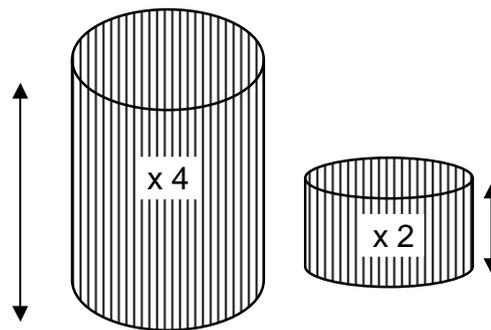


Figura 3.18 Dimensiones de los moldes

Implementación del experimento

Elaborando un arreglo de cilindros e introduciéndoles diferentes fibras de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Características de los cilindros

CILINDRO	CANTIDAD DE FIBRAS
A	3 - FT-400- URT
B	3 - FT-200- URT
C	3 - FG-200_LCR
D	1 - FG-200- LCR 1 - FT-200- URT 1 - FT-400- URT
E	1 - FG-200- LCR 1 - FT-200- URT 1 - FT-400- URT
F	1 - FG-200- LCR 1 - FT-200- URT 1 - FT-400- URT

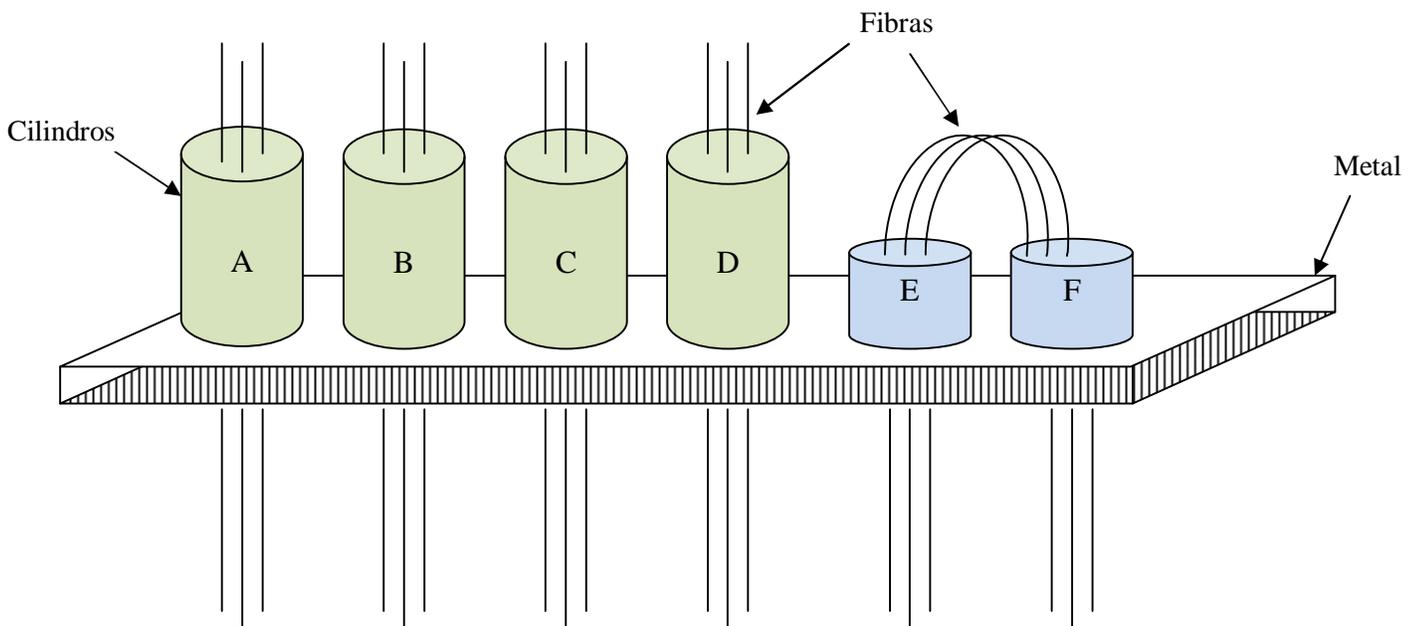


Figura 3.19 Esquema para la elaboración de cilindros

Implementación del experimento

3.2.2 Diseño de hormigón para la fabricación de las muestras

Diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar las cantidades relativas de materiales que hay que emplear en la mezcla para obtener un concreto adecuado para un uso determinado.

En este trabajo de tesis se utilizó el método de tanteo empírico el cual está respaldado por principios y consideraciones técnicas. El método consiste en un control de la relación agua-cemento y tomando en cuenta los factores como el cemento, graduación y propiedades del agregado, etc.

Se realizó el diseño de mezcla de acuerdo a la siguiente tabla en donde utilizamos los valores para una tamaño de grava de $\frac{3}{4}$ " con una $f'_c=160 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 3.6 Tamaño máximo de grava

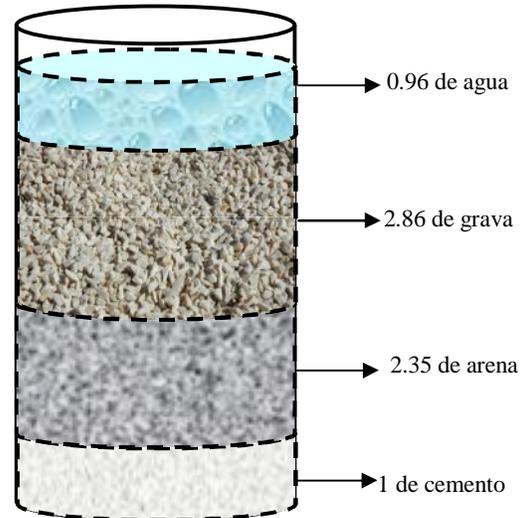
f'_c	a/c	$\frac{3}{4}$ "				1.1/2 "				3 "				
		Cem	ar	gr	ag	Cem	ar	gr	ag	Cem	ar	gr	ag	
160	0.62	rel	1	2.35	2.86	.96	1	2.10	2.33	.96	1	1.98	1.32	.96
		vol	325	.503	.606	210	314	.435	.690	200	284	.371	.247	182
			Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg
210	0.56	rel	1	2.07	2.50	.85	1	1.86	2.94	.85	1	1.75	1.16	.85
		vol	363	.497	.600	200	351	.431	.681	196	318	.368	.244	178
			Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg
280	0.46	rel	1	1.86	2.21	.70	1	1.55	2.62	.70	1	1.57	1.04	.70
		vol	409	.502	.596	190	395	.430	.683	182	354	.366	.555	164
			Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg

Implementación del experimento

Como se observa en la tabla 3.6 los valores relativos en volumen para una fuerza de compresión de $f'_c=160 \text{ kg/cm}^2$ son:

Tabla 3.7 Valores relativos de los agregados

Cantidad Relativa	Material
1	cemento
2.35	arena
2.86	grava caliza $\frac{3}{4}$
0.96	agua



Se utilizó un bote mediano como referencia y se procedió a fabricar la mezcla. En éstas muestras se prepararon los cilindros de PVC untando aceite en su interior y haciéndoles una abertura transversal con el fin de resbalar los moldes de concreto solidificados una vez que han terminado por el proceso de curado.



Figura 3.20 Moldes y tapas de PVC

Implementación del experimento

Se construyeron 4 cilindros, tres de ellos se les introdujeron fibras en un arreglo simétrico y el otro quedó libre de fibras. La figura 3.21 muestra los cilindros después de 30 días.

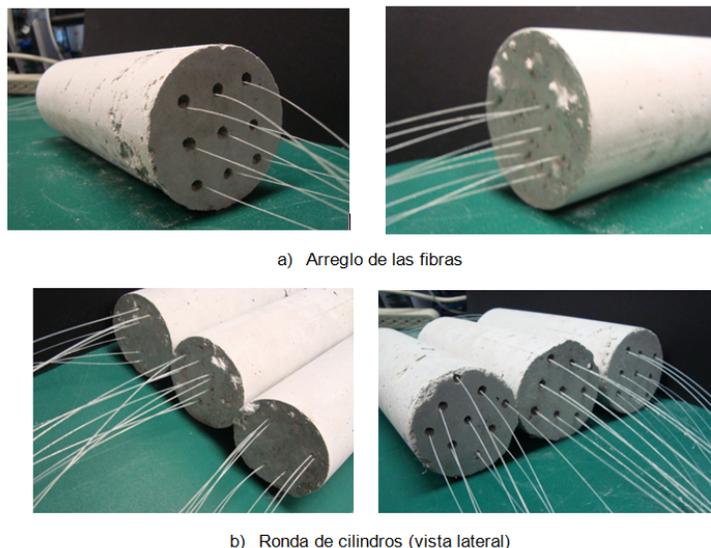


Figura 3.21 Arreglos de fibras en cilindros de concreto

3.2.3 Consideraciones para la implementación de un sistema de monitoreo de la integridad de las estructuras de concreto

Para tener un mejor acoplamiento entre las fibras ópticas con el laser, fue necesario preparar las fibras utilizando una lija que removiera alguna rugosidad o defecto en los extremos de la fibra. Por medio del microscopio se observó que la superficie de los extremos donde se realizó el corte estuviera plana y sin deformaciones mayores.

Para lograr que el diodo laser iluminara la totalidad de fibras al mismo tiempo, fue necesario colocar un par de lentes de superficie cilíndrica que permitieran que el haz se refractara a lo largo del arreglo de fibras, con estos lentes se pudo mejorar la técnica de monitoreo y abarcar un máximo de fibras colocadas en un arreglo vertical.

Implementación del experimento

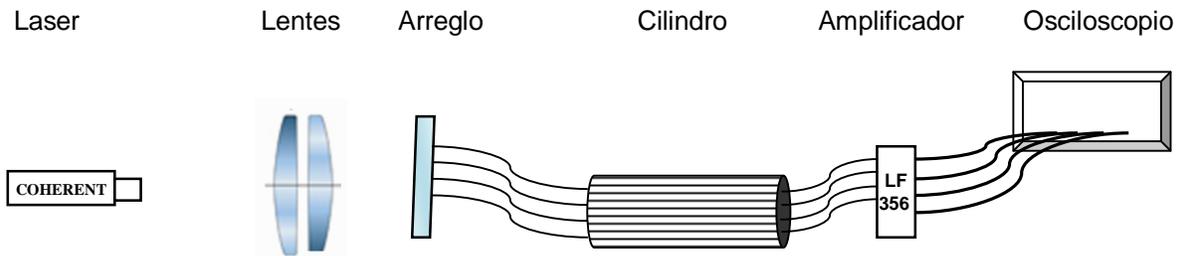


Figura 3.22 Diagrama

3.2.4 Acoplamiento óptico de los elementos del sistema de medición

Acoplamiento Emisor- Fibra

La eficiencia del acoplamiento entre un emisor y una fibra depende, simultáneamente, de los parámetros del emisor (superficie, perfil del índice) de las características de la fibra (diámetro del núcleo, perfil del índice, apertura numérica) y del medio que separa al emisor de la fibra (índice de refracción y distancia emisor fibra). Todos estos parámetros tienen influencia sobre la transferencia del flujo energético del emisor hacia la fibra. El acoplamiento debe tener por objetivo lograr que se inyecte el máximo flujo energético al núcleo de la fibra y que pueda propagarse.

La fuente luminosa tiene una cierta superficie emisora A_s . La mejor manera de inyectar el máximo de luz de la fuente a la fibra es aplicar directamente la superficie de la fibra a la superficie de la fuente suponiendo que el eje de la fibra es colineal al eje de la fuente. Sin embargo, es necesario que la superficie emisora A_s sea menor o igual a la superficie del núcleo de la fibra $A_f = \pi a^2$, donde a es el radio del núcleo de la fibra. En caso contrario ($A_f < A_s$), se inyecta una parte del flujo energético en la cubierta o al exterior de la fibra por lo que se pierde dicho flujo (Figura 3.23).

Implementación del experimento

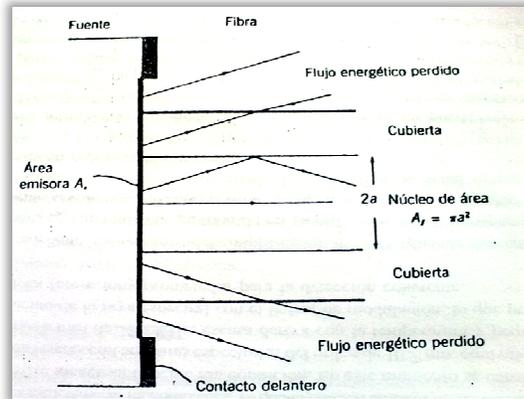


Figura 3.23 Acoplamiento entre una fuente emisora y una fibra óptica

Las pérdidas que resultan de tener una superficie A_s más grande que la superficie del núcleo A_f pueden calcularse de la siguiente manera [7]:

$$D_a = 10 \lg \frac{A_f}{A_s} \quad \text{Para} \quad A_s > A_f \quad (3.12)$$

En la figura 3.24 se observa el acoplamiento del laser con las fibras ópticas, los lentes de superficie cilíndricos sirven para esparcir el haz y poder iluminar una mayor cantidad de fibras. Como se observa, parte de la radiación del laser se pierde entre los espacios de las fibras, sin embargo con ésta técnica se aprovecha de mejor manera la potencia óptica del laser ya que se distribuye de manera imparcial en el arreglo.

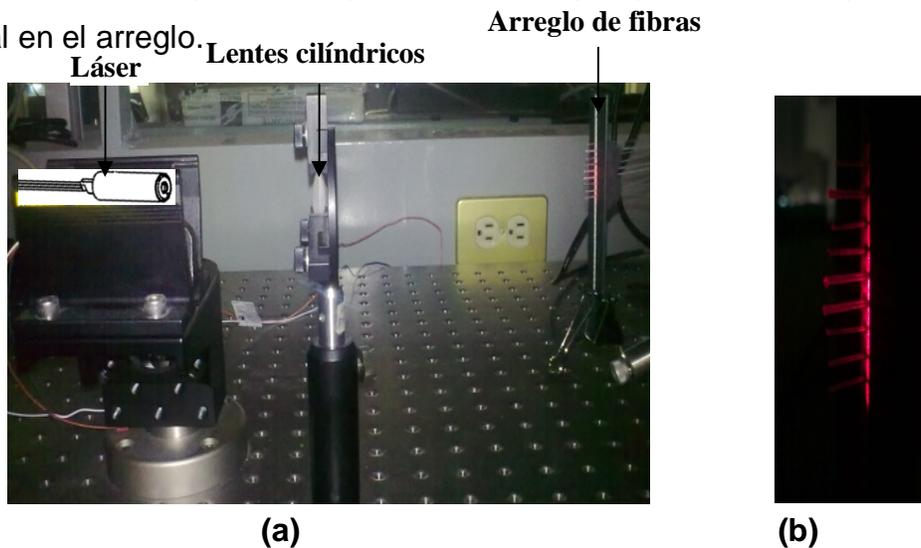


Figura 3.24 a) Acoplamiento del laser con arreglo de fibras b) Iluminación de las fibras

Acoplamiento fibra - detector

La luz que llega al final de la fibra se dirige hacia el detector en el cual se absorbe y se transforma en señal eléctrica. El acoplamiento fibra-detector tiene como objetivo lograr que toda la luz que sale de la fibra entre al detector.

Al extremo de la fibra, la luz sale y sigue un cono parecido al cono de admisión. Si el área del núcleo de la fibra es A_f , el punto luminoso a una distancia d de la fibra tiene un área A superior a A_f . El propio detector tiene una cierta área A_D . Si A es superior a A_D , no toda la luz incide sobre el detector y hay pérdidas.

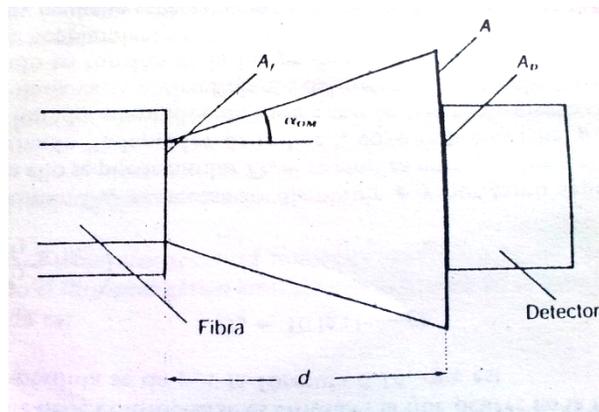


Figura 3.25 Acoplamiento entre una fibra y un detector separados por una distancia d .

El área A es igual a:

$$A = \pi(d \tan \alpha_{OM} \div a)^2 \quad (3.13)$$

a = radio del núcleo de la fibra;

$\text{sen } \alpha_{OM} = A.N.$, la apertura numérica.

Pueden presentarse dos casos:

1) Caso en que $d = 0$

La fibra está en contacto directo con el detector. Si $A_f < A_D$, no hay ninguna pérdida de superficie. Si $A_f > A_D$ hay una pérdida igual a:

Implementación del experimento

$$D_s = 10 \lg \frac{A_D}{A_f} \quad (3.14)$$

2) Caso en que $d \neq 0$

El detector está alejado de la fibra. Si la superficie A del punto luminoso a la distancia d es inferior a A_D , no hay ninguna pérdida de superficie. Si $A > A_D$ hay una pérdida igual a:

$$D_s = 10 \lg \frac{A_D}{A} \quad (3.15)$$

Para el acoplamiento fibra detector se utilizó un trozo de madera el cual, de un extremo se perforó parcialmente con el fin de ajustar el fotodiodo a la madera y, por el otro, se perforó completamente para poder introducir la fibra. El trozo de madera funciona como una protección a la luz ambiental y así evita que se genere una corriente de ruido que pueda alterar la señal recibida, figura 3.26.

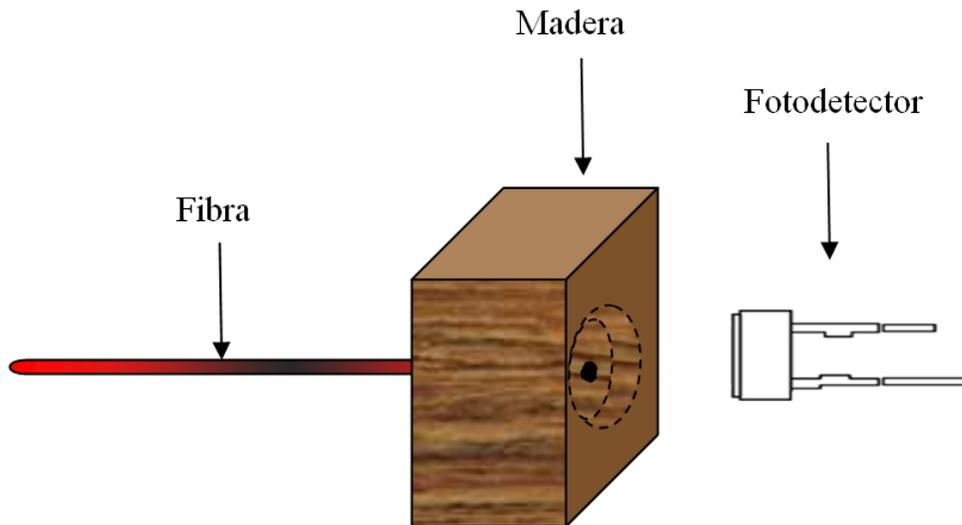


Figura 3.26 Acoplamiento Fibra detector

3.3 Prueba de compresión de las muestras

Este método de prueba pretende determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concretos elaborados con moldes específicos en el laboratorio.

La fuerza de compresión del concreto es la forma más común de medición usada por los ingenieros en el diseño de edificios y otras estructuras. La fuerza de compresión es medida por el fallo del espécimen de concreto en una maquina de prueba de compresión.

3.3.1 Metodología de la prueba

El método de prueba consiste en aplicar una carga de compresión axial a cilindros moldeados, a una tasa predeterminada, hasta que la falla ocurre. La fuerza a la compresión o strain de la muestra es calculada al dividir la carga máxima lograda durante la prueba entre el área calculada del espécimen, es reportada en unidades de kgf por centímetro cuadrado o en Megapascales (MP) para Sistema internacional.

Se debe colocar el espécimen en la placa inferior, procediendo a colocar la placa rectangular y centrar ambos de acuerdo a la placa esférica, esto es, centrada con la carga.

Es importante verificar que el dispositivo se encuentre en cero antes de comenzar la prueba. Inmediatamente después de esto se debe aplicar la carga continuamente sin golpes de choque.

La carga debe ser aplicada hasta que el espécimen falle y se debe registrar el valor máximo de la carga soportada por el espécimen.

Implementación del experimento

La máquina de compresión utilizada fue de la marca Alfeed J. Amsler y Cia Schafhausen, Suiza. Para las pruebas la maquina debe estar bien calibrada y debe ser capaz de proveer las tazas de carga esperadas. Se aplicó la carga a una velocidad continua de 50 kg. Los resultados son mostrados en el capítulo IV.

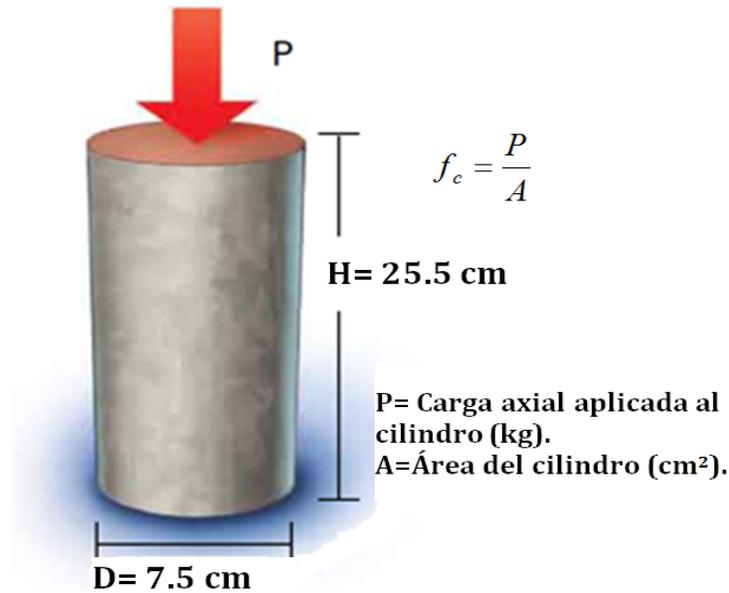


Figura 3.27. Características del cilindro

3.3.2 Preparación y acondicionamiento de las muestras.

Las muestras deben de permanecer un periodo de 28 días en cuarto de curado y después someter a la prueba. El ensaye a la compresión de los especímenes debe efectuarse tan pronto como sea posible después de retirarlos del cuarto y una vez que el material de cabeceo haya adquirido la resistencia requerida. Durante el tiempo transcurrido entre el almacenamiento húmedo y el ensaye, se debe prevenir la perdida excesiva de humedad en los especímenes.

Conclusiones

La instalación experimental presentada ofrece diversas ventajas al tratarse de un modelo de mediana escala. Las dimensiones de los cilindros permiten estudiar detalladamente el desempeño de las fibras en ambientes adversos, además de cumplir con la norma mexicana C-083 para pruebas de compresión.

En cuanto al subsistema óptico diseñado, los lentes de superficie cilíndrica constituyen una parte fundamental de la instalación ya que refracta el haz de acuerdo al número de fibras necesarias. La implementación del experimento es relativamente fácil y no necesita de aparatos sofisticados y difíciles de operar

El diseño del fotorreceptor se hizo en base a un circuito integrado de alta ganancia y bajo ruido. La configuración del fotorreceptor permite la conversión de fotocorriente a voltaje proporcionando una ganancia de hasta diez veces.

Las fibras con mayor resistencia son las de diámetros mayores y apertura numérica alta, demostrando que las fibras pueden ser utilizadas como sensores embebidos. La técnica de protección resultó efectiva, siempre mantuvo a las fibras en buenas condiciones durante el vertido y ante los agregados. La abertura transversal de los moldes fue otra técnica satisfactoria para el reúso de materiales.

La elaboración de cilindros con arreglos de fibras en su interior demuestra el perfeccionamiento de la técnica y limitan la cantidad de fibras que pueden ser introducidas.

Las características del diodo laser y el fotodiodo son apropiadas y cubren con las necesidades de los experimentos. La responsividad y eficiencia cuántica son los parámetros más importantes del fotodiodo y por lo tanto deben ser precisos para cada longitud de onda en que se trabaje.

Bibliografía

[1] J. Graeme, “Photodiode Amplifiers: Op Am Solutions”. Mc Graw-Hill, 1996

[2] Features photodiodes on silicon-base ФД-63, Agosto 2010 [Online]. Disponible. <http://www.quartz.cv.ua/products/product3.html>

[3] RHYTHM Optoelectronics Inc., Agosto 2010 [Online] Disponible. <http://www.khalus.com.ua/data/chips/opto/rhythm-rus.pdf> 2002.

[4] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, “Fundamentals of Photonics”, Wiley Series in Pure and Applied optics. De. J.W. Goodman. Wiley Interscience. New York, 1991.

[5] John M. Senior, “Optical Fiber Communications: Principles and Practice”, Prentice Hall, 2a edición, 1992, Great Britain.

[6] Nérou, Jean Pierre, “Introducción a las telecomunicaciones ópticas”, México.

[7] Jeff Hecht, “Understanding Fiber Optics”, Segunda edición, SAMS Publising, USA 1993.