



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**MONITORIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE
CONCRETO POR FIBRAS ÓPTICAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:

JUAN URIEL ESPARZA VILLA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SERGEI KHOTIAINTSEV

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D. F., 2010





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

- A mis padres que siempre me apoyaron en el transcurso de mis estudios profesionales.
- A mis amigos y compañeros de la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones.
- A mi tuto el Dr. Serguei K. por brindarme su apoyo en la última etapa de mis estudios profesionales.
- A todos los profesores del DIT por todos los conocimientos brindados a lo largo de la carrera.
- Al Ing. Héctor Olgún por su apoyo para las pruebas realizadas en el laboratorio de materiales.
- A la Universidad Nacional Autónoma de México por formarme como profesionista y brindarme un desarrollo integral a lo largo de estos años.

Por siempre gracias....

Esta tesis se realizó con el apoyo de una beca del proyecto PAPIIT IN114109-3 de la DGAPA-UNAM.

Juan Uriel Esparza Villa

Índice

	Página
Introducción	6
Objetivos	7
Metas	7
CAPITULO 1 ANTECEDENTES	8
1.1 Fibras ópticas aplicadas a estructuras de concreto: Estado del Arte.....	8
1.1.1 Sistemas de Protección.....	10
1.2 Sensores de Rejillas de Bragg.....	11
1.3 Técnicas de Evaluación no destructivas (END)	13
1.3.1 Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos.....	13
1.3.2 Métodos de ensayos no destructivos en estructuras de concreto.....	15
1.3.2.1 Técnicas basadas en la propagación de ondas.....	16
1.3.2.2 Emisión Acústica.....	18
1.3.2.3 Termografía por infrarrojos.....	19
1.4 Cuadro Resumen sobre END utilizados en hormigón	20
Conclusiones.....	21
Bibliografía	
CAPITULO 2 ESTRUCTURAS DE CONCRETO	23
2.1 Introducción a Estructuras de concreto.....	23
2.1.1 Propiedades del hormigón.....	23
2.1.2 Características mecánicas del hormigón.....	23
2.2 Vida útil de las estructuras	26
2.2.1 Durabilidad y resistencia del hormigón.....	26
2.2.2 Granulometría.....	27
2.3 Técnicas existentes de monitoreo de la integridad y condiciones físicas de estructuras de concreto.....	28
2.3.1 Técnica basadas en fibras ópticas.....	28
2.4 Agrietamiento.....	33
Conclusiones.....	35
Bibliografía	

CAPITULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE UN EXPERIMENTO PARA EL MONITOREO DE ELEMENTOS DE CONCRETO CON FIBRAS ÓPTICAS.....	37
3.1 Instrumentación del experimento.....	37
3.1.1 Tipos de fibras ópticas.....	37
3.1.1.1 Características de las fibras ópticas.....	39
3.1.2 Descripción de la fuente de luz.....	40
3.1.3 Descripción del Fotodiodo.....	41
3.1.3.1 Características del fotodiodo.....	43
3.1.4 Coeficiente de absorción α	44
3.1.5 Eficiencia cuántica η	47
3.1.6 Responsividad, \mathfrak{R} (A/W).....	50
3.2 Descripción de los Experimentos.....	53
3.2.1 Formación del hormigón y fabricación de las muestras experimentales.....	55
3.2.2 Diseño de hormigón para la fabricación de las muestras.....	57
3.2.3 Consideraciones para la implementación de un sistema de monitoreo de estructuras de concreto.....	59
3.2.4 Acoplamiento óptico de los elementos del sistema de medición.....	62
3.3 Prueba de compresión de las muestras.....	64
3.3.1 Metodología de la prueba.....	64
3.3.2 Preparación y acondicionamiento de las muestras.....	65
Conclusiones.....	66
Bibliografía	
CAPITULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	68
4.1 Resultados de las pruebas.....	68
4.1.1 Continuidad en las fibras.....	68
4.1.2 Compresión de las muestras.....	69
4.1.3 Respuesta en frecuencia del fotorreceptor	72
4.2 Caracterización del fotodiodo de silicio ФД-263.....	75
4.2.1 Coeficiente de absorción α	75
4.2.2 Eficiencia cuántica η	77
4.2.3 Responsividad R	78
4.3 Análisis de los resultados.....	79

CAPITULO 5	CONCLUSIONES GENERALES.....	81
APÉNDICE A.	Corriente de ruido en el fotodiodo ФД-263.....	83
APÉNDICE B.	Especificaciones Amplificador Operacional LF356.....	87
APÉNDICE C.	Coefficiente de Absorción Vs Energía de Fotón y	
	Longitud de Onda para Ge, Si, GaAs, GaN	
	y otros semiconductores a T=300° K.....	88

Introducción

El envejecimiento de las estructuras de concreto y la consecuente aparición de fallas han enfatizado la importancia de emplear sistemas de monitoreo capaces de identificar problemas estructurales a una edad temprana. La reducción de costos por mantenimiento y el aumento de confiabilidad durante el tiempo en servicio de la estructura son algunas de las ventajas de estos sistemas.

El avance en los últimos años de fibras ópticas utilizadas como sensores ha permitido la expansión de nuevas alternativas en el monitoreo de estructuras. Si bien, en la actualidad se ha demostrado que los sensores ópticos convencionales como rejillas de Bragg (FBG) o interferómetros Fabry-Perot (FPI) son capaces de medir con muy buena precisión el esfuerzo o deformación en estructuras de concreto, la mayoría de ellos son aplicados de manera superficial, es decir, no son introducidos debido a su fragilidad y dificultad por enterrarlos.

El presente trabajo de tesis hace un estudio sobre el diseño e implementación de fibras ópticas enterradas en estructuras de concreto, aporta una técnica eficiente para la introducción de fibras en cilindros de concreto sin dañarlas. La metodología de la técnica y los sistemas de protección empleados son la base fundamental de éste trabajo. La instrumentación de fibras ópticas es otra aportación.

Para las construcciones de cilindros de concreto se siguen procedimientos estándares y se trabaja bajo condiciones de laboratorio. A lo largo de la construcción de las muestras cilíndricas la técnica de protección se perfecciona logrando proteger la totalidad de las fibras.

La cuantificación de pérdidas de resistencia en los cilindros se lleva a cabo sometiendo a compresión un par de ellos y comparando los resultados de esfuerzo o strain. La escases de ensayos implica un baja precisión en los resultados, sin embargo la tendencia de los mismos indican que una parte de la resistencia y durabilidad de los cilindros se pierde debido a las fibras, fenómeno que tiende a incrementarse conforme aumenta el número de fibras.

Objetivos

- Estudiar la integridad de diferentes fibras ópticas al ser introducidas en cilindros de concreto.
- Desarrollar una técnica eficiente para la introducción de fibras ópticas en estructuras de concreto.
- Cuantificar las posibles fallas como fisuras ó grietas durante la elaboración y destrucción de los cilindros.

Metas

- Diseño e implementación de una instalación experimental para el monitoreo de estructuras de concreto.
- Establecimiento de una metodología para la fabricación de muestras cilíndricas de concreto.
- Obtención de los parámetros cuánticos del fotodiodo ФД-263 de acuerdo al intervalo de operación del dispositivo.

1. ANTECEDENTES

1.1 Fibras ópticas aplicadas a estructuras de concreto: Estado del Arte

En esta sección se tratará ampliamente las características físicas y funcionales que tienen los sensores de fibra óptica en comparación con sensores eléctricos convencionales. Se describirá el funcionamiento y desempeño de los sensores de rejillas de Bragg para el monitoreo de estructuras de concreto en base a diferentes artículos científicos. También se abordarán las técnicas de evaluación destructivas y no destructivas que son utilizadas comúnmente para la detección y cuantización de defectos internos y degradaciones. Se hará un especial énfasis en técnicas no destructivas aplicadas a estructuras de concreto.

Ventajas de los sensores de fibra óptica:

- 1) Son pequeños normalmente con un diámetro total de 125 [μm] o menor, resultando un sensor muy delgado que puede ser enterrado en diferentes compuestos sin cambiar sus propiedades mecánicas.
- 2) Los sensores de fibra óptica pueden ser elaborados para soportar condiciones de medio ambiente asociadas a temperatura y presión.
- 3) El vidrio de la fibra es un elemento dieléctrico pasivo, habilitándolos para usos en materiales de compuesto orgánico como epoxi carbón y termoplástico donde las descargas eléctricas son un peligro. Las propiedades pasivas naturales de estos sensores también les permiten ser enterrados en estructuras metálicas satisfactoriamente.
- 4) Muchos sensores de fibra óptica pueden ser elaborados con un alto grado de inmunidad a interferencia electromagnética eliminando costos y la necesidad de una voluminosa capa de protección.

Antecedentes

- 5) Los sensores de fibra óptica pueden ser multiplexados de tal forma que muchos sensores pueden ser tendidos en una sola línea de fibra óptica.
- 6) Hay un alto grado de sinergia entre los sensores de fibra óptica y las telecomunicaciones así como la industria optoelectrónica y los continuos beneficios en la mejora de los dispositivos y la reducción de los precios. [1]

En los últimos años una serie de técnicas no destructivas se han desarrollado y mejorado para el monitoreo de estructuras de concreto, algunas de ellas son: escaneo por ultrasonido, emisión acústica (AE), termografía infrarroja estimulada (SIT), pruebas de vibración, radar, conductividad, etc. Estas técnicas son ampliamente utilizadas y acondicionadas para diferentes aplicaciones sin embargo, no son las más apropiadas para el monitoreo de estructuras en servicio debido a la dificultad de implementación en el lugar [2].

El reto es desarrollar nuevas técnicas que puedan medir el estado de salud de las estructuras en servicio y además en tiempo real. Materiales y estructuras inteligentes dan esa posibilidad. En específico, los sensores de fibra óptica (FOS) son una tecnología facultada que permite a los ingenieros agregar un sistema nervioso central a sus diseños, detectando daños y monitoreos de estado.

La implementación de sensores de rejillas de Bragg (FBG) para pruebas no destructivas en estructuras de aluminio, estructuras de hormigón y para usos en materiales de compuesto orgánico como epoxi carbón y termoplástico han mostrado un buen desempeño y correlación de resultados con los sensores clásicos convencionales. [2]

1.1.1 Sistemas de Protección

Concepto de sistema de protección para sensores de fibra óptica

La vulnerabilidad de los sensores de fibra óptica hace difícil protegerlos de la masa de concreto en el proceso de vertido. Por lo tanto, los FOS pueden ser fácilmente dañados y corroídos en aplicaciones prácticas de largo tiempo. Por esta razón la implementación de sensores de fibra óptica en estructuras de concreto son muy limitadas.

El primer requerimiento es la protección de la fibra de sílice ante el ambiente alcalino y la protección del arreglo de sensores:

- a) Durante el proceso de vertido del concreto
- b) Contra daño mecánico o abrasivo causado por el agresivo ambiente químico.

El aspecto más importante del sistema de protección (SP) es la eficiencia asociada a la transferencia de tensión de la estructura a la región sensada.

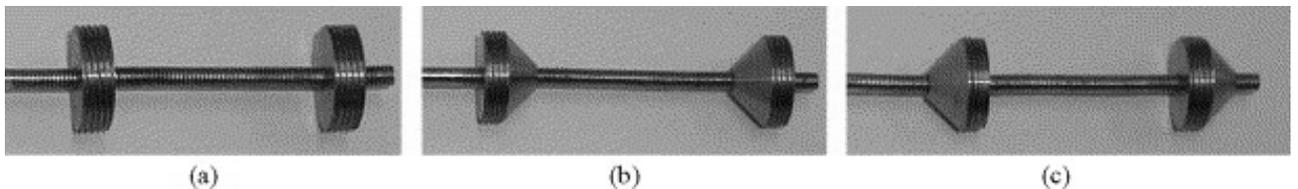


Figura 1.1 Tipos de Sistemas de protección

Normalmente, los FOS son cubiertos por capas de acero, tubo de acero y caucho de silicona.

La figura 1.1 muestra una serie de Sistemas de Protección de diferentes formas y tamaños de pestañas. La eficiencia de cada sistema en términos de la transferencia de tensión entre el sensor y el material de concreto es diferente. [3]

1.2 Sensores de Rejillas de Bragg

Usualmente las rejillas pueden ser fabricadas en fibras ópticas monomodo dopadas de germanio empleando una fuente láser ultravioleta de 240 – 280 [nm]. La tecnología de fabricación incluye el método interferométrico, método phase mask, método punto a punto, etc.

Las rejillas de Bragg pueden llegar a tener una longitud de 1 – 20 mm. Cuando una luz incidente ilumina las rejillas de Bragg, una porción de la luz incidente es reflejada y la demás es transmitida. Básicamente, el principio del sensor con rejillas de Bragg está basado en la medición de la variación de la longitud de onda de la señal reflejada, la cual es la longitud de onda central desde la rejilla de Bragg y depende del índice de refracción efectivo del núcleo y la periodicidad de la rejilla. De acuerdo con la condición de Bragg, la longitud de onda de Bragg puede ser expresada como:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

Donde λ_B es la longitud de onda de Bragg, Λ es el periodo de las rejillas, n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra. Así, la longitud de onda de Bragg puede cambiar al modificar cualquiera de los dos parámetros n_{eff} ó Λ .

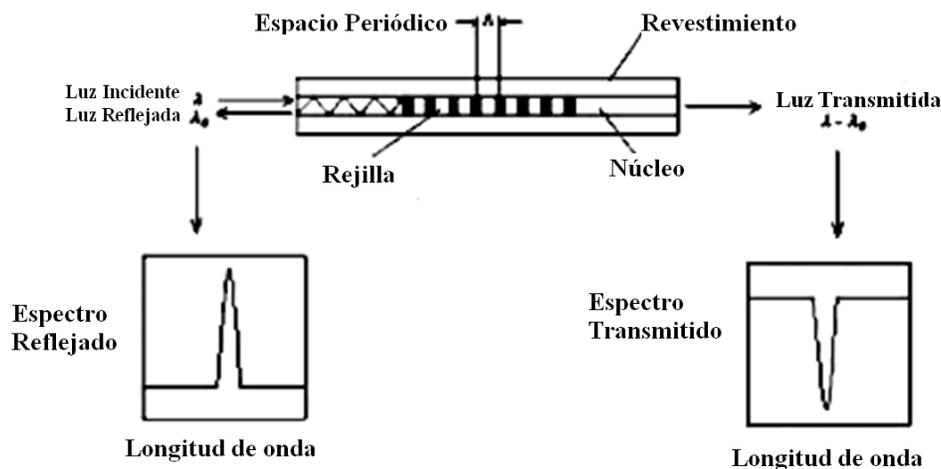


Figura 1.2 Rejilla de Bragg

Antecedentes

Cuando una deformación mecánica o térmica es aplicada a la región donde se encuentra la rejilla de Bragg, el índice de refracción efectivo así como la periodicidad de las perturbaciones cambian. La variación de la longitud de onda de Bragg en función del cambio de tensión axial ($\Delta\varepsilon$) y el cambio de temperatura (ΔT) puede ser expresada de la siguiente forma [2]:

$$\Delta\lambda_B = \alpha\Delta\varepsilon + \beta\Delta T$$

En donde:

α es una constante que indica la sensibilidad en deformación de la rejilla, se obtiene de forma experimental. Puede ser cuantificada de la siguiente forma:

$$\alpha = \lambda_B (1 - \rho_e); \quad \rho_e = \text{es una constante strain-óptica efectiva}$$

β es una constante relacionada con la sensibilidad de longitud de onda y temperatura:

$$\beta = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n); \quad \alpha_\Lambda = \text{es el coeficiente de expansión térmico de la fibra}$$

$\alpha_n = \text{es el coeficiente termo-óptico.}$

Normalmente las variaciones de temperatura (ΔT) durante las pruebas y ensayos no son significativas, debido tanto a las condiciones del lugar como a los tiempos de medida, por lo que el factor puede ser despreciado. Así, al enterrar sensores Bragg dentro de estructuras de concreto es posible cuantificar la deformación o strain ocasionada por los ensayos no destructivos. [2]

1.3 Técnicas de evaluación no destructivas (END)

También conocidos como evaluación o examen no destructivo, los ensayos no destructivos incluyen varios métodos para examinar materiales, componentes y conexiones destinadas a identificar y cuantificar defectos internos y degradaciones. Técnicas comunes empleadas incluyen radiografía, ultrasonidos, tintes penetrantes y partículas magnéticas.

Son técnicas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de las posibles discontinuidades que puedan existir tanto en la superficie como en el interior de los materiales metálicos (placa rolada, material forjado, piezas de fundición, soldadura, etc.) que se emplean para la fabricación de recipientes sujetos a presión, tanques atmosféricos, válvulas, árboles, cabezales, tubería, etc.; a estas técnicas se les llama pruebas no destructivas porque al aplicarlas, los materiales no se destruyen ni se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y/o características dimensionales [5].

1.3.1 Aplicación de los métodos de ensayos no destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos permiten obtener información de piezas o partes de una estructura metálica o no metálica, sin alterar sus condiciones de utilización o aptitud de servicio; es decir no provocan daños en el material, ni perjudican o interfieren con el uso futuro de las piezas o partes inspeccionadas.

A partir de esta definición se puede observar que ensayos aplicados sobre determinadas piezas se consideran destructivos, ya que alteran sus condiciones, pero aplicados sobre otras piezas, se consideran no destructivos.

Un ejemplo es la determinación de dureza. Si lo hacemos sobre una superficie que requiere una terminación muy buena, la marca será inaceptable, en cambio si lo hacemos sobre el domo de una caldera, la marca no tendrá influencia alguna en el uso futuro de la caldera.

Antecedentes

Ahora bien, si realizamos una medición de dureza mediante un método no destructivo, no alterará las condiciones en ambos casos.

De igual manera se puede decir, que si se aplica un método de END empleando un procedimiento inapropiado, puede generar condiciones que provoque daños en las piezas inspeccionadas, un ejemplo de ello es aplicar líquidos penetrantes inapropiados en el control de piezas de acero inoxidable austenítico.

Los métodos de END se aplican en diferentes etapas del proceso productivo, pudiendo ser estas, el control de materia prima, durante el proceso de fabricación, así como en el ensayo final del producto y control en servicio.

Si hacemos una comparación con los métodos de ensayos destructivos, se puede decir que éstos, aplicados a un control de calidad estadístico, permiten comprobar con un cierto grado de seguridad, el nivel de calidad de una producción.

Sin embargo requieren la inutilización de un determinado número de muestras, obtienen datos de una zona de la pieza y no pueden asegurar la calidad de todos los elementos de un lote.

En cambio, los métodos de END, permiten el control del 100 % de una producción y pueden obtener información de todo el volumen de una pieza, con lo que contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme, con la consiguiente conservación y aseguramiento de la calidad funcional de los sistemas y elementos.

Además colaboran en prevenir accidentes, ya que se aplican en mantenimiento y en vigilancia de los sistemas a lo largo del servicio.

1.3.2 Métodos de ensayos no destructivos en estructuras de concreto

En las siguientes secciones se describen algunas de las técnicas de ensayo no destructivo para determinar el estado de los materiales de construcción y la integridad de las estructuras de las que forman parte.

La búsqueda de métodos de ensayo no destructivo para analizar el estado de las estructuras de hormigón se remonta a tiempos muy lejanos en la historia (sencillas técnicas de inspección visual o acústica han sido utilizadas durante siglos).

Sin embargo, las técnicas con mayor potencial de uso en la actualidad, fueron introducidas hacia 1950, cuando el estudio de los fenómenos relacionados con la propagación de ondas en sólidos despejó horizontes para el avance de estos métodos.

En los últimos años, la aplicación práctica de los END se ve favorecida por los siguientes factores:

- Desarrollo de nuevos programas informáticos de cálculo (simulación por elementos finitos) y tratamiento de imágenes.
- Aparición de tarjetas de memoria de pequeño tamaño.
- Desarrollo de Internet como herramienta para la difusión de los conocimientos científicos y de los resultados de investigaciones.
- Miniaturización de los equipos de medida.

Algunos campos de trabajo abiertos son:

- Posibilidades de aplicación combinada de varias técnicas.
- Interpretación de los resultados de los ensayos, aun por operarios no expertos.
- Concretar la influencia de distintas variables sobre el desarrollo de los ensayos.
- Verificación de técnicas en estructuras reales.
- Normalización de ensayos.

Ensayos no destructivos en hormigón

Los métodos de END presentan gran interés para la industria de la construcción de cara a la realización de estudios rápidos y baratos sobre la durabilidad y calidad del hormigón en una estructura.

En la actualidad, el control de calidad de las estructuras de hormigón se realiza habitualmente mediante ensayos destructivos, pero la extracción de probetas en determinados edificios no siempre es posible o práctica.

A los problemas genéricos de aplicación derivados de la difícil interpretación de resultados, la falta de una normativa, la desconexión entre investigación y aplicación comercial y la competencia entre los distintos métodos por un uso exclusivo, hay que añadir otros derivados de la variada composición o porosidad de los hormigones, el cambio de sus propiedades con el tiempo y la influencia de factores exógenos que dificulta la obtención de ecuaciones de correlación y en definitiva la interpretación de resultados.

1.3.2.1 Técnicas basadas en la propagación de ondas

Descripción y fundamento del método:

Se basan en la propagación a través del hormigón de ondas ultrasónicas longitudinales no perceptibles por el oído humano (20 [Hz]-20 [kHz]), procedentes de un emisor o generador de impulsos (palpador electroacústico). El pulso es captado por un receptor que lo transforma en un impulso eléctrico. Un circuito tiempo permite determinar la velocidad de propagación de la onda [6].

Aplicaciones:

- Medida de uniformidad del material en una estructura.
- Medida del grosor de una capa de hormigón (suelo, forjado, etc.).
- Monitorización en el tiempo de cambios en las propiedades del hormigón.
- Evaluación de sistemas estructurales / Detección de defectos.

Antecedentes

- Medida de la resistencia o del módulo de deformación del hormigón.
- Estudio del proceso de fraguado del hormigón.

Investigaciones recientes:

- Modelos de simulación por elementos finitos.
- Búsqueda de fuentes de ondas moduladas por excitación piezoeléctrica.
- Métodos basados en la reflexión del sonido (Eco-impacto y Eco-pulso):

Esta técnica fue desarrollada en el U.S.National Bureau of Standards en los años 80.

Un pulso de ondas acústicas generadas por un transmisor (Eco-pulso) o un golpe mecánico (Eco-impacto) se propaga a través del hormigón experimentando reflexiones ante los cambios en densidad o módulo elástico. Las ondas reflejadas o "ecos" se convierten en señales eléctricas para ser analizadas mediante un osciloscopio.

Aplicaciones de los métodos basados en la reflexión de ondas acústicas:

- Identificación y cuantificación de grietas u oquedades que se sospechan en una estructura de hormigón (control de calidad de la edificación).
- Medidas del espesor de elementos de hormigón (pavimentos, solados, paredes, forjados, etc.) con errores inferiores al 3%.
- Localización de armaduras, tuberías o conductos en elementos de hormigón.

Investigaciones llevadas a cabo en los últimos años

- Desarrollo de software para la monitorización de resultados (localización de defectos) mediante imágenes on-line.
- Aplicaciones comerciales automatizadas (movimiento mecanizado de transductores, control de presión, interpretación de resultados).
- Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas (RADAR):

Técnica basada en la propagación y reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (300 MHz – 2.5 GHz).

Aplicaciones

- Localización de grandes oquedades.
- Determinación de humedades en edificios.
- Detección de armaduras.
- Determinación del contenido de agua en el hormigón fresco.
- Estudio de pavimentos.

1.3.2.2 Emisión acústica

Fundamento

Consiste en detectar la energía liberada en forma de ondas elásticas durante los procesos de agrietamiento de un material.

Las señales recibidas, se analizan por métodos analógicos o digitales.

Aplicaciones

- Detección de fisuras producidas a causa de fenómenos térmicos durante el fraguado del hormigón, para poder tratarlas de una forma inmediata.
- Estudio y desarrollo de nuevos materiales cementantes.
- Estudio de la fisuración producida en el hormigón por los ciclos de hielo/deshielo.
- Estudio y monitorización de grietas activas.
- Localización preventiva de puntos de fractura.

1.3.2.3 Termografía por infrarrojos

Se trata de un método térmico, basado en el principio de la conductividad térmica o capacidad para transmitir calor de los materiales. Se utiliza una cámara sensible a la radiación infrarroja que permite captar el flujo de energía emitido por una superficie y transformarlo inicialmente en una señal eléctrica y posteriormente en imágenes.

Aplicaciones

- Diagnóstico de paredes ocultas bajo frescos o pinturas.
- Detección de elementos ocultos (conducciones, armaduras etc.)
- Detección de humedades.
- Detección de defectos de un determinado tamaño en estructuras de hormigón, basándose en el diferente comportamiento térmico del aire y el hormigón.

Antecedentes

1.4 Cuadro Resumen sobre END utilizados en hormigón

En la siguiente tabla se realiza una compilación sobre las principales técnicas utilizadas para el ensayo no destructivo de estructuras de hormigón:

Tabla 1.1 Resumen de END

Método	Aplicaciones	Fiabilidad	Portabilidad equipos	Destreza operario	Dificultad interpretación datos
Velocidad ultrasonidos	1,3,4,5	MEDIA	SÍ	MEDIO	MEDIO
Pulso – Eco	1	M / ALTA	SÍ	ALTO	ALTO
	4	ALTA			
	6	ALTA			
	7	MEDIA			
Radar	1	DUDOSA	SÍ	ALTO	ALTO
	4	MEDIA			
	6	ALTA			
	7	M / ALTA			
Termografía de Infrarrojos	7	MEDIA	SÍ	MEDIO	MEDIO
	8	ALTA			
Emisión acústica	2	¿?	SÍ	ALTO	ALTO
Aplicaciones:					
1. Detección de grietas 2. Evolución de grietas en el tiempo 3. Detección de capas de hormigón dañadas		4 Presencia de oquedades 5 Propiedades elásticas del hormigón		6 Medida de grosores 7 Localización de armaduras y/o conducciones 8 Detección de humedades	

Conclusiones

Son muchas las ventajas que presentan los sensores basados en fibras ópticas en comparación con los utilizados tradicionalmente, principalmente por su tamaño e inmunidad provocado por interferencia electromagnética.

Los sensores de fibras ópticas pueden ser protegidos durante el vertido y ante los agregados del concreto utilizando sistemas de protección. El aspecto más importante de un sistema de protección es la eficiencia asociada a la transferencia de tensión entre la estructura y la región sensada.

Las técnicas no destructivas tienen como finalidad evaluar propiedades materiales antes de que resulten fallidas, asegurando el nivel de calidad y el funcionamiento del producto durante su producción o servicio. También son usadas extensivamente para determinar el estado de salud de las estructuras ingenieriles como puentes, presas, rascacielos etc.

Gracias a éste análisis la técnica más conveniente para los experimentos con las muestras de hormigón es la técnica destructiva, en específico, para éste trabajo de tesis se lleva a cabo el ensayo de compresión, el cual estudia el comportamiento de un material sometido a una fuerza de compresión progresivamente creciente hasta conseguir la rotura o aplastamiento.

Si bien, las técnicas destructivas se distinguen por un muestreo y sacrificio del producto para valorar el nivel de calidad, se infiere que si los resultados son exitosos o, en su defecto, erróneos, el resto de la producción está igual de bien o mal. La variabilidad del proceso en estas condiciones se considera muy baja.

Bibliografía

[1] Eric Udd, "Fiber Optic Smart Structures", Proc. IEEE, vol. 84, p. 60, 1996.

[2] J.S. Leng, A. Asundi. "Non-Destructive evaluation of smart materials by using extrinsic Fabry-Perot interferometric and fiber Bragg grating sensors", NDT&E Int 2002; 35: p. 273-276.

[3] J.S. Leng, R. A. Barnes, A. Hameed, D. Winter, J. Tetlow, G.C. Mays, G. F. Fernando, "Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors", sensors and actuators 2006; 126: p. 340-347.

[4] Henry Zanger, Cynthia Zanger, "Fiber Optics Communication and others applications", Macmillan publishing Company, USA, 1991.

[5] Surendra P. Shah, Kolluru V. Subramaniam & John S. Popovics, "Use of Nondestructive Ultrasonic Techniques for Material Assessment and in-Service Monitoring of Concrete Structures", NDT.net, Vol. 5, No. 02, 2000.

[6] Álvarez M.; González T., "Estudio del método de la medida de la velocidad de propagación del sonido y su aplicación a edificios históricos" – Ingeniería Civil/94, 1994.

2. ESTRUCTURAS DE CONCRETO

2.1 Introducción a Estructuras de concreto

2.1.1 Propiedades del hormigón

Para el diseño de estructuras de hormigón simple, de hormigón armado, de hormigón preesforzado, de hormigón con perfiles laminados en caliente de acero, etc. se utilizan las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. Entre las más importantes se tienen:

- Resistencia a la compresión
- Modulo de elasticidad
- Ductibilidad
- Resistencia a la tracción
- Resistencia al corte

2.1.2 Características mecánicas del hormigón.

Manejabilidad

Un hormigón fresco se considera manejable cuando puede adaptarse fácilmente a cualquier forma de encofrado, con un mínimo de trabajo mecánico (vibración) aplicado. Cuantitativamente la manejabilidad se mide mediante el asentamiento del Cono de Abrams o el diámetro de dispersión de la mesa de Flujo; mientras mayor es el asentamiento o mayor es el diámetro de dispersión, el hormigón es más manejable.

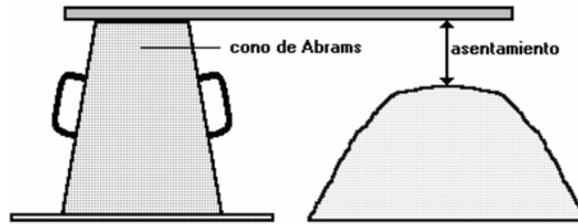


Figura 2.1 Medición de la manejabilidad

Asentamientos menores a 2" (5 cm) corresponden a hormigones poco manejables; asentamientos entre 3" (7.5 cm) y 5" (12.5 cm) corresponden a hormigones medianamente manejables; asentamientos superiores a 6" (15 cm) son característicos de hormigones muy manejables.

Modulo de elasticidad

Cuando se dibujan las curvas Esfuerzo-Deformación ($\epsilon - \sigma$) de las muestras cilíndricas de hormigón, sometidas a compresión bajo el estándar ASTM (American Standard Test Method), se obtienen diferentes tipos de gráficos que dependen fundamentalmente de la resistencia de la rotura del material, como se muestra en la siguiente figura.

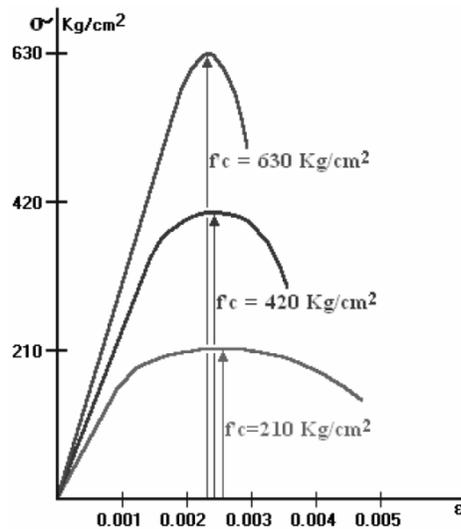


Figura 2.2 Modulo de elasticidad

Estructuras de concreto

Los hormigones de menor resistencia suelen mostrar una mayor capacidad de deformación que los hormigones más resistentes.

Todos los hormigones presentan un primer rango de comportamiento relativamente lineal (similar a una línea recta en la curva esfuerzo – deformación) y elástico (en la descarga recupera la geometría previa a la carga) ante la presencia incremental de sollicitaciones de compresión, cuando las cargas son comparativamente bajas (menores del 70 % de la carga de rotura), y un segundo rango de comportamiento no lineal e inelástico (con una geometría curva en la curva esfuerzo – deformación) cuando las cargas son altas.

La pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la denominación de Módulo de elasticidad del material o Módulo de Young, que se simboliza “ E_c ”.

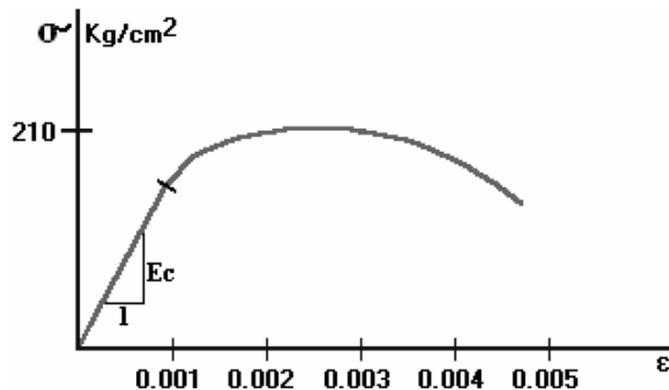


Figura 2.3 Curva esfuerzo-deformación

El modulo de elasticidad puede calcularse mediante la siguiente expresión

$$E_c = \frac{\sigma_{c,1}}{\varepsilon_{c,1}}$$

El modulo de elasticidad es diferente para distintas resistencias a la compresión de los hormigones, e incremente un valor cuando la resistencia del concreto es mayor. El ACI (American Concrete Institute) propone la siguiente expresión

obtenida experimentalmente, como forma aproximada de calcular el modulo de elasticidad del hormigón, en función de la resistencia a la compresión del mismo

$$E_c = 15000 \sqrt{f'_c}$$

Donde

E_c = Módulo de elasticidad del hormigón medido en Kg/cm²

f'_c = Resistencia a la compresión del hormigón medida en Kg/cm²

2.2 Vida útil de las estructuras

2.2.1 Durabilidad y resistencia del hormigón

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del hormigón se determina en muestras cilíndricas estandarizadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, llevadas hasta la rotura mediante cargas incrementales relativamente rápidas, que duran unos pocos minutos. Esta resistencia se mide después de 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad [1]

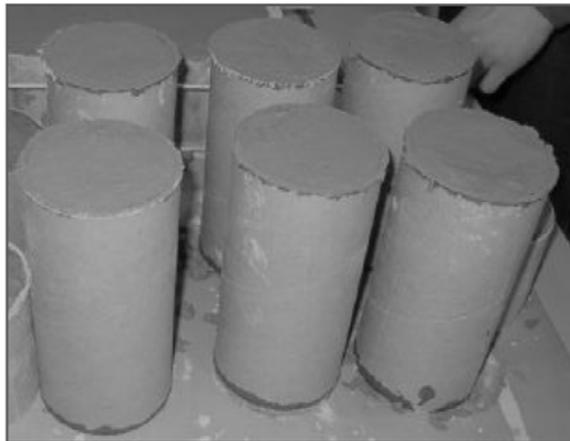


Figura 2.4 Muestras de cilindros estandarizados

2.2.2 Granulometría

La granulometría del hormigón consiste en la distribución del tamaño de sus partículas, ésta se determina haciendo pasar una muestra representativa de hormigón por una serie de tamices ordenados, de mayor a menor. Cada uno de estos pesos retenidos se expresa como porcentaje (retenido) del peso total de la muestra.

El porcentaje acumulado que pasa, que será simplemente la diferencia entre 100 y el porcentaje retenido acumulado. Fórmula $\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ Retenido Acumulado}$.

Los resultados de un análisis granulométrico también se pueden representar gráficamente lo cual a este grafico se llama curva granulométrica. Estas gráficas se representan por medio de dos ejes perpendiculares entre sí, horizontal y vertical, en donde las ordenadas representan el porcentaje que pasa y en el eje de las abscisas la abertura del tamiz cuya escala puede ser aritmética, logarítmica o en algunos casos mixtos.

Las curvas granulométricas permiten visualizar mejor la distribución de tamaños dentro de una masa de agregados, permitiendo conocer además que tan grueso o fino es el hormigón. En consecuencia hay factores que se derivan de un análisis granulométrico como son:

- Tamaño máximo: Es el menor tamiz por el que se pasa toda la muestra.
- Tamaño máximo nominal: El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal, puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño.

2.3 Técnicas existentes de monitoreo de la integridad y condiciones físicas de estructuras de concreto

La evaluación periódica del estado de salud de las estructuras civiles de concreto demanda un sistema de monitoreo activo. Por ejemplo, el concreto considerado como un material duradero, esta siempre expuesto a deterioración en la que se ve reflejada por la continua degradación de la estructura.

Dentro del monitoreo de la integridad de estructuras de concreto existen diferentes métodos o ensayos (como los mencionados en el capítulo 1) en donde por sus condiciones de operatividad son difíciles de implementar en el lugar o implica una mayor destreza para la interpretación de datos. Los métodos pulso-eco, radar y ultrasonido pueden tener diferentes ventajas a comparación de los métodos tradicionales.

2.3.1 Técnicas basadas en fibras ópticas

Sensor Interferómetro Fabry Perot

El principio básico del sensor Fabry Perot está basado en las multireflexiones de interferencia entre los dos espejos reflectores. Figura 2.5.

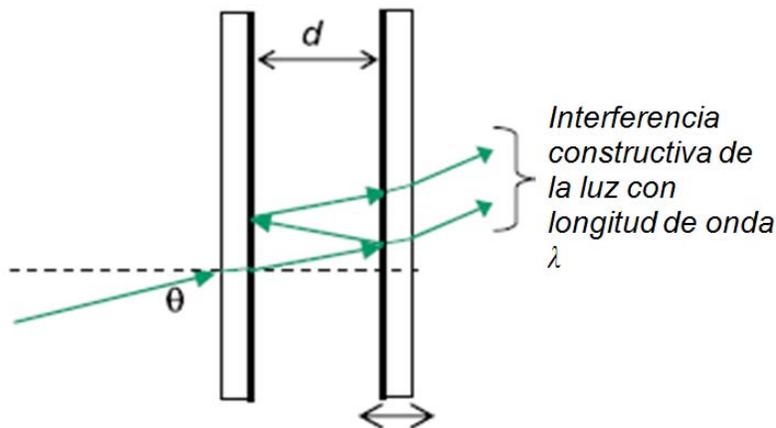


Figura 2.5 Principio de funcionamiento del sensor Fabry Perot

Estructuras de concreto

Este interferómetro construido por A. Fabry y Ch. Perot el rayo de luz incidente es dividido en varias componentes que interfieren unas con otras.

Para entender un poco más su funcionamiento, primero proponemos el análisis del interferómetro Michelson, mostrado en la figura 2.6.

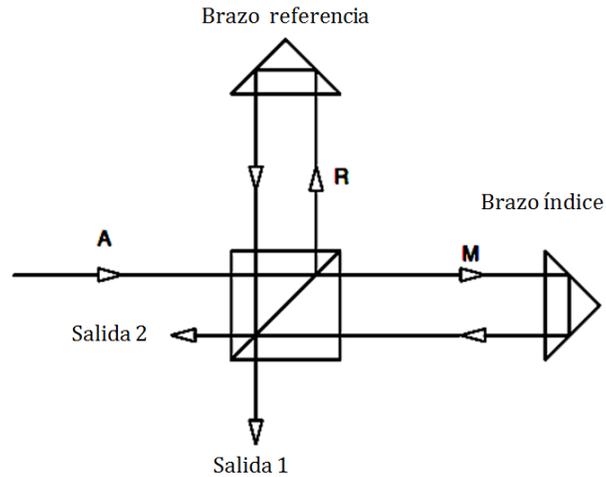


Figura 2.6 Interferómetro Michelson

El rayo incidente tiene un campo incidente $E_A = A_0 \sin(\omega t + kx_A)$

A_0 es la amplitud máxima y k es el número de onda

$$K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

El resultado Para el campo E_R es:

$$E_R = A_R \sin(\omega t + kx_R + \varphi_R)$$

Y para el campo E_M :

$$E_M = A_M \sin(\omega t + kx_M + \varphi_R)$$

$K(X_R - X_M)$ es el desfaseamiento de la onda opuesta a la onda de referencia, que ocurre porque la trayectoria del rayo incidente a través del brazo índice del interferómetro es más largo o más corto que la trayectoria del brazo de referencia. Este desfaseamiento de fase es también conocido como trayectoria de diferencia y es simbolizado como δ [2]

Φ_R y Φ_M son cambios de fase ocurridos a través de la reflexión en la superficie. Cuando las reflexiones acontecen en un reflector ideal, las ondas sufren un desfaseamiento de 180° .

Si seguimos la trayectoria del rayo a la salida 1, podemos ver que el rayo de referencia pasa por dos reflexiones y el rayo M atraviesa por tres reflexiones. El rayo M sufre un desfaseamiento de 180° opuesto al rayo de referencia.

El interferómetro Fabry-Perot hace el uso de múltiples reflexiones entre dos espacios cerrados parcialmente plateados. Parte de la luz es transmitida cada vez que la luz alcanza la segunda superficie, resultando en múltiples componentes que interfieren unas con otras. El gran número de rayos interferidos produce un interferómetro con alta resolución, así como las múltiples ranuras de una rejilla de difracción incrementa su resolución.

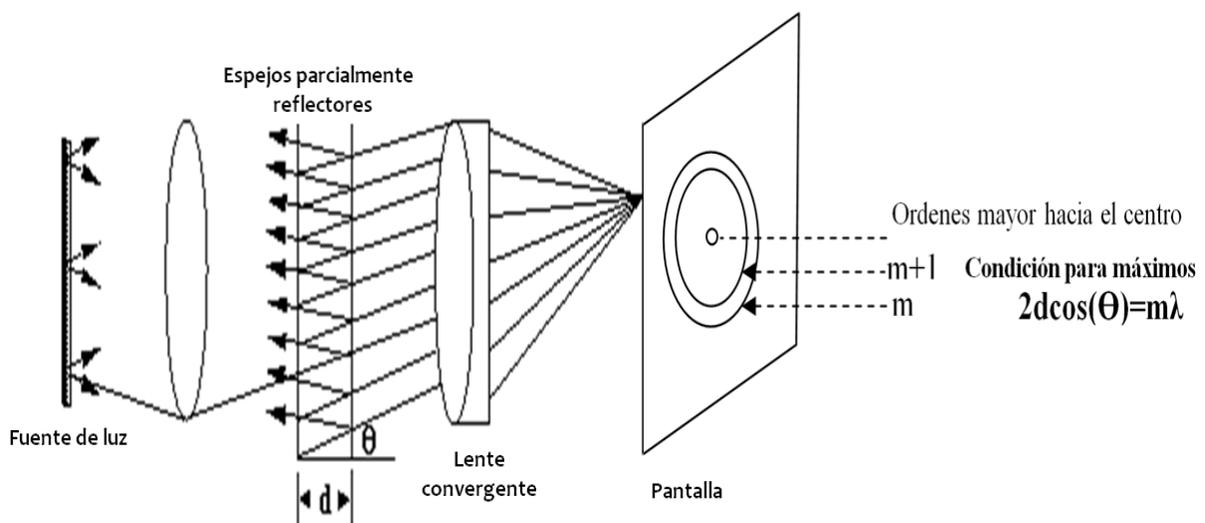


Figura 2.7 Interferómetro Fabry-Perot

Esta técnica, mencionada en diferentes artículos especializados, muestra cómo los sensores de Fabry Perot pueden ser empleados en cilindros de concreto como sensores de strain. Los resultados experimentales de la prueba de compresión del cilindro de concreto con Sistema de protección comparados con los resultados de la resistencia eléctrica son mostrados en la siguiente figura. [3]

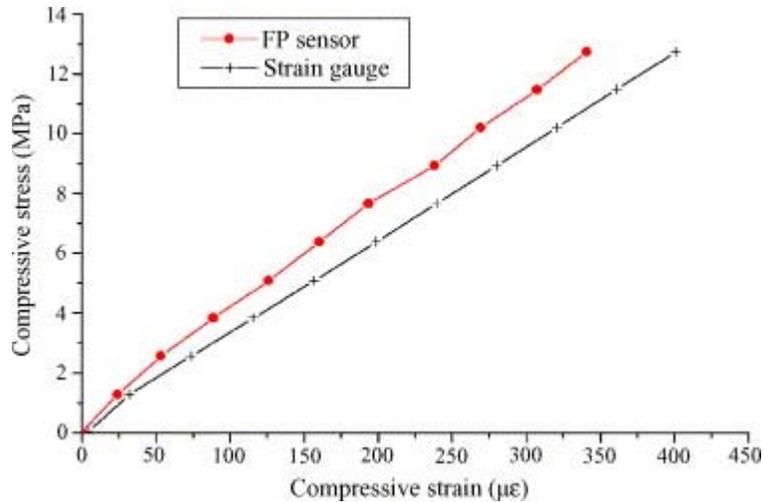


Figura 2.8 Correlación de resultados entre sensor FP y resistencia eléctrica [2]

Sensor polimérico Plate

El sensor Plate consiste en de un plato polimérico con un una fibra óptica embebida que puede ser pegada o introducida en un elemento estructural. El principio de funcionamiento es el siguiente:

Una vez la grieta es formada en un elemento estructural, el plato polimérico adherido se agrietara en la misma dirección y ubicación y una fibra interceptando la grieta a un ángulo de 90° tiene que doblarse para permanecer continua.

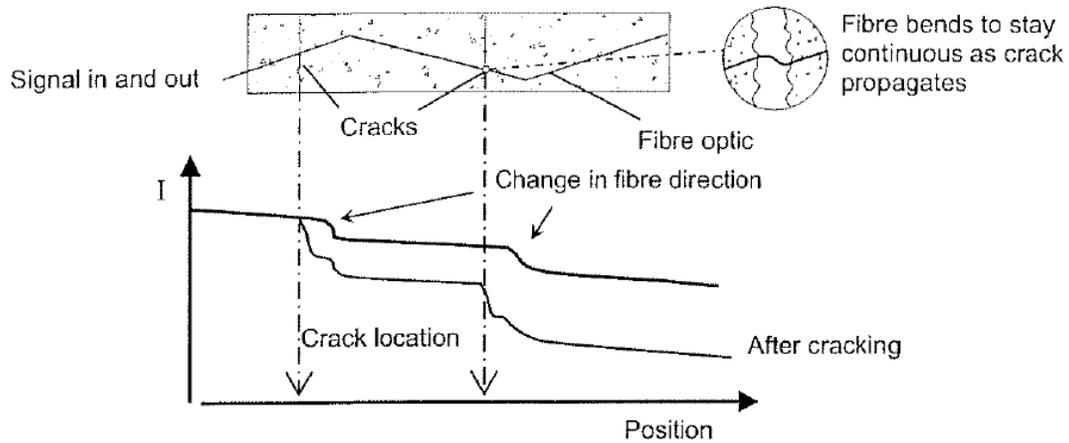


Figura 2.9 Funcionamiento sensor Plate

Esta perturbación en la fibra es muy abrupta y por lo tanto puede ser considerada como una microfisura. Estas microfisuras resultan en una caída pronunciada en la señal óptica, dependiendo de la caída de señal, la abertura de la grieta puede ser obtenida si un modelo de calibración es disponible. [4]

La elección de poliéster para la elaboración del sensor Plate está basada en su alto rendimiento y precio competitivo. Poliéster es durable y resíentete contra ataques ambientales incluyendo ataques químicos de contaminación y cambios extremos de temperatura.

Pruebas de tensión realizadas con el sensor Plate han demostrado que la ductibilidad característica del poliéster puede detectar únicamente grietas con una anchura determinada. [4] Por otra parte, para asegurar que el sensor detecta grietas delgadas, es importante asegurarse que el plato es quebradizo.

Los resultados de las pruebas de tensión llevadas a cabo en especímenes con diferentes dimensiones, geometría y densidad de los materiales agregados, demostraron que es posible incrementar eficientemente la sensibilidad del sensor.

2.4 Agrietamiento

Debido a la baja resistencia a la tensión del concreto, los elementos de este material tienden a agrietarse.

Son diversas las causas que conducen al agrietamiento del concreto, siendo la fundamentales las deformaciones debidas a cambios volumétricos y los esfuerzos ocasionados por fuerzas de tensión, por momentos flexionantes, o por las fuerzas cortantes. [5]

Los cambios volumétricos ocasionados por variaciones en la temperatura y por contracción producen esfuerzos de tensión en los elementos estructurales cuando existe algún tipo de restricción. Cuando estos esfuerzos son superiores a los que soporta el concreto se presentan agrietamientos. Estos agrietamientos pueden controlarse ya sea por medio de refuerzo apropiadamente distribuido, generalmente especificado por los reglamentos con bases empíricas, o ya sea disponiendo juntas de control que hacen que el agrietamiento aparezca en lugares definidos. El agrietamiento por cambios volumétricos es especialmente importante en elementos de concreto simple o concreto masivo.

Las fuerzas axiales de tensión, los momentos flexionantes o las combinaciones de estas acciones producen grietas normales a los ejes de los elementos estructurales. Este tipo de agrietamiento puede ser crítico cuando se utiliza acero de refuerzo con valores de esfuerzo de fluencia iguales o superiores a 4000 Kg/cm² o cuando las cuantías de acero son excepcionalmente altas. Aunque el agrietamiento no puede eliminarse por completo, en estructuras adecuadamente diseñadas con un detallado conveniente del refuerzo las grietas son de ancho pequeño, generalmente del orden de 0.1 mm y raras veces superiores a 0.5 mm, de manera que no afectan a la resistencia ni a la durabilidad de los elementos.

Estructuras de concreto

Grietas superiores de 0.2 mm pueden permitir la penetración de agua y sal (de agua de mar) induciendo la corrosión del metal. Estructuras con grietas mayores por varios mm pueden ser severamente dañadas y deben permanecer cerradas para una inspección detallada y/o reparación.

En particular, el monitoreo de grietas es útil en la determinación del estado de salud de las estructuras de concreto, en donde la degradación de las estructuras esta siempre acompañada por la formación de grietas.

Conclusiones

Las propiedades del hormigón dependen en gran medida de la calidad y proporciones de los componentes de la mezcla, así como de las condiciones de humedad y temperatura durante los procesos de fabricación y de fraguado.

La propiedad mecánica más importante del hormigón es la resistencia a la compresión, la cual debe ser lo suficientemente elevada para resistir todas las cargas previsibles que puedan actuar durante la vida útil de la estructura. El hormigón es un material sumamente resistente a la compresión, pero extremadamente frágil y débil a demandas de tracción.

Desde hace varios años se ha demostrado que los sensores Fabry Perot tienen gran desempeño como sensores en estructuras de concreto, los resultados han demostrado una buena relación con sensores convencionales de resistencia eléctrica. Sin embargo, los sensores Fabry Perot junto con las Rejillas de Bragg no pueden localizar exactamente una grieta en una estructura de concreto debido su funcionamiento puntual.

El sensor polimérico Plate demuestra buen funcionamiento para detectar grietas con una anchura determinada. Varias grietas pueden ser detectadas, localizadas y monitoreadas con una sola fibra. Es elaborado con poliéster lo que hace un sensor competitivo en precio. Aunque es relativamente fácil la interpretación de datos, la desventaja del sensor Plate radica en la implementación en el lugar.

Bibliografía

- [1] Marcelo Romo Proaño, “Temas de hormigón armado”. Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.
- [2] Dickmann, Dr. W. Luhs, “Experiment 03 Fabry Perot Resonator”, Didactic Counsellor, MEOS GmbH 79427 Eschbach – 1992/2003.
- [3] J.S. Leng, R. A. Barnes, A. Hameed, D. Winter, J. Tetlow, G.C. Mays, G. F. Fernando, “Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors”, Harbit Institute of technology, Royal Military College of Science, UK, 2005.
- [4] Cruz, P.J.S., León, A.D., “A new sensor for crack detection in concrete structures”, sustainable bridges.
- [5] González Cuevas Oscar, Francisco Robles Fernández- Villegas, “Aspectos fundamentales del concreto reforzado”, Tercera edición, Limusa, México, 1995.

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.

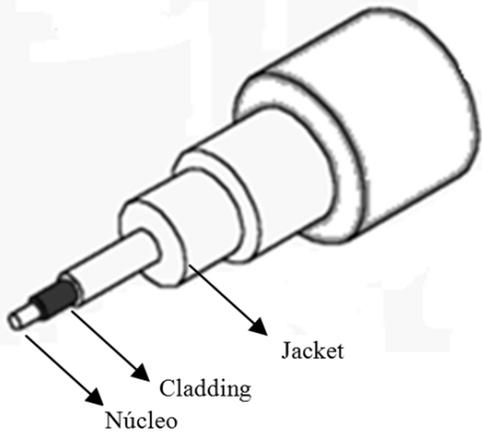
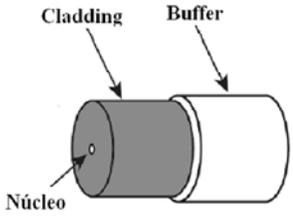
<p>SERIES FG</p> 	<p>SERIES GFIB (MONOMODO)</p> <ul style="list-style-type: none">- Mejora fotosensitividad- Bajas perdidas por empalme- Muy buena uniformidad 
<p>SERIES FT</p> <ul style="list-style-type: none">- Alta apertura numérica- Acoplamientos sobre 370% más que las fibras con silica-clad estándar- 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.

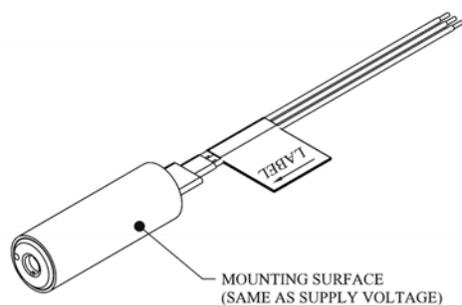


Figura 3.2 Diodo laser COHERENT

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.

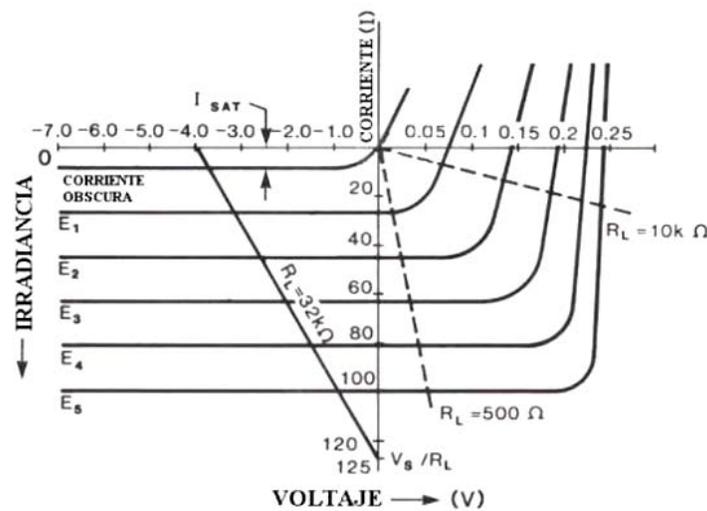


Figura 3.4 Características típicas corriente-voltaje de un fotodiodo de unión

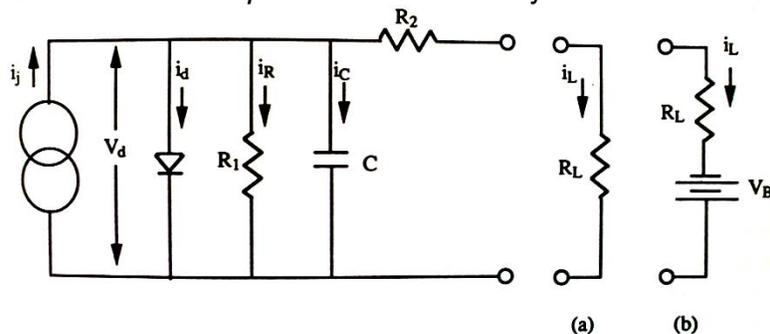


Figura 3.5 Circuito equivalente de un fotodiodo en modo fotovoltaico (a) y modo fotoconductorivo (b)

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].

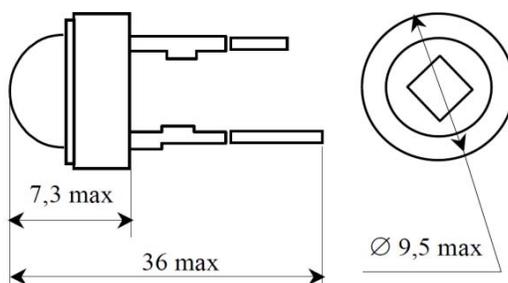


Figura 3.6 Dimensiones físicas del fotodiodo de silicio **ФД-263**

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 materiales 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.

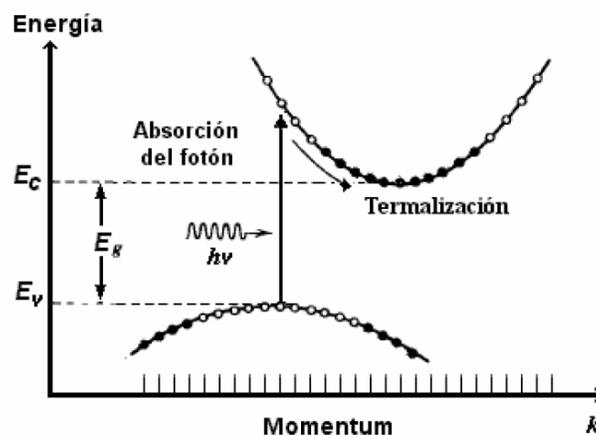


Figura 3.7 Absorción de un fotón en un semiconductor de gap indirecto y visualización del proceso de termalización

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.

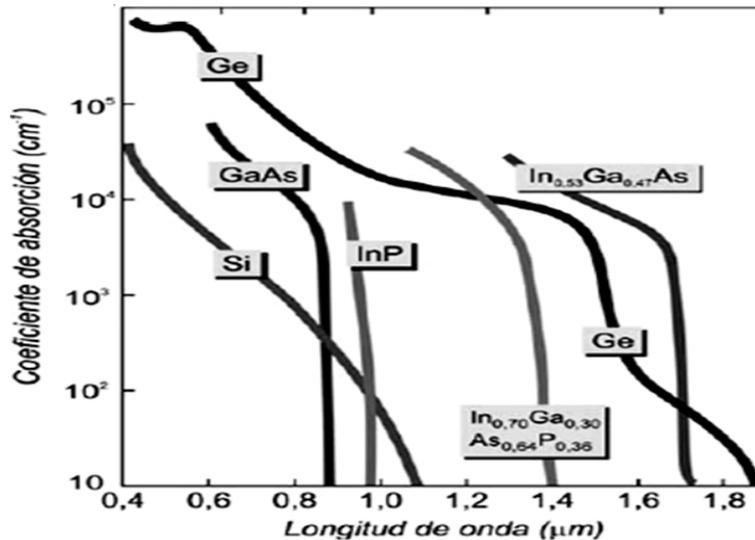


Figura 3.8 Coeficientes de absorción de diferentes semiconductores

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].

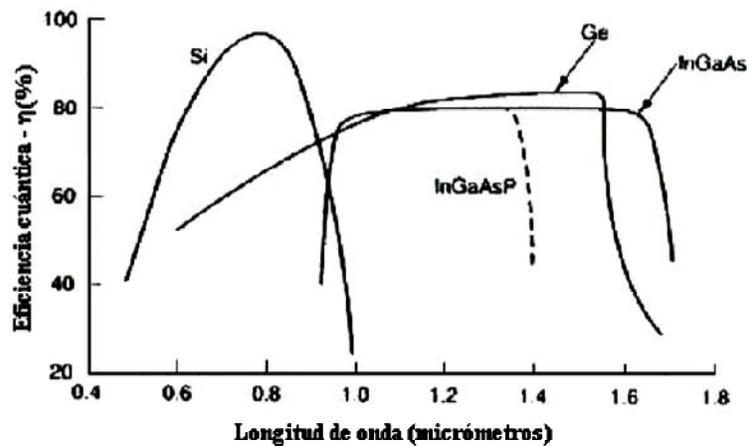


Figura 3.9 Valores típicos de eficiencia cuántica en diferentes longitudes de onda para distintos materiales semiconductores

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 .

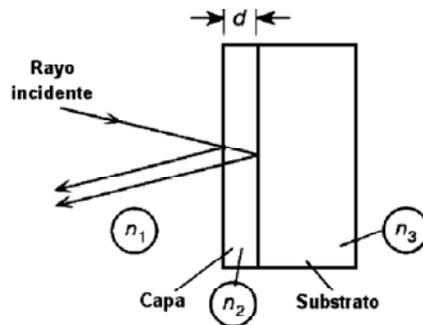


Figura 3.10 Esquema de los índices de refracción que existen en la interacción de un fotón en fotodetector

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].

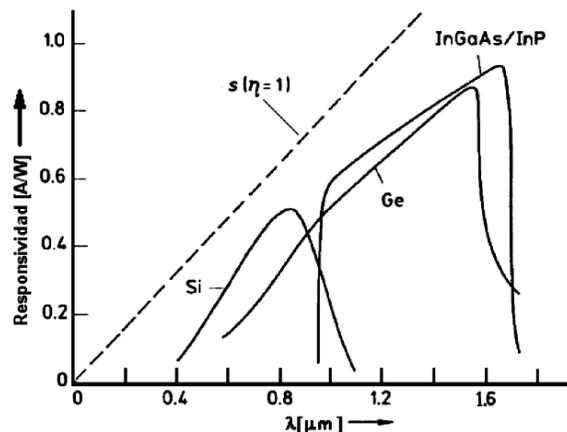


Figura 3.11 Responsividad de un fotodiodo típico

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

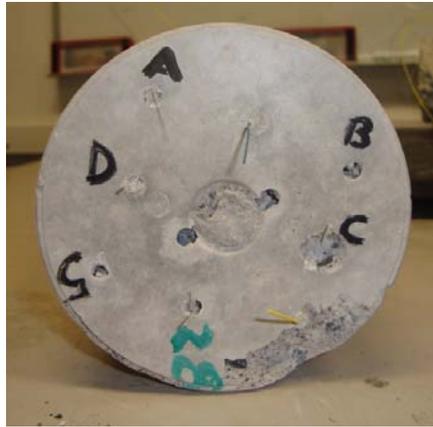


Figura 3.143 Cilindro con protección (Vista lateral)

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 $\frac{3}{8}$
- $\frac{1}{2}$ litro de agua

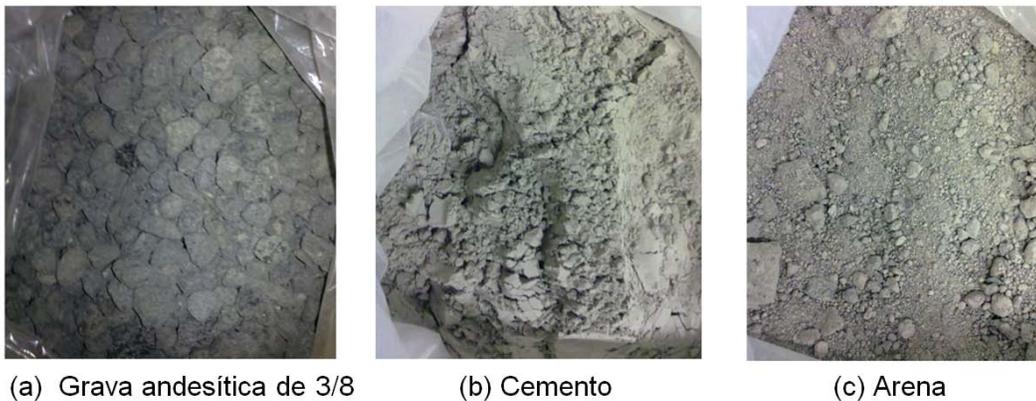


Figura 3.17 Agregados

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).

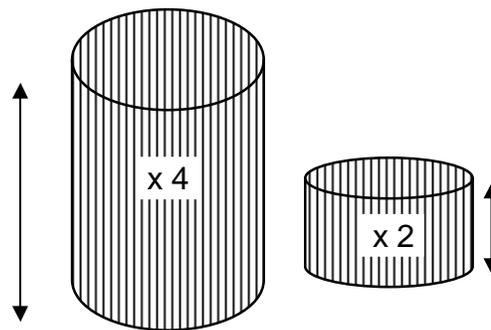


Figura 3.18 Dimensiones de los moldes

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

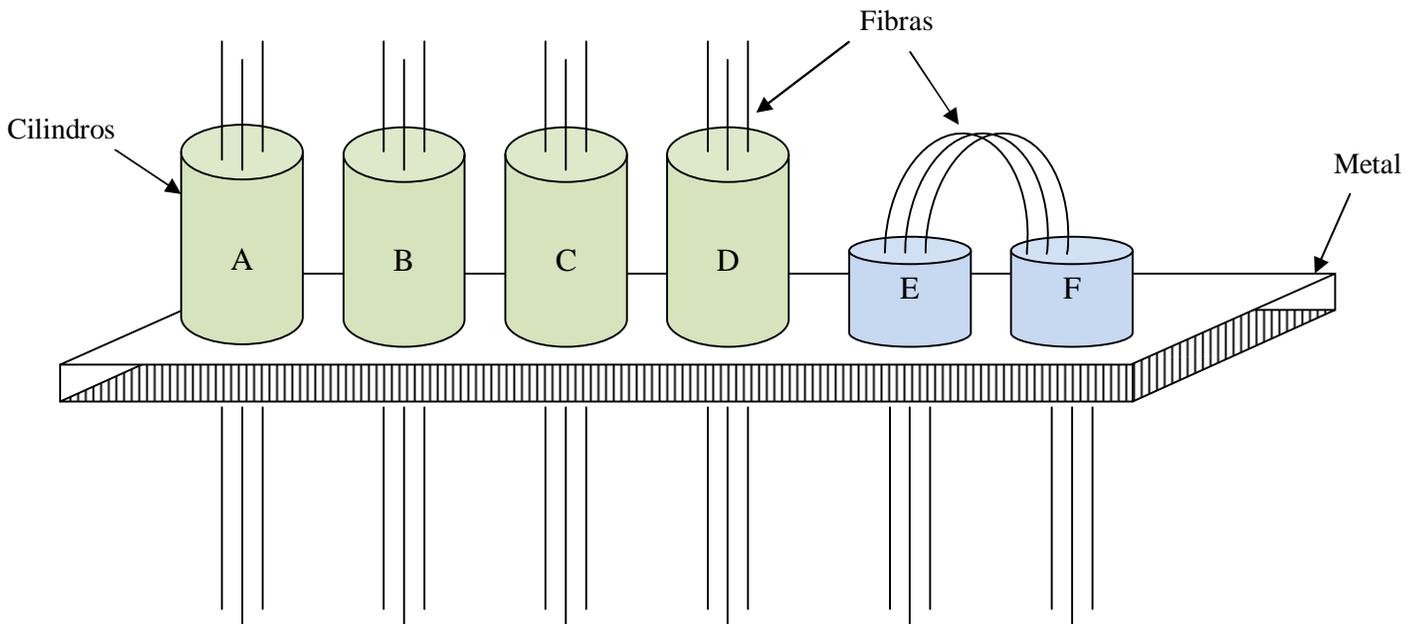


Figura 3.19 Esquema para la elaboración de cilindros

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

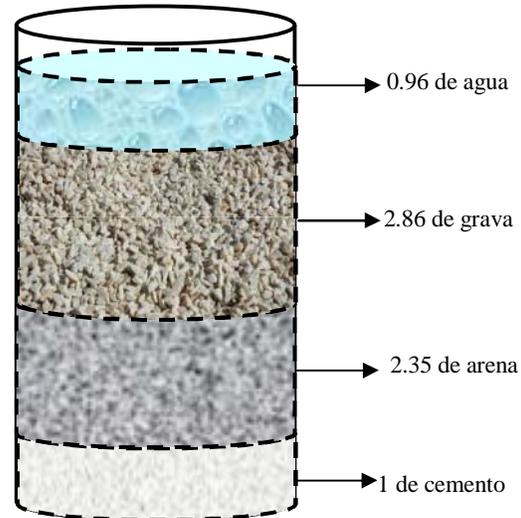
f'_c	a/c	$\frac{3}{4}$ "				1.1/2 "				3 "				
		Cem	ar	gr	ag	Cem	ar	gr	ag	Cem	ar	gr	ag	
160	0.62	rel	1	2.35	2.86	.96	1	2.10	2.33	.96	1	1.98	1.32	.96
		vol	325	.503	.606	210	314	.435	.690	200	284	.371	.247	182
			Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg	Kg	m ³	m ³	Kg
210	0.56	rel	1	2.07	2.50	.85	1	1.86	2.94	.85	1	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.

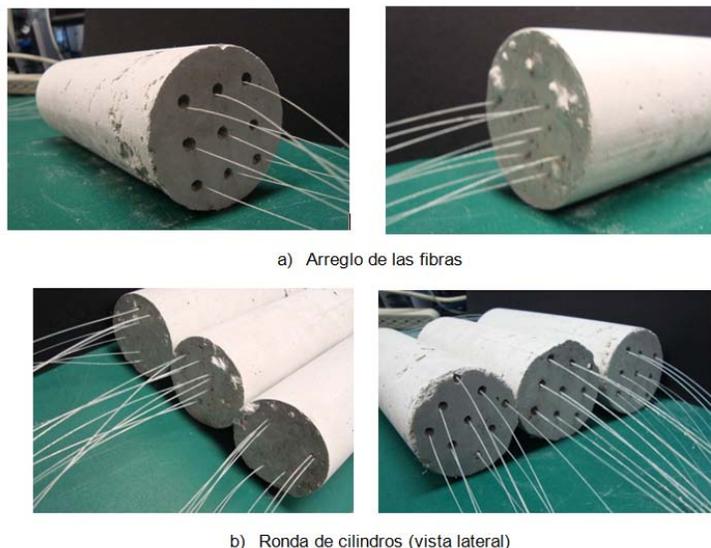


Figura 3.21 Arreglos de fibras en cilindros de concreto

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

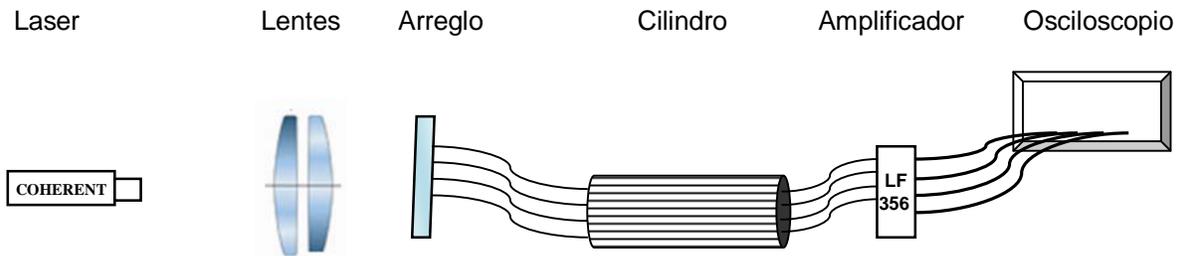


Figura 3.22 Diagrama

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

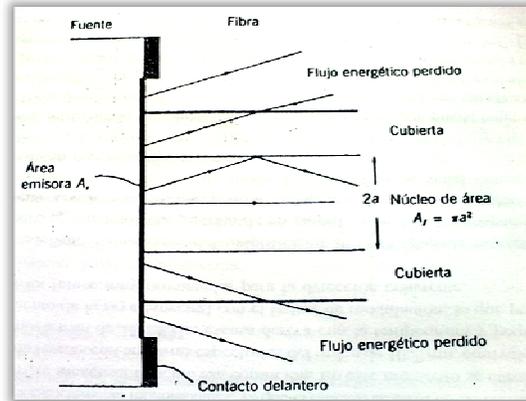


Figura 3.23 Acoplamiento entre una fuente emisora y una fibra óptica

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.

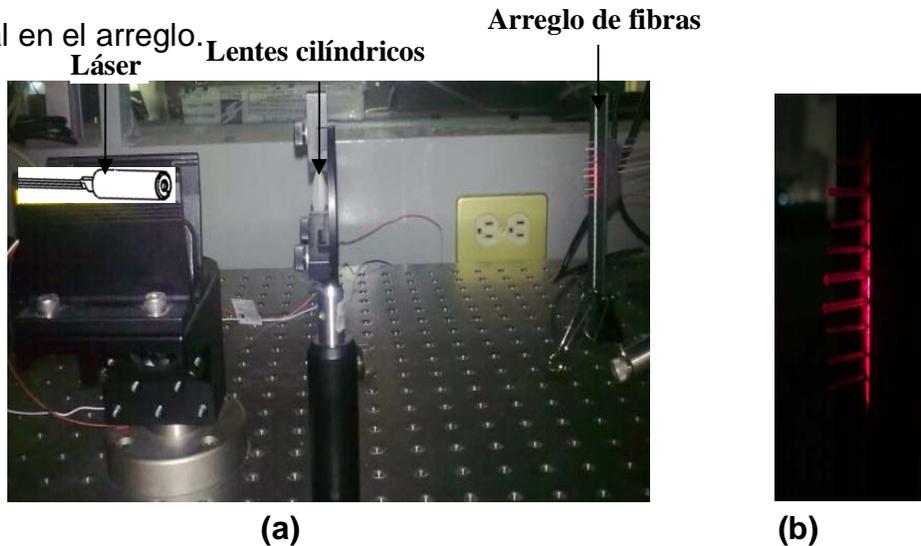


Figura 3.24 a) Acoplamiento del laser con arreglo de fibras b) Iluminación de las fibras

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.

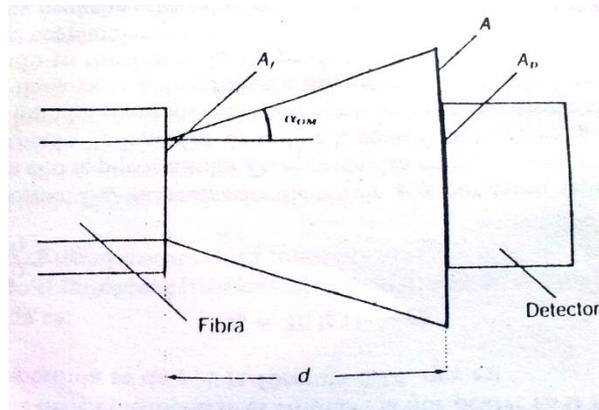


Figura 3.25 Acoplamiento entre una fibra y un detector separados por una distancia d .

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.

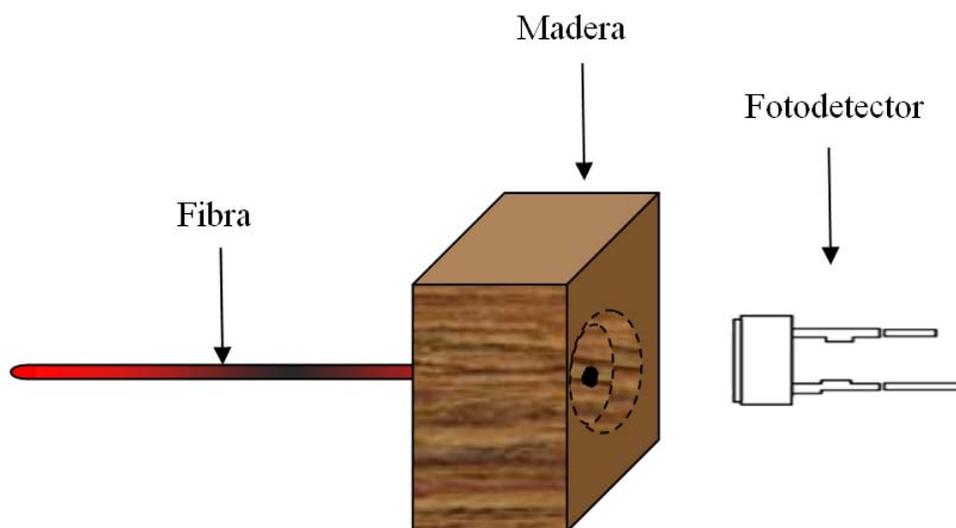


Figura 3.26 Acoplamiento Fibra detector

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.

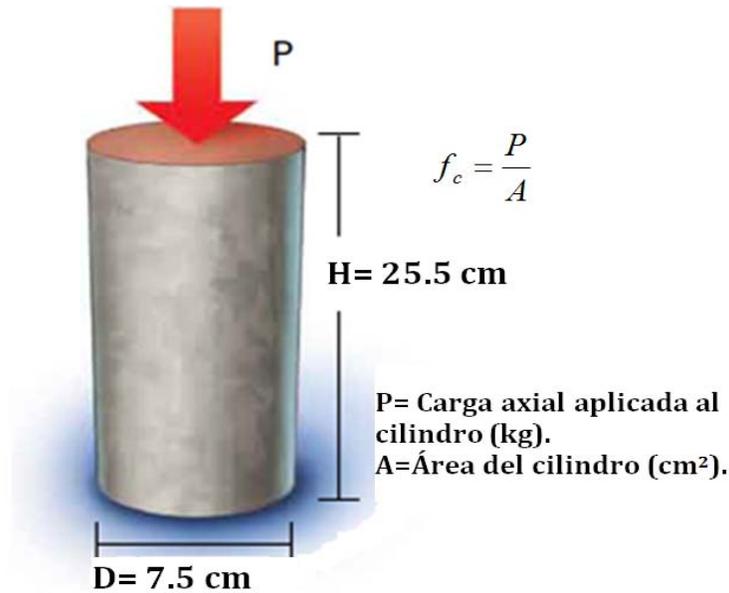


Figura 3.27. Características del cilindro

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.

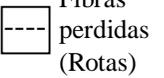
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Resultados de las pruebas

4.1.1 Continuidad en las fibras

Los siguientes resultados corresponden a los primeros cilindros de concreto. Se verificó el número total de fibras que resistieron al proceso de vertido y solidificación del concreto y por lo tanto presentan un mejor desempeño en estructuras de concreto.

Tabla 4.1 Resultados de continuidad

	CILINDRO CON PROTECCIÓN	CILINDRO SIN PROTECCIÓN	
1. FG-200 UCR	Transmite	Transmite	
2. FG-200 LCR	Transmite	Transmite	
3. SMF-128	Transmite	Transmite	
4. GFIB	Sin transmisión	----	
5. FG-365 LER	Transmite	Transmite	
6. FT-200 URT	----	Transmisión tenue	
7. FT-400 URT	Transmite	Transmite	
8. AFS 50/125	Transmite	Transmisión tenue	
9. AFS 105/125	Transmite	Transmite	
10. Fibra Azul	Sin transmisión	Sin transmisión	

De la tabla 4.1 podemos observar que los tubos empleados sirven en cuanto a la protección, sin embargo, para estos cilindros la técnica no fue 100% efectiva ya que dos fibras se perdieron y no fue posible medir su transmisión. Es importante remarcar que las fibras con mayor diámetro FT o FG son más resistentes y conservan sus propiedades de transmisión completamente. De acuerdo a los resultados obtenidos, para los siguientes experimentos se utilizarán fibras FG-200-LCR, FT-200-URT y FT-400-URT debido a sus características físicas y propiedades resistivas ante el concreto.

Resultados experimentales

4.1.2 Compresión de las muestras

1er Prueba. Cilindro sin fibras

En ésta prueba se sometió a compresión un cilindro de concreto sin fibras ópticas, el fin de la prueba es determinar la fuerza de compresión o esfuerzo del mismo y después, en la segunda prueba con un cilindro similar comparar los resultados.

Tabla 4.2 Datos del cilindro sin fibras

Altura [cm]	Diámetro [cm]	Área [cm ²]	Carga Axial [Kgf]	Esfuerzo o Strain [Kgf/cm ²]	Modulo de elasticidad E _c [Kgf/cm ²]
25.5	7.5	44.17	6850	155.08	18.68x10 ⁴



a) Antes de la prueba



b) Carga máxima (falla de ruptura)

Figura 4.1 Cilindro sin fibras sometido a prueba de compresión

Como se observa en la figura 4.1, conforme aumentaba la fuerza de compresión aparecieron dos grietas axiales que convergen en la base del cilindro.

Resultados experimentales

Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia del material de cabeceo: También por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga. Con base en la norma Norma C39-C39M, AST internacional.

2da prueba. Cilindro con fibras

Para la segunda prueba se utilizó otro cilindro con las mismas dimensiones pero con fibras introducidas. Las fibras ópticas utilizadas fueron 400- URT en un arreglo de nueve fibras protegidas con tubos de plástico.

Altura [cm]	Diámetro [cm]	Área [cm ²]	Carga Axial [Kgf]	Esfuerzo o Strain [Kgf/cm ²]	Modulo de elasticidad E _c [Kgf/cm ²]
25.5	7.5	44.17	2600	58.86	11.51x10 ⁴

Tabla 4.3 Datos del cilindro con fibras

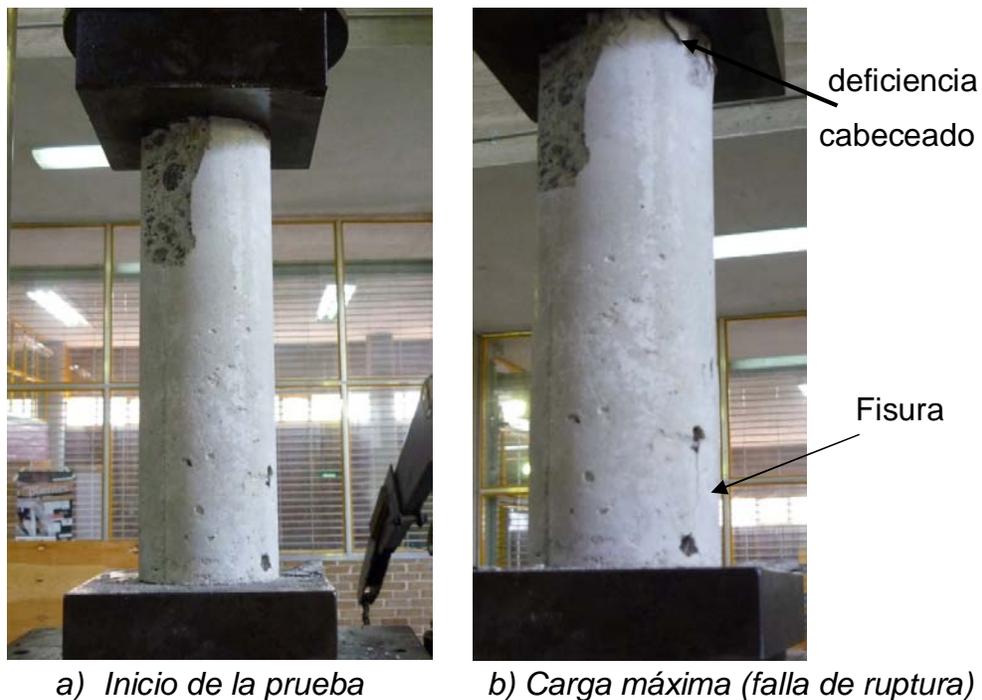


Figura 4.2 Cilindros con fibras sometido a prueba de compresión

Resultados experimentales

Al iniciar la prueba se observó que a los 400 [N] un trozo del cilindro se desprendió en la parte superior, según los tipos de fallos de la norma C-39, C-39M el fallo fue debido al mal asentamiento que tiene la cara del cilindro con la plataforma de la máquina de compresión.

Durante la prueba se observaron diferentes eventos, a los 2600 [Kgf] la manecilla de la maquina regresó, después volvió a incrementar y a los 5850 [Kgf] bajo nuevamente, a los 6600 [Kgf] tuvo el mismo comportamiento. La carga máxima aplicada fue de 7100 [Kgf].

En esta prueba solo aprecio una pequeña fisura de forma axial.

Resultados experimentales

4.1.3 Respuesta en frecuencia del fotorreceptor

Uno de los experimentos para poder observar la respuesta en frecuencia del amplificador así como su ancho de banda se muestra en la figura 4.3.

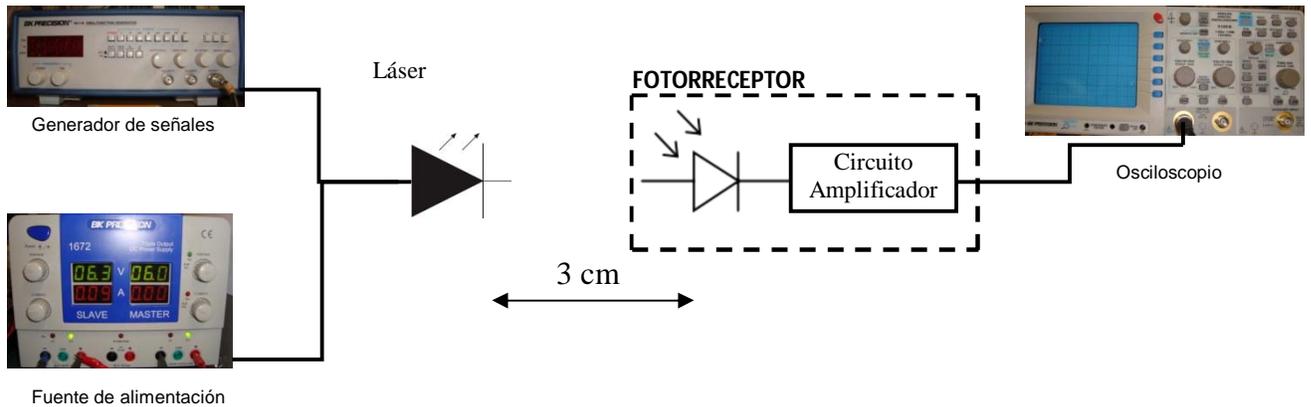


Figura 4.3 Diagrama de conexiones

Para éste experimento se conectó el generador de señales y la fuente de alimentación en el adaptador BNC-hembra del diodo láser. Se polarizó el láser con un voltaje de 6 [V] de CD y una señal cuadrada moduladora de 1 [kHz] y 4.39 [Vpp] (el voltaje mínimo necesario para su funcionamiento) figura 4.4.

La modulación del láser servirá para conocer el ancho de banda a la que el fotorreceptor trabaja linealmente. La modulación se realizó con el generador de señales y comenzó en intervalos de 10 [kHz].

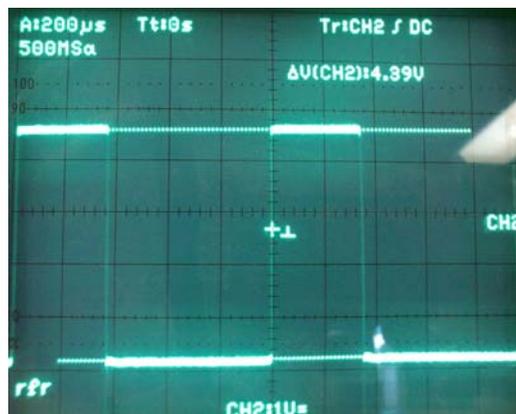


Figura 4.4 Señal moduladora

Resultados experimentales

Para este experimento la intensidad de la señal cuadrada permanecerá constante para mantener una referencia mientras que su frecuencia variará de forma periódica.

En la tabla 4.4 se observa la relación entre frecuencia de la señal moduladora y el voltaje en la salida del amplificador.

Tabla 4.4 Relación Frecuencia vs V_o Amplificador

Frecuencia [kHz]	Voltaje salida amplificador [V]
1	3.59 → V_o
10	3.39
20	3.05
30	2.94
40	2.75
50	2.68
60	2.57 → $0.7071 V_o$
70	2.49
80	2.41
90	2.39
100	2.31
150	2.31
200	2.28
250	2.20
300	2.05

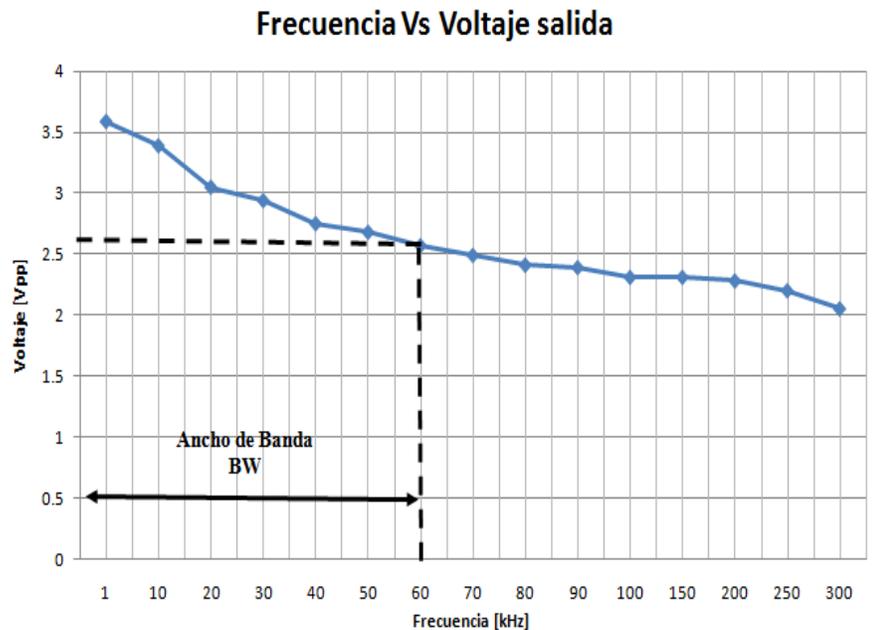


Figura 4.5 Grafica entre frecuencia vs V_o Amplificador

De acuerdo a la tabla 4.4 el ancho de banda de funcionamiento es de 60 [kHz]

En la figura 4.6 se observa la distorsión de la señal de salida del amplificador a diferentes frecuencias, la amplitud y ancho del pulso comienzan a reducirse y se presentan zonas de relajamiento en el flanco de bajada.

Resultados experimentales

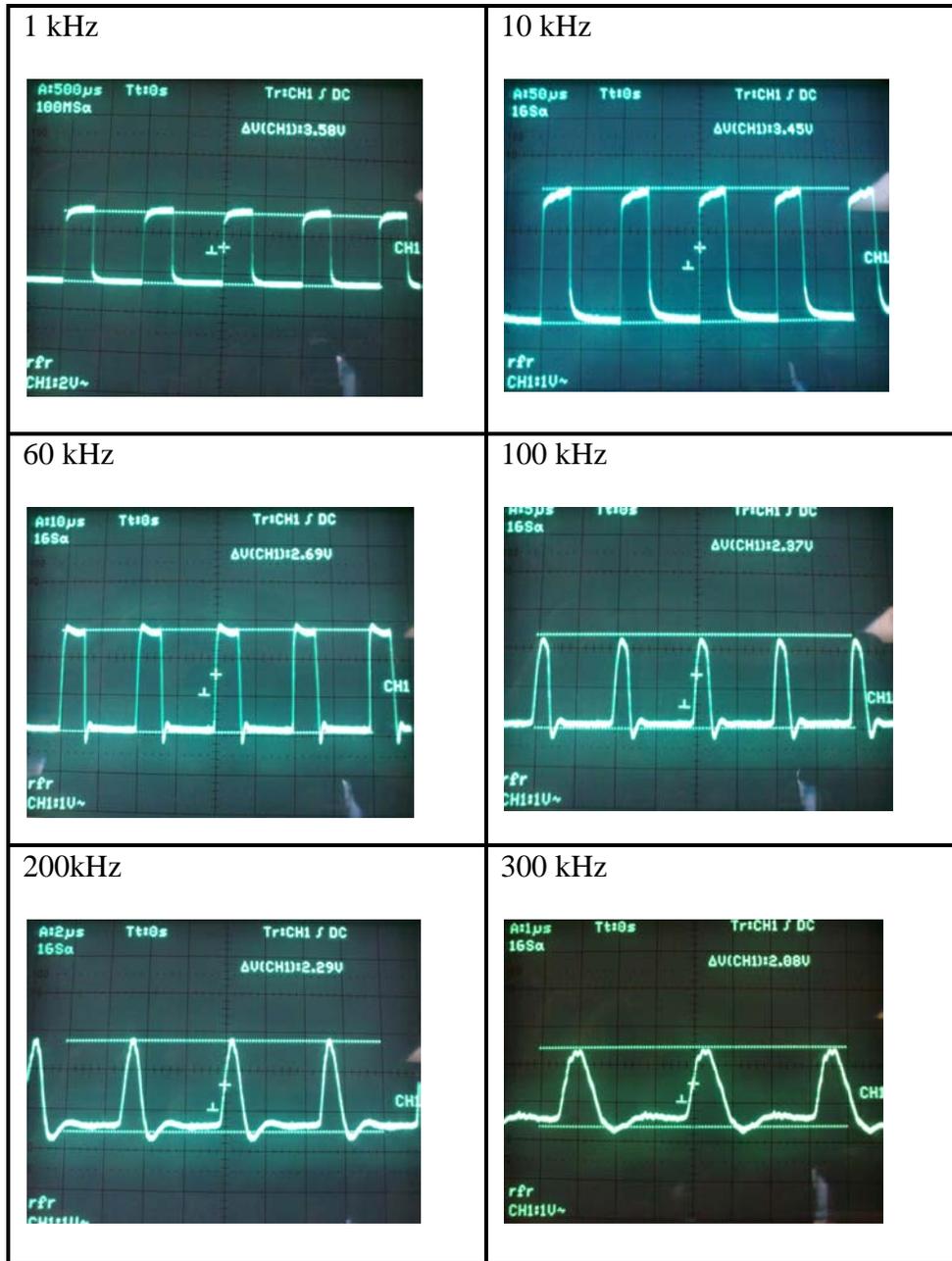


Figura 4.6 Distorsión de la señal

4.2 Caracterización del Fotodiodo de silicio ФД-263

En esta sección se caracterizará al fotodiodo tanto en responsividad y eficiencia cuántica en el intervalo de funcionamiento con el fin de tener una mayor precisión en cuanto a sus parámetros.

4.2.1 Coeficiente de absorción α

De acuerdo a la tabla 3.2 se menciona la respuesta espectral y responsividad del fotodiodo a 550 [nm]. A partir de estos datos proporcionados por el fabricante calcularemos los correspondientes para cada longitud de onda abarcando, por supuesto, la longitud de onda del diodo laser de prueba (COHERENT 670 nm).

Como se mencionó en la sección 3.1.6, la responsividad es un parámetro que depende de la eficiencia cuántica, *i.e.* $R = f(\eta)$. La eficiencia cuántica, a su vez, depende del coeficiente de absorción del material con que fue construido el fotodetector (silicio), *i.e.* $\eta = f(\alpha)$. Como el coeficiente varía para cada longitud de onda, lo primero que se necesita es calcularlo para el intervalo de funcionamiento (0.4 – 1.1 μm) con ayuda de la expresión 3.2.

De la expresión 3.2 encontramos que el tiempo de recombinación radiante τ_r es desconocido sin embargo, al tratarse de un valor constante, lo podemos calcular utilizando el coeficiente de absorción a 550 nm de la grafica mostrada en el apéndice CB. Despejando τ_r de la ecuación 3.2 y tomando el valor de $\alpha = 7500$ [cm^{-1}]. [2]

$$\tau_r = \frac{\sqrt{2}c^2 m_r^{3/2}}{\alpha(\nu)} \frac{1}{(h\nu)^2} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4.1)$$

En donde:

$$m_r = 0.1988 m_0$$

$$m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ [Kg]}$$

Resultados experimentales

$E_g(\text{Si}) = 1.776 \times 10^{-19} \text{ [J]}$ de acuerdo a la tabla 4.7

$\alpha = 7500 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$

$h\nu = hc/\lambda = 3.61418 \times 10^{-19} \text{ [J]}$

El tiempo de recombinación calculado es $\tau_r = 43.084 \text{ [ns]}$. Una vez calculado el tiempo es posible calcular el coeficiente de absorción α en todo el intervalo de operación del fotodiodo.

Tabla 4.5 Valores del coeficiente de absorción en función de la longitud de onda

Longitud de onda $\lambda[\mu\text{m}]$	Coficiente de absorción $\alpha \text{ [cm}^{-1}\text{]}$
0.40	5207.5059
0.50	6751.712
0.55	7467.4912
0.60	8125.284
0.67	8916.2194
0.70	9197.1987
0.80	9799.99
0.90	9680.2538
1.00	8337.0621
1.10	3733.2052

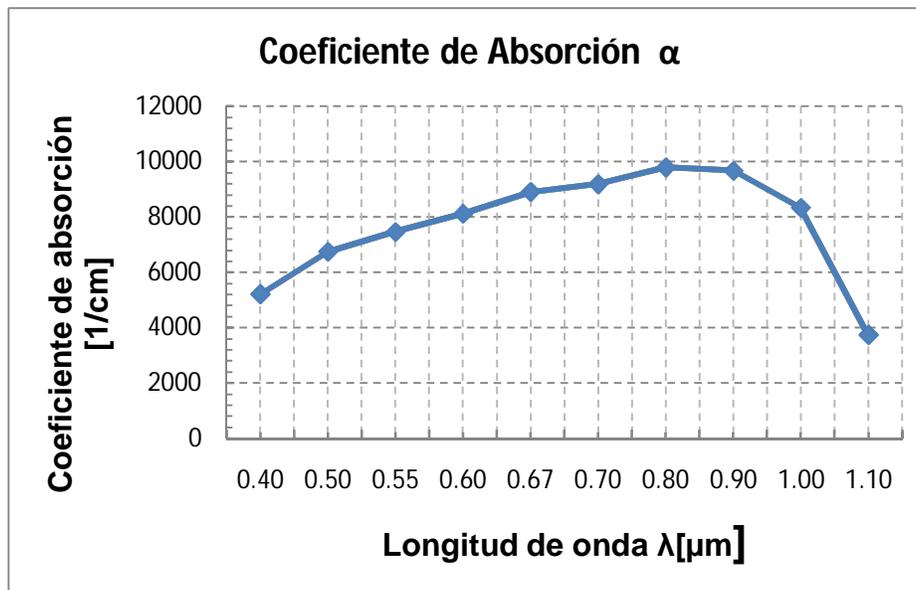


Figura 4.7 Coeficiente de absorción del fotodiodo $\Phi\text{D-263}$

Resultados experimentales

4.2.2 Eficiencia cuántica η

Una vez obtenidos los valores de α es posible calcular la eficiencia cuántica y responsividad a partir de las ecuaciones 3.5 y 3.7. Sin embargo, la ecuación 3.5 depende de la profundidad del detector d . Para encontrar éste valor despejamos d de 3.5 y sustituimos los valores de eficiencia cuántica y coeficiente de absorción para 550 [nm]. La eficiencia para 550 [nm] se calcula a partir de la ecuación 3.7 y $R[A/W]= 0.15$ (según fabricante).

El valor de la reflectividad R se calcula a partir de la ecuación 3.10 y cuyos valores de los parámetros son: $n_1=1$, $n_2(\text{SiO}_2)=1.46$ y $n_3(\text{Si})= 3.45$.

$$d = \frac{1}{-\alpha} \ln \left(1 - \frac{\eta}{(1-R)} \right) \quad (4.2)$$

Quedando los siguientes valores para 550 [nm]:

$$\alpha = 7467.4912 \text{ [cm}^{-1}\text{]}$$

$$\eta_{550 \text{ nm}} = 0.338181$$

$$R = 0.0557926$$

Así, la profundidad d de la placa es $d = 59.381 \text{ [}\mu\text{m]}$. Con éste valor se puede calcular la eficiencia cuántica y responsividad para el intervalo espectral del fotodiodo.

Tabla 4.6 Valores de la eficiencia cuántica en función de la longitud de onda

Longitud de onda $\lambda[\mu\text{m}]$	Eficiencia Cuántica η
0.40	0.25
0.50	0.31
0.55	0.33
0.60	0.36
0.67	0.38
0.70	0.39
0.80	0.41
0.90	0.41
1.00	0.36
1.10	0.18

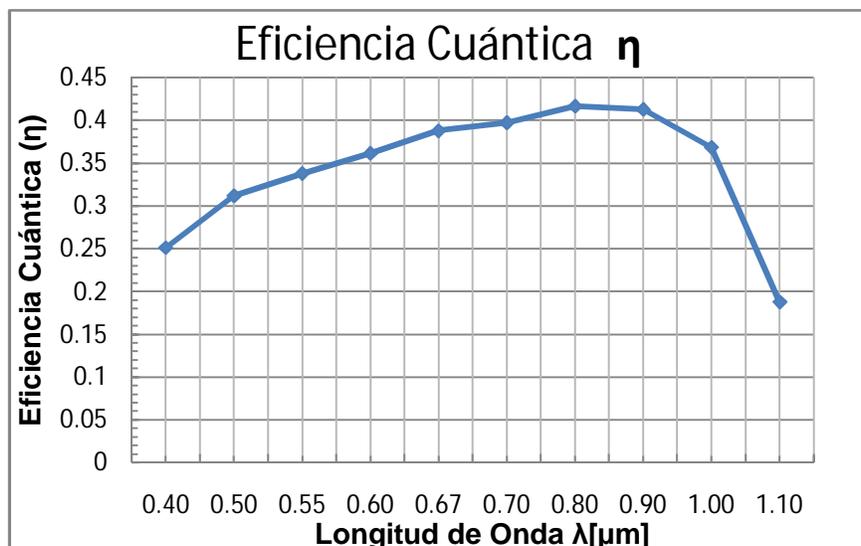


Figura 4.8 Eficiencia Cuántica del fotodiodo ФД-263

4.2.3 Responsividad R

Tabla 4.7 Valores de Responsividad en función de la longitud de onda

Longitud de onda λ [μm]	Responsividad R [A/Watt]
0.40	0.08
0.50	0.12
0.55	0.15
0.60	0.17
0.67	0.21
0.70	0.22
0.80	0.26
0.90	0.30
1.00	0.30
1.10	0.16

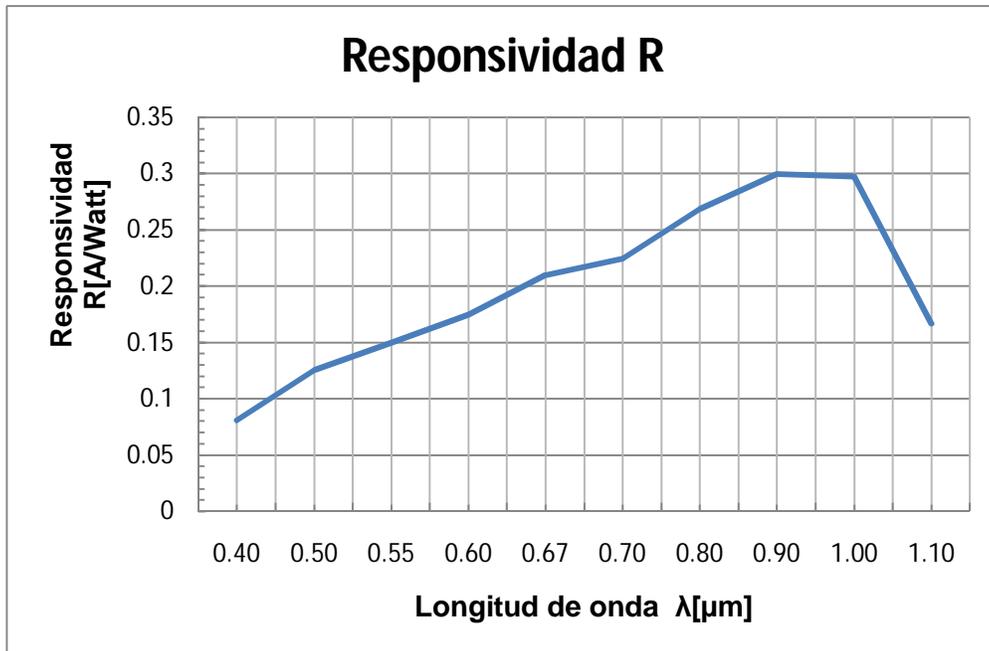


Figura 4.9 Responsividad del fotodiodo $\Phi\text{Д-263}$

4.3 Análisis y discusión de los resultados

La técnica de protecciones de las fibras durante el vertido de concreto demuestra gran eficacia y buen funcionamiento. Las fibras más vulnerables a las masas de concreto y a sus agentes corrosivos son las fibras de menor tamaño.

En la prueba de compresión de las muestras es evidente observar que los cilindros pierden resistencia cuando se les introduce fibras; esto se debe a la acumulación de poros alrededor de las fibras. De acuerdo a los resultados obtenidos, un cilindro pierde 2/3 de su resistencia a compresión cuando se le introduce un arreglo simétrico de 9 fibras ópticas 400- URT separadas 2.5 cm y protegidas con tubos de plástico.

La diferencia de esfuerzo calculado para ambos cilindros muestra una clara pérdida de propiedades mecánicas y resistivas. Los daños exteriores que sufrió la primera muestra fueron mayores, las grietas fueron más evidentes mientras que en la segunda ligeramente se notaron.

Resultados experimentales

La explicación de la variación de la manecilla durante la prueba es debida a la compresión de poros, recordemos que el cilindro contiene fibras ópticas y que éstas se adhieren difícilmente al concreto, por lo tanto una gran cantidad de poros quedan en su interior y al momento de aplicarle una fuerza los poros tienden a reducirse ocasionando un momento de relajación de la maquina.

En las pruebas de frecuencia observamos que el fotorreceptor presenta una característica de filtro paso bajas, de acuerdo a la figura 4.5 en donde se ve la disminución del voltaje conforme aumenta la frecuencia, el ancho de banda optimo (a -3db) es de 60 KHz, después de esta frecuencia la señal recuperada comienza a distorsionarse y pierde potencia.

El proceso de conversión de señal óptica-eléctrica es muy ineficiente y perjudicial a la señal, es por ello que en sistemas de telecomunicaciones de alta velocidad es preferible tratar a la señal de forma óptica durante todo el enlace sin convertirla a eléctrica para evitar alteraciones o retardos.

Los resultados obtenidos en la caracterización del fotodiodo muestran que el coeficiente de absorción es mayor en el intervalo de 800 a 900 [nm], por lo tanto la eficiencia cuántica es máxima en esas longitudes de onda y concuerda perfectamente con las especificaciones dadas para el dispositivo.

En la tabla de eficiencia cuántica (*Tabla 4.6*) es importante señalar que los valores varían del 18% hasta el 41% en la longitud de onda óptima, es decir, pequeñas variaciones de longitud de onda en la fuente de emisión pueden ocasionar una significativa disminución de la señal.

La responsividad tiene un comportamiento diferente, presenta un máximo de 900 a 1000 [nm], y marca muy bajo a los 550 [nm] (longitud dada por el fabricante). Por los resultados anteriores podemos concluir que el fotodiodo $\Phi\Delta$ -263 tiene mejor funcionamiento y mayor rendimiento trabajando a los 900 [nm].

5 CONCLUSIONES GENERALES

Algunas fibras ópticas son más vulnerables a los agregados de concreto y por lo tanto más propensas a quebrarse. Una constante que se presentó fue el deslizamiento de fibras, la mayoría se deslizan al aplicar una fuerza de tensión. Las fibras más delgadas tienden a deslizarse más fácilmente que las de diámetro mayor.

La resistencia a la compresión (f_c) de los cilindros disminuye una tercera parte al introducirle fibras. Esta disminución se podría compensar cambiando la relación agua cemento o el tamaño de los agregados. Si se reduce la relación a/c la resistencia a compresión aumenta pero se hace menos manejable.

La instrumentación de fibras ópticas como fibra estándar SMF 128 [μm], FT- 400 o FT-200 tiene un pobre desempeño como sensores embebidos. Los mejores resultados obtenidos ante los agentes corrosivos del concreto fueron llevados a cabo con las series FG - 200, una fibra de gran apertura numérica y baja atenuación en la banda de 850 [nm] ideal para el fotodiodo ΦD -263.

Se comprobó que el diseño de mezcla cumple correctamente los requerimientos del concreto, los ensayos de compresión corroboran los cálculos y se encuentran dentro de los rangos aceptables. Una forma de compensar la disminución de la resistencia es reduciendo la cantidad relativa de los agregados en forma proporcionada.

Se estudió la respuesta en frecuencia del fotorreceptor, observando su bajo rendimiento y gran distorsión de la señal en altas frecuencias. La combinación de fotodiodo colocado en cascada con un circuito amplificador no es la mejor combinación al trabajar con láseres modulados.

Conclusiones generales

Se demostró el buen desempeño de fibras ópticas como sensores enterrados en cilindros de concreto, proponiendo un modelo de sencilla operación para el monitoreo continuo del estado de salud de la estructura. La fácil inserción de las fibras y la facilidad de interpretación de datos son sus principales ventajas, dejando la posibilidad de detectar posibles anomalías que puedan ocurrir a lo largo de la vida útil de la estructura.

APÉNDICE A. Corriente de ruido en el fotodiodo ФД-263

Este apéndice discute algunas de las fuentes dominantes de ruido que limitan la sensibilidad en configuraciones coherentes y de detección directa en el receptor. Cada fuente de ruido será tratada independientemente comprendiendo que el ruido total esta dado sumando el cuadrado de cada término. Por cuestiones de comparación, todas las fuentes de ruido serán referidos a la corriente de salida del fotodiodo. Figura A.1. Ésta posición es conveniente para comparar ruido generado eléctricamente y ópticamente. El ruido de fotocorriente puede ser fácilmente relacionado con la sensibilidad óptica usando la responsividad del fotodiodo. Excepto por el cambio de unidades, el valor numérico de la fotocorriente de la fotocorriente y potencia óptica son casi idénticas.

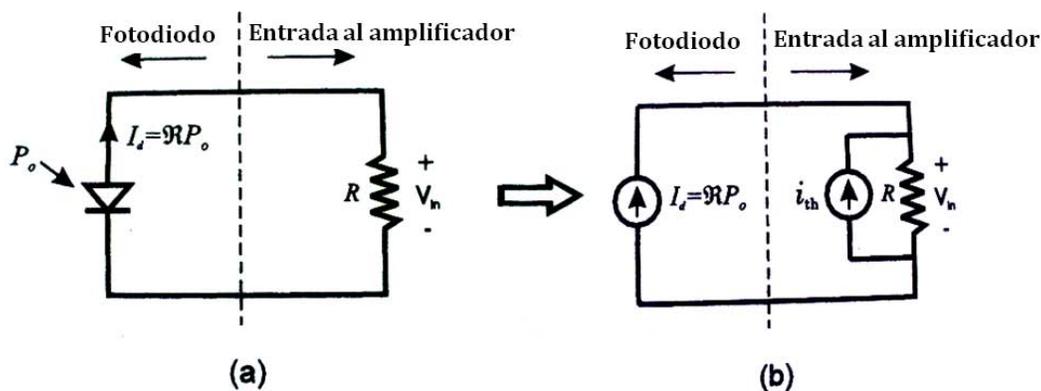


Figura A.1 (a) Ilustración simplificada de un fotodiodo conectado a un amplificador eléctrico. (b) Circuito equivalente modelando la salida del fotodiodo y el ruido térmico resistivo utilizando una fuente de corriente ideal

A1. Ruido Eléctrico - Térmico

Una fuente común de ruido, que es necesario considerar en casi todo el proceso de detección es el ruido térmico generado en el receptor electrónico. Si el proceso de amplificación es considerado ideal, es decir, no genera ruido excesivo, el ruido

recibido resultante será determinado por el ruido térmico generado por la primera resistencia encontrada por la fotocorriente. Conforme la resistencia incrementa la sensibilidad óptica mejora.

El ruido térmico de una resistencia puede ser modelado y generado por una fuente de corriente o voltaje. Como la señal del fotodiodo parece como si fuera generada por una fuente de corriente, es más conveniente usar el modelo de corriente de ruido para describir el ruido térmico. Esto permite comparar directamente la corriente de ruido con la fotocorriente generada.

La figura A.1 muestra la configuración básica para generar una señal de voltaje usando un fotodiodo y una resistencia externa. La figura A.1b es un circuito equivalente simplificado el cual usa fuentes de corriente para modelar el fotodiodo y el ruido térmico generado por la resistencia. Por simplicidad, el circuito equivalente ha sido omitido, pero necesitaría ser incluido para determinar el ruido efectivo en el circuito. Como es mostrado en la figura A.1b, La corriente de ruido térmico i_{th} generado en un ancho de banda de 1 [Hz] está dado por:

$$\hat{i}_{th} = \sqrt{\frac{4kT}{R}} \quad [A/\sqrt{Hz}] \quad A.1$$

Donde

k = constante de Boltzmann 1.38×10^{-23} [J/K]

T = Temperatura absoluta en grados Kelvin

B = Ancho de Banda en detectado en el receptor.

R = Es la resistencia que la fotocorriente experimenta

El símbolo de corriente rms ($\hat{}$) mostrado arriba, es usado para indicar que la corriente de ruido está normalizada a un ancho de banda de 1 [Hz]. Esta Expresión normalizada es usada cuando comparan la magnitud del ruido térmico con otras fuentes de ruido en el sistema. La corriente de ruido total rms (i_{th}) es obtenida multiplicando A.1 por la raíz cuadrada del ancho de banda del receptor.

$$i_{th} = \hat{i}_{th} \sqrt{\Delta f} \quad [A] \tag{A.2}$$

Como se ve en la ecuación A.1, el ruido de corriente térmico es reducido al incrementar la resistencia. Este es un resultado opuesto si consideramos circuitos electrónicos basados en voltajes. Aunque una resistencia grande reduce el ruido en el receptor, el valor usado está comprometido entre la sensibilidad y el ancho de banda del receptor.

En la práctica, el ruido actual a la salida del amplificador será mucho mayor debido al ruido excesivo agregado en el proceso de amplificación. Sin embargo, la ecuación A.1 sigue siendo útil y pronostica el mejor desempeño posible a una impedancia específica receptora.

A.2 Ruido de disparo (shot noise)

El ruido de disparo eléctrico ocurre por el tiempo de llegada aleatorio de los electrones que provoca una corriente eléctrica. Usualmente se convierte en una importante fuente de ruido cuando se trata de medir una señal pequeña en la presencia de una señal de fondo DC. Este caso normalmente ocurre en esquemas de detección coherente, donde una pequeña corriente de AC está siendo medida en la presencia de un largo fondo debido a la corriente de DC del oscilador local. La corriente en rms de shot-noise en 1 [Hz] de ancho de banda esta dado por:

$$\hat{i}_{sn} = \sqrt{2qI_{dc}} \quad [A/\sqrt{Hz}] \tag{A.3}$$

Donde

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ [C] (carga del electrón)

I_{dc} = Fotocorriente de oscuridad (*dark current*)

Sin filtración de frecuencia, el ruido de disparo es espectralmente plano y por lo tanto tiene el mismo valor en cada medición de frecuencia. Para calcular la corriente total rms del ruido de disparo (i_{sn}) de un circuito eléctrico con un ancho de banda efectivo (Δf), la ecuación A.3 debe ser multiplicada por la raíz cuadrada del ancho de banda.

$$i_{sn} = \hat{i}_{sn} \sqrt{\Delta f} \quad [A]$$

Una observación interesante se puede hacer cuando se compara el ruido de disparo con el ruido térmico, Como el nivel del ruido de disparo depende de la corriente de la señal, habrá un punto que incrementando la corriente DC el valor del ruido de disparo excederá el ruido térmico. Ese punto ocurre cuando el voltaje que atraviesa la resistencia llega ser mayor a 52 mV. Este nivel de voltaje es independiente del valor de la resistencia y es utilizado ampliamente en la práctica como un fácil método para determinar cual de los dos tipos de ruido es dominante. Si el proceso de amplificación genera ruido en exceso, el valor de 52 mV necesita ser incrementado adecuadamente. Otro punto importante que mencionar es el especial significado que tiene el límite de ruido de disparo en un proceso de detección coherente. En este régimen, el receptor tiene sensibilidad óptima con una potencia equivalente de ruido igual a un solo fotón por tiempo de integración en el receptor.

APÉNDICE B.

Especificaciones Amplificador Operacional LF356



LF155-LF255-LF355
LF156-LF256-LF356
LF157-LF257-LF357

WIDE BANDWIDTH
SINGLE J-FET OPERATIONAL AMPLIFIERS

- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- HIGH SPEED J-FET OP-AMPS : up to 20MHz, 50V/μs
- OFFSET VOLTAGE ADJUSTMENT DOES NOT DEGRADE DRIFT OR COMMON-MODE REJECTION AS IN MOST OF MONOLITHIC AMPLIFIERS
- INTERNAL COMPENSATION AND LARGE DIFFERENTIAL INPUT VOLTAGE CAPABILITY (UP TO V_{CC^+})

TYPICAL APPLICATIONS

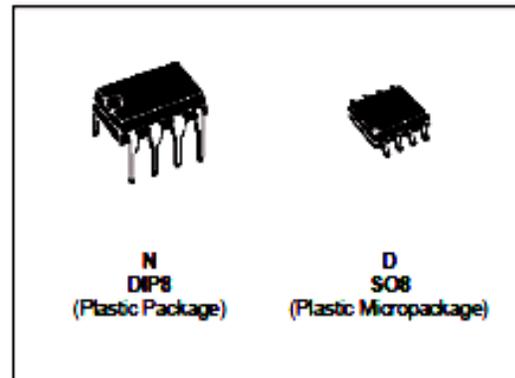
- PRECISION HIGH SPEED INTEGRATORS
- FAST D/A AND CONVERTERS
- HIGH IMPEDANCE BUFFERS
- WIDEBAND, LOW NOISE, LOW DRIFT AMPLIFIERS
- LOGARITHMIC AMPLIFIERS
- PHOTOCELL AMPLIFIERS
- SAMPLE AND HOLD CIRCUITS

DESCRIPTION

These circuits are monolithic J-FET input operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET on the same chip with standard bipolar transistors.

This amplifiers feature low input bias and offset currents, low input offset voltage and input offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection.

The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low 1/f noise level.

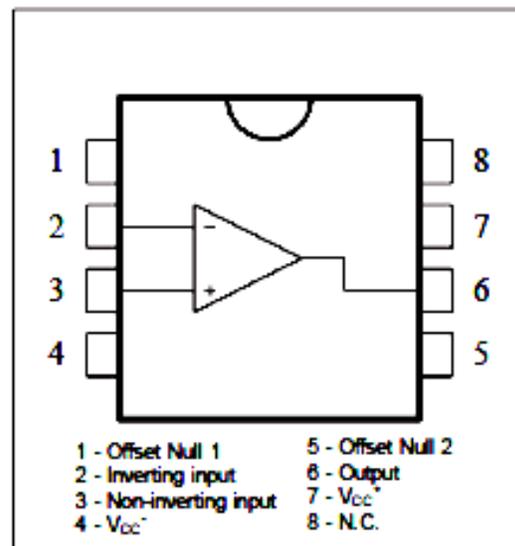


ORDER CODES

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF355, LF356, LF357	0°C, +70°C	•	•
LF255, LF256, LF257	-40°C, +105°C	•	•
LF155, LF156, LF157	-55°C, +125°C	•	•

Example : LF355N

PIN CONNECTIONS (top view)



APÉNDICE C.

Coeficiente de Absorción Vs Energía de Fotón y Longitud de Onda para Ge, Si, GaAs, GaN y otros semiconductores a T=300° K

