



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

Las fibras ópticas como testigo de daño estructural  
con aplicaciones potenciales en el monitoreo del  
antiguo templo de san Agustín

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero en telecomunicaciones

P R E S E N T A

David Antonio Hernández Reyes

DIRECTOR DE TESIS  
Dr. Sergiy Khotyaintsev



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



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, Don Antonio y Doña Ma. Santos, a mis hermanos Luigi y Wyatt, por el infinito amor y apoyo, me dieron la oportunidad de completar mis estudios de licenciatura, por eso y tanto más, gracias.*

*A mi tutor el Dr. Sergiy Khotyaintsev, gracias por la paciencia, el apoyo y dedicación en el desarrollo de esta tesis.*

*A mis amigos de la facultad: Tania, Fernanda, Mitzi, Mafer, Irving, Emiliano, Erick y Chris, estos años en licenciatura no hubieran tan buenos sin ustedes.*

*A mis compañeros del laboratorio: Juan y Arachelis, gracias por sus asesorías.*

*A la DGAPA – PAPIIT de la UNAM por el apoyo en forma del proyecto “Sistema de fibra óptica para monitoreo estructural de edificios históricos: “Desarrollo e implementación de un prototipo en el antiguo Templo San Agustín” con número de referencia IT101618.*

## Resumen

Se presentan los resultados teóricos y experimentales de estudio de propiedades de algunos tipos de las fibras ópticas, dicho estudio se realizó para entender, qué tan adecuados son distintas fibras ópticas para servir como indicadores o “testigos” de daño estructural en forma de fisuras y grietas en diversos elementos de edificaciones. La finalidad de dichos estudios es la elaboración de una base científica y tecnológica para la implementación de un sistema de monitoreo estructural para el Antiguo Templo San Agustín en la Ciudad de México que pertenece a la UNAM.

Se obtuvieron datos sobre la fuerza de rotura de las fibras ópticas multimodo y monomodo de sílice y de recubrimiento de Tefzel (Teflón) y acrílico (PMMA) bajo la fuerza progresiva de tracción, así como sobre el ancho de la grieta en la mampostería de tabique a la cual la fibra óptica adherida con algunos pagamentos a la superficie de ladrillos se rompe. Se obtuvo que tanto la fuerza de rotura como dicho ancho de la grieta son cantidades probabilísticas, y se elaboró las distribuciones de respectivas probabilidades aplicando un análisis estadístico.

Además, se evaluó algunas características clave de equipo transmisor y receptor óptico electrónico del sistema de monitoreo de señales en fibras ópticas testigos de daño estructural. Se evaluó el ancho de banda sistema de monitoreo, la ganancia y distorsión de la señal piloto en su conversión de dominio eléctrico a óptico en el transmisor, y la ganancia y distorsión de la señal en el receptor en la conversión de la señal de dominio óptico a eléctrico. Algunos resultados de este trabajo tendrán utilidad en la implementación práctica de sistemas de fibra óptica de monitoreo de elementos estructurales de edificaciones.

## Abstract

The theoretical and experimental results of the study of properties of some types of optical fibers are presented. This study was carried out to understand how different optical fibers are suitable to serve as indicators or "witnesses" of structural damage in the form of fissures and cracks in various elements of buildings. The purpose of these studies is the elaboration of a scientific and technological base for the implementation of the respective structural monitoring system of the Old San Agustín Temple in Mexico City that belongs to the UNAM.

Data were obtained on the breaking strength of the multimode and single-mode optical fibers of silica and Tefzel (Teflon) and acrylic (PMMA) coating under the progressive traction force, as well as on the width of the crack in the septum masonry to which the fiber optic adhered with some payments to the brick surface breaks. It was obtained that both the breaking force and said crack width are probabilistic quantities, and the distributions of respective probabilities were elaborated applying statistical analysis.

In addition, some key characteristics of the electronic optical transmitter and receiver equipment of the signal monitoring system in optical fibers witnessing structural damage were evaluated. The monitoring system bandwidth, the gain and distortion of the pilot signal in its conversion from electrical to optical domain in the transmitter, and the gain and distortion of the signal in the receiver in the conversion of the optical domain signal to electric were evaluated. Some results of this work will be useful in the practical implementation of fiber optic systems for monitoring structural elements of buildings.

# Contenido

Agradecimientos .....	I
Resumen.....	II
Abstract.....	III
Contenido .....	ii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivo general.....	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Metas .....	5
1.5 Metodología.....	5
Capítulo 2. La fibra óptica en las telecomunicaciones e instrumentación. Revisión del estado del arte .....	6
2.1 Funcionamiento de la fibra óptica.....	6
2.1.1 La fibra óptica en las telecomunicaciones .....	10
2.2 La fibra óptica como sensor.....	11
2.3 Monitoreo de estructuras (antecedentes del presente proyecto de tesis).....	13
2.4 Comportamiento de los materiales.....	14
2.4.1 Sílice.....	17
2.4.2 Sílice dopada.....	18
2.4.3 Acrílico (PPMA) .....	18
2.4.4 Teflón (TEF).....	19
2.4.5 Silicona .....	19
2.4.6 Poliamida (nylon).....	20
2.5 Probabilidad de rotura de una fibra óptica: Modelo de Weibull.....	20
2.6 Estándares de sensores basados en fibra óptica.....	21
2.7 Conclusiones del capítulo .....	22
Capítulo 3. Planteamiento del experimento.....	23
3.1 Objetivo del experimento .....	23
3.2 Metodología de estudios experimentales.....	23

---

## Contenido

3.2.1 Estudio de la fuerza de rotura y desplazamiento de fibra óptica adherida a ladrillos .....	23
3.2.2 Instalación de tracción de fibra adherida a ladrillos.....	24
3.2.3 Estudio de la fuerza de rotura de las fibras ópticas en el modo de tracción directa .....	26
3.2.4 Descripción de instalación de tracción en modo directo.....	27
3.2.5 Verificación de la metodología de trabajo experimental.....	28
3.3 Elección de dinamómetros .....	30
3.3.1 Comparación de respuesta a la carga entre dinamómetros empleados .....	31
3.4 Estimación de fuerza máxima soportada por la fibra óptica .....	34
3.4.1 Estimación de fuerza de rotura para la fibra óptica FG200LEA .....	36
3.4.2 Estimación de fuerza de rotura para la fibra FG105LCA .....	37
3.4.3 Estimación de fuerza de rotura para la fibra AFS 50/125Y.....	39
3.4.4 Estimación de fuerza de rotura para la fibra SMF28.....	40
3.5 Conclusiones del capítulo .....	41
Capítulo 4. Sistema de monitoreo.....	42
4.1 Transmisor óptico del sistema de monitoreo .....	42
4.2 Receptor del sistema de monitoreo.....	45
4.3 Conclusiones del capítulo .....	49
Capítulo 5. Resultados .....	50
5.1 Estudio fuerza de rotura de la fibra óptica en modo directo.....	50
5.1.1 Ensayo #1: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica FG105LCA .....	50
5.1.2 Ensayo #2: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica FG200LEA .....	52
5.1.3 Ensayo #3: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica AFS 50/125Y .....	55
5.1.4 Ensayo #4: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica SMF 28 .....	56
5.2 Resultados del experimento de fuerza de rotura de la fibra óptica adherida a ladrillo por medio de ensayos de tracción.....	59
5.2.1 Ensayo #5.....	59
5.2.2 Ensayo #6.....	60
5.2.3 Ensayo #7.....	62
5.2.4 Ensayo #8.....	63

---

## Contenido

5.2.5 Ensayo #9.....	64
5.2.6 Ensayo #10.....	65
5.3 Pruebas en sistema electrónico .....	65
5.3.1 Parámetros de operación de elementos clave del transmisor.....	65
5.3.2 Respuesta en frecuencia del receptor .....	68
5.4 Conclusiones del capítulo .....	75
Capítulo 6. Conclusiones generales .....	77
Referencias.....	79
Anexos.....	82
Anexo A. Artículo [1]: Journal of Optical Technology (OSA, Optical Society of America), 1 February 2020, Volume 87, Issue 2, pp. xx-yy (in print).....	82
Anexo B. Especificaciones de fibra óptica SMF28.....	93
Anexo C: Especificaciones de fibra óptica FG105LCA/FG200LEA.....	94
Anexo D. Especificaciones de fibra óptica AFS50/125Y .....	96
Anexo E. Especificaciones LED's utilizados en parte electrónica.....	97
Anexo F. Especificaciones de transistor .....	98
Anexo G. Especificaciones de foto receptor PDA100A .....	100
Anexo H Resultados de fibra óptica adherida a ladrillos .....	102
Anexo I. Respuesta a la frecuencia del receptor.....	106

# Capítulo 1. Introducción

En la presente tesis se analizan las propiedades de la fibra óptica como testigo de grietas en elementos estructurales de edificaciones, así como las características del equipo transmisor y receptor óptico electrónico del respectivo sistema de monitoreo de daño estructural en edificaciones. La finalidad de dichos estudios es la elaboración de una base científica y tecnológica para la implementación de un sistema de fibra óptica de monitoreo estructural del Antiguo Templo San Agustín en la Ciudad de México que pertenece a la UNAM, en el marco del Proyecto de innovación tecnológica patrocinado por la DGAPA-PAPIIT de la UNAM con número de referencia IT101618.

Se investigan y se caracteriza la fuerza de rotura de las fibras ópticas de diversos calibres de sílice con recubrimiento de acrílico y otros plásticos, así como su uso como testigos de daño estructural en forma de grietas al estar adheridas a superficies de las estructuras por medio de diversos pegamentos. En la parte del sistema de monitoreo, se analizan características de los módulos de transmisión y recepción de la señal óptica.

Algunos resultados obtenidos en esta tesis se han publicado en forma de un artículo de investigación científica en la revista internacional Journal of Optical Technology de la Optical Society of America (OSA) en febrero de 2020 [1].

## 1.1 Antecedentes

En México se tienen diversos factores que son peligrosos para las estructuras en las cuales nos desenvolvemos, ya sea desde oficinas, casas o incluso recintos con valor histórico.

Diversas instituciones han desarrollado nuevas técnicas debido a la necesidad de detectar fallas en las estructuras de manera temprana para contrarrestar los daños presentados en estas o en caso de un sismo estar monitoreando exteriormente las

estructuras sin tener que exponer a personas para llevar a cabo la evaluación post sismo de la estructura.

Es difícil conocer el daño que pudiesen presentar las estructuras ya sea por el paso del tiempo y las condiciones de donde se encuentra. Por otra parte, el daño que pudiese tenerse en caso de un evento sísmico en dónde en ocasiones el daño es intrínseco y no se ve en la parte exterior de la edificación.

Tal es el caso del antiguo templo de San Agustín que data del año 1587, el cual es patrimonio de la UNAM desde 1929, y ha sido sede de la biblioteca nacional desde 1884, y por el mismo paso del tiempo aunado a la zona en que se encuentra (Valle de México) han influido en el deterioro de la estructura, con lo cual es de gran importancia el estar monitoreando el templo para prevenir mayores daños y corregir algunos otros, ya que en un futuro se planea su utilización como museo.

En todo caso los sensores que se habían utilizado para detectar estos problemas son caros y en ocasiones no reflejan el estado real de la estructura. En el caso de la fibra óptica como testigo de agrietamiento en las estructuras, tiene ventajas considerables en comparación con los utilizados que son dispositivos mecánicos, electromecánicos o electrónicos.

Debido a las características de la fibra óptica se ha optado por utilizarla como sensor en disciplinas varias, una de estas es SMH, por sus siglas en inglés, Monitoreo de Salud Estructural. Algunas de las características que hacen a la fibra un buen sensor son las siguientes [2]:

- Inmunidad electromagnética
- Pérdidas de transmisión bajas y gran ancho de banda
- Bajo costo y fácil acceso
- Peso ligero
- Facilidad de expansión de red

## Capítulo 1. Introducción

Aunado a esto, las fibras ópticas han ido evolucionando teniendo diversos materiales para su manufactura. Así mismo se han desarrollado nuevas fibras para aumentar el tráfico de datos en las redes. Con estos desarrollos también se ha beneficiado el ámbito de instrumentación.

La naturaleza de los sensores fotónicos y ópticos parte de modificaciones o modulaciones a algunas características de la luz en un elemento (transductor) óptico bajo el efecto de un factor físico (temperatura, presión, composición química, etc.). Dando como resultado una señal eléctrica y de esta se pueden obtener (factores físicos) de relevancia [2].

En algunos trabajos anteriores realizados en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como en algunos trabajos de autores extranjeros se describe una nueva técnica para la detección de daños estructurales en elementos críticos de edificaciones (tales como vigas y columnas) con arreglos de fibras ópticas multi-modo comunes incorporados al interior de estos elementos, o pegados a su superficie [3]. La técnica está dirigida a la detección de daños en edificios y otras estructuras causados por eventos catastróficos, como explosiones, incendios, terremotos, etc.; Sin embargo, dicha técnica se encuentra en una etapa temprana de su desarrollo por lo cual se requiere de una investigación profunda y detallada de varios aspectos de su implementación práctica.

## 1.2 Objetivo general

Realizar un estudio comparativo de algunos tipos de fibras ópticas de sílice en su aplicación como testigos de grietas de mampostería de ladrillo. Establecer una relación cuantitativa entre el diámetro de la fibra óptica, el material del recubrimiento y el pegamento para adherir a los ladrillos, aunado a la fuerza de rotura que tiene la fibra óptica y la abertura de una grieta en la mampostería de tabique con la cual la fibra óptica se rompe. Evaluar las características principales del equipo transmisor y receptor óptico destinado al monitoreo de la transmisión óptica de las fibras como testigo de grietas en elementos estructurales.

## 1.3 Objetivos específicos

1. Obtener datos experimentales sobre la fuerza de rotura de diversas fibras ópticas en función de su diámetro y materiales de constitución de la fibra.
2. Obtener datos experimentales sobre el comportamiento mecánico y adherencia de la fibra óptica a la superficie de ladrillo utilizando distintos pegamentos.
3. Identificar los factores y condiciones que puedan limitar el uso de la fibra óptica como testigo de daño estructural.
4. Analizar experimentalmente el funcionamiento del equipo transmisor y receptor óptico destinado al monitoreo de las fibras ópticas testigos de grietas en elementos estructurales. Obtener experimentalmente la respuesta a la frecuencia del receptor óptico y de los amplificadores electrónicos utilizados en la parte post recepción.

## 1.4 Metas

1. Realizar una investigación sobre el estado del arte de la fibra óptica como sensor de monitoreo de estructuras, con enfoque en dispositivos de fibra adheridos a superficies con diversos pegamentos para su anclaje.
2. Realizar el diseño y la implementación de instalaciones para experimentos con fibras ópticas de diversos calibres y materiales, aunado a la parte electrónica y realizar pruebas de algunos componentes claves del sistema de monitoreo.
3. Aplicar un análisis estadístico de los datos obtenidos en los experimentos y compararlos con los resultados teóricos.
4. Obtener experimentalmente el ancho de banda de los sistemas electrónicos de transmisión y recepción.

## 1.5 Metodología

La presente tesis se desarrollará mediante el uso de métodos teóricos y experimentales.

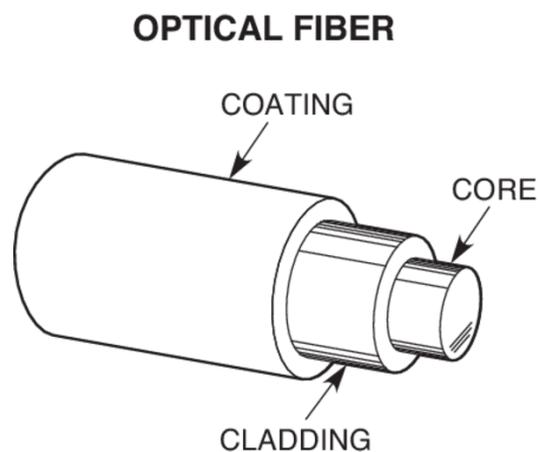
En la parte teórica se emplearán ecuaciones de relación de esfuerzo-deformación para materiales frágiles de uso en ingeniería. Además, se usará los fundamentos teóricos de diseño de transmisores y receptores para la parte electrónica del sistema de monitoreo.

En la parte experimental, se diseñarán y se fabricarán las respectivas instalaciones y se realizarán experimentos para comprobar la fuerza de rotura en fibras ópticas de diversos calibres, así como para comprobar el funcionamiento de fibras acopladas a la parte transmisora y receptora del sistema de monitoreo.

## Capítulo 2. La fibra óptica en las telecomunicaciones e instrumentación. Revisión del estado del arte

### 2.1 Funcionamiento de la fibra óptica.

La fibra óptica es una guía de onda circular, principalmente tiene dos capas en donde se da la transmisión de la señal y una tercera para añadir resistencia mecánica y química. Las primeras dos capas generalmente están hechas de dióxido de silicio también llamado Sílice y la tercera capa es de algún material diferente, puede ser acrílico, tefzel, o nylon (Figura 2.1) [4].



*Figura 2.1 Vista de las 3 capas principales existentes en la fibra óptica [5]*

El fenómeno por el cual una onda electromagnética en forma de luz se propaga, es debido al fenómeno de reflexión total interna.

Este fenómeno tiene como representación matemática la ley de Snell, que es una relación entre una onda incidente con un ángulo de inclinación a una interfaz plana de dos medios ópticos diferentes, y una onda refractada. La ley de Snell da como resultado la dirección en la que onda refractada se propaga en el otro medio. El

Capítulo 2. La fibra óptica en las telecomunicaciones e instrumentación. Revisión del estado del arte

cambio entre las direcciones de incidencia y de la onda refractada es debido al cambio en el índice de refracción de un medio a otro.

La ecuación (1) describe la ley de Snell:

$$n_1 \text{Sen } \theta_1 = n_2 \text{Sen } \theta_2 \quad (1)$$

Donde  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento y  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica, el índice de refracción del núcleo debe ser mayor al índice de refracción del revestimiento:  $n_1 > n_2$  [4].

Y para el fenómeno de reflexión total interna se debe de considerar un ángulo crítico descrito por la ecuación (2). Para ángulos incidentes mayores al ángulo crítico se va a tener una reflexión interna y una casi nula refracción de la señal. Debido a la reflexión total interna existe el efecto de propagación en la fibra óptica.

$$\Theta_c = \text{angsin}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

Así mismo, la fibra óptica tiene algunas otras características como lo son el tipo de índice que tiene, la apertura numérica y el número de modos que se pueden propagar en la fibra. Los cuáles serán tocados en los siguientes párrafos.

La apertura numérica representa la capacidad que tiene la fibra para que, entre luz en esta, es un parámetro adimensional que está definido por:

$$\text{A.N.} = n_1 \cdot \sqrt{(2\Delta)} \quad (3)$$

Dónde  $\Delta$  es la diferencia en los valores de índice de refracción del núcleo y del revestimiento, siendo  $n_1$  el índice de refracción del núcleo y  $n_2$  el índice de refracción del revestimiento.

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (4)$$

Por otra parte, la fibra óptica puede presentarse de dos maneras: como fibra multimodo o fibra mono-modo, esto haciendo referencia al número de modos de propagación que se pueden dar a lo largo de la fibra.

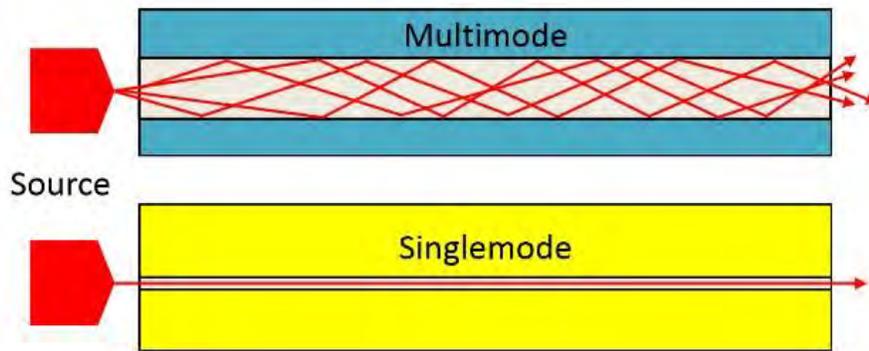


Figura 2.2 Modo de transmisión en la fibra óptica [6]

Estos modos de transmisión son dados a partir de la solución de las Ecuaciones Maxwell en coordenadas cilíndricas, llamada frecuencia normalizada, la cual es un parámetro que ayuda a generalizar y comparar la propagación de modos en fibras de diversos diámetros.

Está definido por la siguiente expresión.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a(A.N) \quad (5)$$

Donde:

$a$  es el radio del núcleo de la fibra

**A.N.** es la apertura numérica de la fibra

$\lambda$  es la longitud de onda a transmitir

Con base en esta ecuación se puede definir si una fibra es mono modo o multi-modo y además calcular el número de modos que se puede propagar dentro de esta, siendo el modo  $HE_{11}$  el modo fundamental de propagación en la fibra óptica [7].

Para conocer si una fibra es mono modo o multi-modo se realiza el cálculo y si

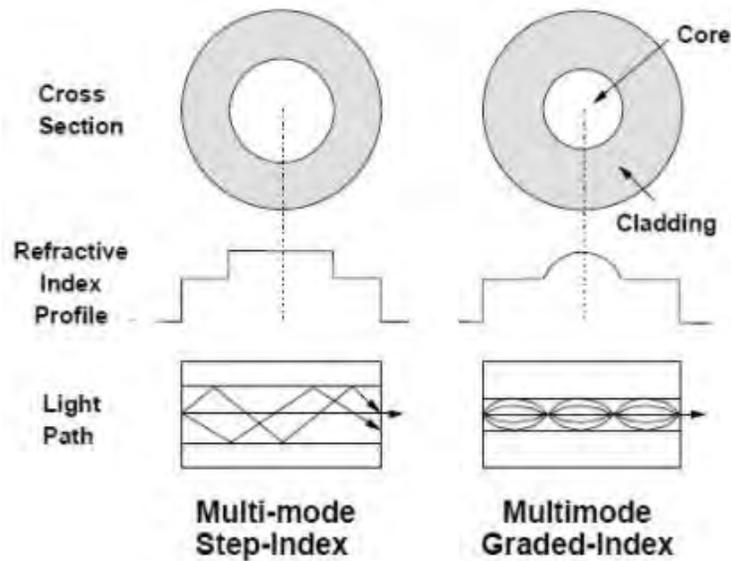
- $V < 2.405$  entonces se tiene una fibra mono modo
- $V > 2.405$  se tiene una fibra multi-modo

Para conocer el número de modos propagados  $M$  en la fibra se utiliza la siguiente expresión:

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (6)$$

Las fibras ópticas, al ser una guía de onda cilíndrica y tener dos capas principales que propician la propagación de la onda electromagnética, son diferenciadas debido al cambio que se tiene entre una capa y otra, si se da un cambio abrupto entre las capas se le llama fibra de índice escalonado, mientras que si el cambio es de forma gradual va disminuyendo del centro del núcleo a las orillas con la capa del revestimiento se le llama fibra de índice graduado.

En la figura 2.3 se encuentra la representación gráfica de estas fibras, por otra parte, debido a esta misma geometría, el número de modos que se propagan por la fibra está condicionado por el tipo de índice que se tiene, siendo que la fibra mono modo es únicamente de índice escalonado, mientras que la fibra multi-modo puede ser de ambos índices [4].



*Figura 2.3 Representación de índices en la fibra óptica [8]*

### 2.1.1 La fibra óptica en las telecomunicaciones

Las comunicaciones han sido parte fundamental de la vida cotidiana en la sociedad, desde sus inicios dieron un cambio en la forma de mantenerse en contacto con diversos sitios o personas, empezando con el telégrafo y llegando hasta las comunicaciones inalámbricas. Se ha tenido un auge en el nivel de innovación. Desgraciadamente a pesar del esfuerzo por tener mejores y mayores conexiones por medios inalámbricos no se ha conseguido un gran alcance.

La fibra óptica ha llegado a ser importante en el desarrollo de las industrias, pues absolutamente todos necesitan de un medio confiable para poder transportar

grandes cantidades de datos a una velocidad alta, esto debido a la densidad de información que se crea a cada momento y que en años siguientes será aún mayor. Así pues, la fibra óptica se ha convertido en el medio de transporte de comunicación masivo de la sociedad, teniendo en enlaces submarinos velocidades de Tbps, los cuales siguen creciendo y ampliando la red y las comunicaciones mundiales [9].

En últimos años se han realizado investigaciones que están a la vanguardia en la tecnología de fibra óptica, mostrando que se han alcanzado velocidades de 661 Tbps con por medio de la multiplexación por división de onda (WDM) en 2018 [10], y así mismo incrementando estas velocidades debido a la afluencia de datos en las redes.

Sin duda alguna, la fibra óptica es y seguirá siendo un elemento importante para las comunicaciones del siglo XXI, así también se tendrá que seguir realizando nuevos estudios y experimentos para alcanzar velocidades aún mayores y al igual que desarrollar mejores técnicas de multiplexación para mejorar la eficiencia del ancho del canal que se encuentra dentro de las fibras y satisfacer la necesidad de un canal de transporte robusto que pueda manejar la masiva cantidad de información que surge a cada momento con grandes velocidades.

## 2.2 La fibra óptica como sensor

La fibra óptica tuvo en un principio aplicaciones en el ámbito de sistemas de comunicaciones. Además, debido a su gran desarrollo en las últimas décadas se ha utilizado como sensor en diversas áreas de la ingeniería.

De las áreas más destacadas se encuentra la ingeniería civil en la que, en estudios realizados en los últimos 30 años, el uso de sensores basados en fibra óptica ha sido abrumador, es debido a las propiedades de la fibra y el tipo de uso que puede tener.

Investigadores [3] han utilizaron fibra óptica para detectar daño en materiales compuestos, esto gracias a que las fibras ópticas fueron embebidas en el material.

En este estudio, se realizaron pruebas de dobléz de tres puntos en una máquina de prueba servo hidráulica Instron 4505, a una velocidad de desplazamiento de la cruceta de 1 mm / min para muestras simples de GF / PP (polipropileno reforzado con fibra de vidrio) y 10 mm / min para la fibra muestras de laminado de metal. Teniendo como resultado en sus tablas el desplazamiento requerido para romper la fibra y las fibras reforzadas o el laminado de metal en el material compuesto [11].

Existen reseñas [11] que hablan acerca de los dispositivos en general para realizar el monitoreo de salud estructural principalmente de rejilla de Bragg. En las partes más importantes de dicho trabajo se mencionan los tipos de recubrimiento y cómo estos pueden influir en las mediciones, debido a que tienen diferentes capacidades mecánicas.

Además, en [11] se realizan comparaciones entre el recubrimiento de acrílico blando y el de tefzel con silicón, siendo este último el de mejor funcionamiento para fibras embebidas en concreto debido a su sensibilidad a los esfuerzos. Además, hicieron pruebas con otros 3 recubrimientos, acrílico, poliamida y silicón, esto sometiéndolos a soluciones alcalinas y así ver su respuesta mecánica en ambientes embebidos en concreto. Después de 21 días sacaron las fibras y vieron que la poliamida no fue buena para estas prácticas, en cambio, el acrílico fue el que mejor resistencia tuvo a estos ambientes.

En este mismo trabajo [11] se habla de cómo es que las fibras que no son embebidas, pero utilizadas en las aplicaciones de monitoreo de salud estructural, se unen a las estructuras con diversos fines, en donde se utilizan pegamento epóxico para su adhesión a muros o lugares de interés.

En diversas publicaciones [12] [11] se habla de la importancia de las rejillas de Bragg como sensor de salud estructural y aeroespacial debido a la gran flexibilidad

y sensibilidad como sensor, al ser capaz de medir factores como esfuerzo y temperatura por medio de filtros ajustables, como lo son las cavidades resonantes o mediante espectroscopia.

Con lo cual surgen dudas acerca del tipo de recubrimiento de las fibras pegadas a las superficies y sometidas a otro tipo de cargas, no solo de manera vertical, si no de manera horizontal dando paso a grietas.

### 2.3 Monitoreo de estructuras (antecedentes del presente proyecto de tesis)

En los últimos años ha tomado más auge este tipo de monitoreo debido a la aparición de situaciones diversas que involucran la salud estructural tanto en edificios históricos como en viviendas. En caso de México, los sismos que sucedieron en el año 2017 resaltaron la importancia de conocer el estado de las edificaciones y así evitar tragedias como las que pasaron en ese entonces, daños estructurales, caídas de edificios, etc.

En el laboratorio de óptica del posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a cargo del Dr. Sergiy Khotyaintsev se ha trabajado en este proyecto hace varios años, siendo un proyecto que está enfocado en el monitoreo de edificaciones arquitectónicas históricas que son patrimonio de la UNAM y que al ser de gran antigüedad sufren ciertas circunstancias que las deterioran.

En investigaciones realizadas por el grupo de trabajo del Doctor, se han implementado redes de fibras para conocer su comportamiento y se han estudiado estas para obtener nuevos datos sobre las fibras que pueden tener mayor éxito como sensores.

En un trabajo hecho en 2019 [13] se realizaron estudios sobre las aperturas de las grietas a las cuales están propensas las fibras al estar pegadas en la superficie de

una estructura, dando como resultados el ancho de la grieta y la fuerza que pueden soportar. En este mismo trabajo sometieron a pruebas diversos calibres de fibra y 2 tipos de pegamento con el objetivo de obtener el mejor desempeño en las pruebas.

En 2018 [14] y 2014 [15], realizaron estudios de supervivencia de fibra de diversos calibres tanto embebidos como pegados a la superficie de elementos estructurales. Además, emplearon un sistema TDM de 16 canales mediante fibra óptica con el objetivo de monitorear los elementos estructurales en tiempo real. En el caso de la fibra se tuvo una supervivencia de un 50 % al 100% esto atribuido al calibre de la fibra y proceso de fabricación de las mismas.

Anteriormente (2014) [16] se habían hecho investigaciones en el laboratorio acerca de sensores basados en tecnología de fibra óptica, como lo son las rejillas de Bragg, donde observaron y comprobaron el comportamiento lineal de las rejillas en función de la tensión, obteniendo la respuesta con el espectro de frecuencia que da la rejilla y comprobaron la utilidad de esta como un instrumento de monitoreo de estructuras.

## 2.4 Comportamiento de los materiales

Los materiales que típicamente son utilizados en industria de telecomunicaciones son materiales como dieléctricos y/o polímeros, lo cuales tienen diversas características que los hacen atractivos para fabricar guías de onda como lo son las fibras ópticas.

La resistencia de estos materiales es representada en curvas de esfuerzo-deformación, las cuales dan el comportamiento de un material sometido a algún tipo de esfuerzo, estas curvas se obtienen de manera experimental por medio de máquinas de ensayos universales [17].

Capítulo 2. La fibra óptica en las telecomunicaciones e instrumentación. Revisión del estado del arte

En las máquinas de ensayos universales se utilizan probetas que son adecuadas para la manipulación de los materiales por la máquina, teniendo gran funcionalidad, pero siendo máquinas costosas.



*Figura 2.4 universal CMT-50 Control de computadora máquina universal de ensayos  
Electrónica/Universal tracción compresión máquina de prueba*

Las gráficas que dan estas máquinas, representan el comportamiento de los materiales al estar sometidos a variaciones de fuerza. Dentro de estas figuras se encuentra dos regiones que son de importancia para conocer el material utilizado. El modelo de la figura 2.4 tiene un valor aproximado de 20,000 usd [18].

Una región elástica (zona azul de la figura 2.5), en donde el material sufre de una deformación a causa del esfuerzo aplicado sobre este, no es permanente por lo cual, al dejar de tener este esfuerzo aplicado, el material vuelve a tener la forma inicial. Cabe decir que esta parte de la gráfica tiene usualmente un comportamiento lineal.

Región Plástica (zona verde de la figura 2.5), en donde se tiene una deformación permanente causada por el adelgazamiento del material en una sección de este en donde se concentra la fuerza, el comportamiento en esta zona es no lineal.

Después de pasar esta región elástica (zona roja en figura 2.5), se presenta la rotura del material.



*Figura 2.5 Representación gráfica de curva de esfuerzo-deformación [19]*

En general, los materiales utilizados en la fibra óptica son, mayormente, materiales frágiles en el núcleo y el revestimiento, lo cual en la curva de esfuerzo deformación se tiene una cierta región elástica y una casi nula región plástica, haciendo así que la fibra se corte de tajo y no poco a poco como suele pasar con los plásticos y demás materiales, además, cabe decir que estos materiales son afectados tanto por presiones y por temperaturas y así mismo cambian sus características físicas (figura 2.6 en gráfica d).

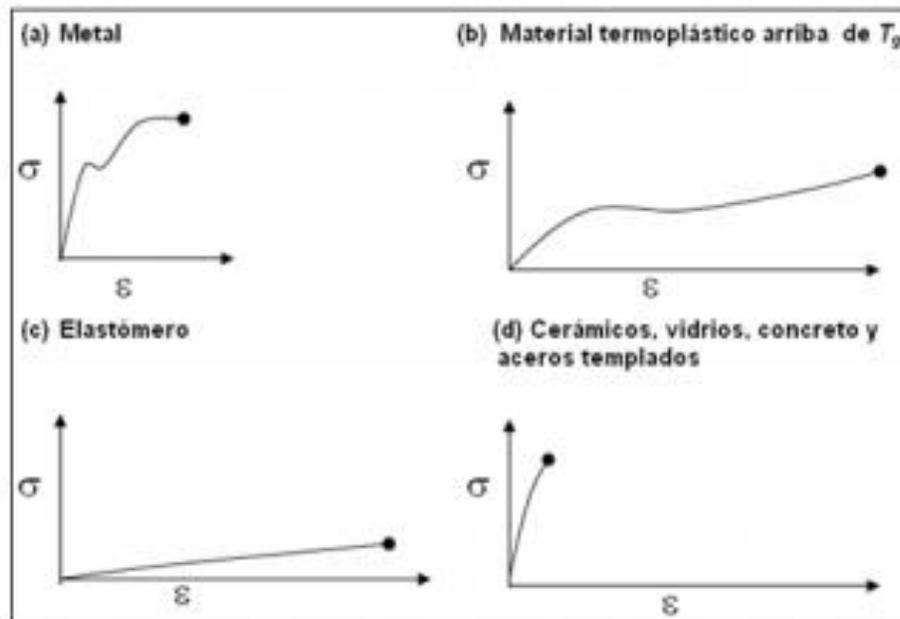


Figura 2.6 Curvas de esfuerzo-deformación de diversos materiales [20]

Según la figura 2.6, los materiales cerámicos tienen una curva corta, lo cual refiere a que la deformación de estos materiales es poca, con este pequeño porcentaje de deformación en el material se logra la rotura del mismo.

Debido a esto, en esta tesis se han incluido algunos de los materiales más utilizados en la fabricación de las fibras empleadas como sensor, ya que son parte importante de la presente investigación.

### 2.4.1 Sílice

El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un material utilizado comúnmente en la manufactura de hilos de fibra óptica, siendo el material del que está compuesto el núcleo de esta, es un material frágil pero duro, entre las características que destacan de es que es

un dieléctrico lo cual lo hace apto para la transmisión de onda electromagnéticas, en este caso de ondas de luz.

En el caso de los estudios realizados para esta tesis se tomaron en cuenta las siguientes características físicas de este material.

### 2.4.2 Sílice dopada

Utilizada como revestimiento (cladding) de la fibra, esta es dopada con algunas tierras raras o algunos elementos que hacen que su índice de refracción sea más bajo, recordando el funcionamiento de la fibra óptica como guía de onda, el material del revestimiento debe tener un índice de refracción menor al que se tiene en el núcleo, y debido a sus propiedades físicas al ser dióxido de silicio sigue teniendo una firmeza y fuerza de tensado parecida al dióxido de silicio puro.

Algunos de los elementos con los cuales se dopa a la sílice (dióxido de silicio;  $\text{SiO}_2$ ) son con dióxido de germanio ( $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ ), trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ), pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ ), con los cuales se cambia el índice de refracción [2].

### 2.4.3 Acrílico (PPMA)

Polimetilmetacrilato ( $\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$ )<sub>n</sub> es un material utilizado como recubrimiento de la fibra, es muy utilizado por sus excelentes características ópticas con un porcentaje de transmisión de luz del 92% y un índice de refracción de 1.48 y tiene una muy buena resistencia en ambientes expuestos. Además, su temperatura de servicio va desde los  $-65^\circ\text{C}$  a los  $125^\circ\text{C}$ .

Otra de sus propiedades que interesa para la utilización de este material es que puede ser removido con solventes de manera fácil. En cuanto a sus propiedades

mecánicas, la que más interesa para el desarrollo de esta tesis es el módulo de Young, el cual para este material es de 11 a 67 MPa, además de una constante dieléctrica de 2.6-2.8 a una frecuencia de 1 MHz y una temperatura de 25 °C.

#### 2.4.4 Teflón (TEF)

Politetrafluoroetileno( $C_2F_4$ )<sub>n</sub> es un material utilizado como recubrimiento de la fibra óptica, tiene un coeficiente de fricción muy baja, además es un material aislante y débil. Índice de refracción 1.338 [21]. Es altamente utilizado como recubrimientos en diversas áreas de ingeniería, además de ser resistente a altas temperaturas y tener propiedades dieléctricas y de aislamiento eléctrico, las cuales son ideales para formar parte de fibras ópticas. Cabe decir que es un material antiadherente antideslizante [22].

#### 2.4.5 Silicona

Se considera un material casi puro  $[R_2SiO]_n$ , por lo cual es muy utilizado en las fibras ópticas de plástico, además tiene aplicación en la fibra óptica de sílice en el recubrimiento de esta. Por otra parte, se tiene una constante dieléctrica en el rango de 2.8 a 3.8 dependiendo de su composición química particular, además, tiene un bajo módulo de elasticidad, y una resistencia a la tracción de 2.75 a 7.58 MPa.

En cuanto a su temperatura de operación puede llegar a soportar hasta los 200° C lo cual lo hace recomendable para ambientes de uso industrial. Por otra parte, previene las pérdidas por micro curvaturas en la fibra.

#### 2.4.6 Poliamida (nylon)

Material utilizado como recubrimiento de la fibra (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)<sub>n</sub>, tiene un coeficiente de fricción de 0.3, entre sus razones de uso en la fibra óptica se tienen que puede resistir altas temperaturas hasta 300° C, además es utilizado en ambientes industriales y médicos [22].

### 2.5 Probabilidad de rotura de una fibra óptica: Modelo de Weibull

El uso de este modelo probabilístico data de 1951, ha sido de gran importancia en la predicción de probabilidades de fallas en materiales frágiles, siendo este tipo de materiales los utilizados en el desarrollo de esta tesis. Además, ha sido aplicada en diversos fenómenos, ya que permite una muy buena aproximación a la ley de probabilidad de diversas variables aleatorias [23].

Para conocer las probabilidades de rotura se utiliza la función de distribución de probabilidad acumulada de Weibull [24].

$$P=1-\exp [-V_E (\sigma/\sigma_o)^m ] \quad (7)$$

Donde:

- P es la probabilidad de rotura.
- V<sub>E</sub> es el volumen efecto, Volumen de muestra del material al que deber ser aplicado tensión que provoque la rotura.
- σ es el esfuerzo de tensión aplicado en el material.
- σ<sub>o</sub> es el esfuerzo característico del material.

- $m$  siendo el módulo de Weibull que indica que tan dispersa es la distribución del esfuerzo.

Siendo  $m$ ,  $V_E$  y  $\sigma_0$  constantes, dependiendo únicamente de la tensión aplicada  $\sigma$  en la muestra del material.

Sin embargo, en investigaciones [25] se han dado casos en los cuales la distribución de Weibull no llega a ser precisa, principalmente cuando se tienen fallas idénticas de los materiales o se tienen dos poblaciones de muestras del mismo material que contiene fallas o roturas idénticas.

## 2.6 Estándares de sensores basados en fibra óptica

En cualquier desarrollo tecnológico los avances deben apearse a las recomendaciones y/o estándares hechos por las instituciones directrices de la rama de estudios.

Debido a esto se revisaron los documentos concernientes al tema de sensores basados en tecnología de fibra óptica para el uso en industria civil y aeroespacial.

Existen diversos documentos sobre tecnología basada en fibra óptica, como lo son las rejillas de Bragg, de los cuales hay diversos apartados publicados por la IEEE, pero no tocan más allá de algunas recomendaciones que van desde la manipulación de las rejillas, el tipo de rejillas para utilizar en diversos entornos y la distribución de estos [26].

Por otra parte, no se encontró algún documento de tipo regulatorio que nos de recomendaciones acerca del uso de hilos de fibra óptica para la aplicación de monitoreo de daño estructural.

## 2.7 Conclusiones del capítulo

1. Existen diversos dispositivos basados en fibra óptica que realizan la tarea de sensores de diversas formas, de los más utilizados se encuentran los basados en rejillas, los cuales incluso pueden ser embebidos en las estructuras.
2. Los materiales por los cuales está constituida la fibra óptica son mayormente materiales duros pero frágiles, lo cual causa que al estar bajo esfuerzos tiendan a romperse de manera tajante.
3. Los materiales utilizados en la fibra óptica como agente dopante son utilizados con el fin de cambiar el índice de refracción de la sílice, no obstante, las propiedades mecánicas como lo son el parámetro resistencia a la tracción de sílice puro y sílice dopado siguen teniendo un valor parecido, pues compuestos son agregados a la fibra en porcentajes muy pequeños.
4. La distribución de Weibull es utilizada como mejor aproximación en muestras de población pequeña, menor a 30 ensayos.
5. Existen regulaciones y normas que van adyacentes a esta tecnología, de las cuales no se encontró información acerca de recomendaciones para el uso de hilos de fibra óptica con aplicación a monitoreo de salud estructural.

## Capítulo 3. Planteamiento del experimento

### 3.1 Objetivo del experimento

El objetivo es el medir la fuerza de rotura de la fibra óptica ejerciendo una tensión con el fin de medir la fuerza con la cual se provoque la rotura de la fibra al ir incrementando la tensión.

Caracterizar el tipo de fibra que se utilizará en experimentos de esta tesis con elementos de construcción y con diversos pegamentos para adherir la fibra a superficies por medio de dinamómetros y sensores de desplazamiento.

### 3.2 Metodología de estudios experimentales

Para la parte experimental de esta tesis se han diseñado, fabricado y ocupado dos instalaciones de tracción para realizar ensayos en fibras de diversos calibres.

Las instalaciones fueron diseñadas para ser lo mejor aproximadas a como se realizan las pruebas de tracción en máquinas de ensayos universales, teniendo adecuaciones para la manipulación tanto de la fibra como del equipo de medición adicional para el sistema de monitoreo.

#### 3.2.1 Estudio de la fuerza de rotura y desplazamiento de fibra óptica adherida a ladrillos

Esta instalación es utilizada para medir fuerza de rotura de una fibra óptica debido a la creación de una grieta mediante la separación de ladrillos utilizados en esta.

Dentro de estas pruebas se utilizarán dos pegamentos diferentes para adherir fibra óptica a la superficie del ladrillo, pegamento epóxico y pegamento acrílico.

Con estos pegamentos se realizarán pruebas de tres tipos de fibras ópticas, todas de sílice: FG200LEA, FG105LCA y fibra de 50/125  $\mu\text{m}$  con recubrimiento de poliamida.

A la instalación se adicionó una cámara digital para tener evidencia fotográfica de la fibra óptica pegada y las grietas hechas en el espaciamiento de tabique



*Figura 3.1 Instalación de tracción con elementos de mampostería.*

### 3.2.2 Instalación de tracción de fibra adherida a ladrillos

Para las pruebas requeridas en esta instalación se necesitaba tener la fibra en contacto con la superficie en la cual se debe de adherir, en este caso ladrillo, y con esto ver la fuerza que podría soportar un hilo de fibra al ejercer un movimiento de tracción.

La instalación de tracción con elementos de mampostería consiste en tener diversos ladrillos conectados a manera horizontal para representar una superficie de mampostería.

Esta estructura esta sobre puesta sobre un riel de metal, el cual ayuda a tener una superficie en la que se pueden colocar los ladrillos y que, a su vez, se puedan desplazar dentro del riel al cual está conectado a una prensa la cual hace de creadora de grietas, pues al abrir esta prensa se tiene un desplazamiento en los ladrillos.

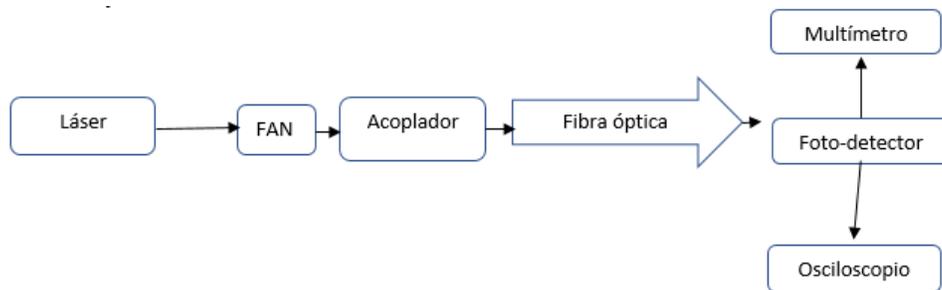
Además, en esta instalación se tiene tanto un láser que funge como transmisor, un ventilador como obturador para la generación de pulsos haciendo semejanza a la

### Capítulo 3. Planteamiento del experimento

modulación OOK (on-off keying) y un foto-detector que sirve como transductor y receptor de señal óptica a eléctrica.

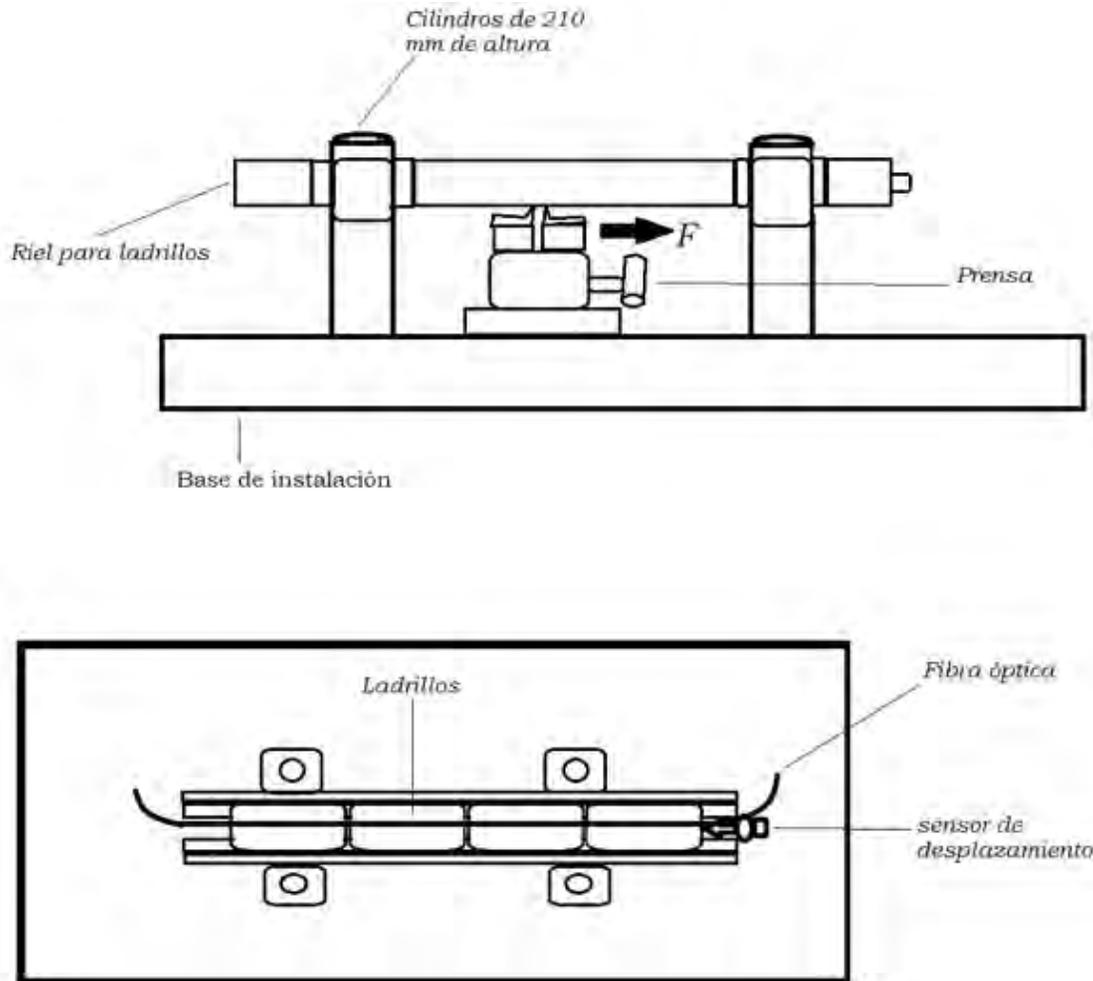
Desde el foto-detector se manda la señal tanto a un multímetro para medir el voltaje y a un osciloscopio para observar y medir la recepción de la señal y ver si la forma de onda que se tiene presenta distorsión, además, comparar la amplitud que lee el multímetro contra el que mide el osciloscopio.

El siguiente es un diagrama de bloques del sistema de medición de la intensidad de la señal piloto en la salida de fibra óptica bajo prueba.



*Figura 3.2 Diagrama de bloques de sistema electrónico de medición*

En cuanto a la parte mecánica de la instalación, el dibujo es el siguiente:



### 3.3 Instalación de tracción con fibra adherida a ladrillos, perspectiva frontal y aérea

En el caso de la fibra óptica mencionada, se adhiere a la superficie del ladrillo y mediante el sensor de desplazamiento se mide la grieta que se va formando al girar la manivela de la prensa.

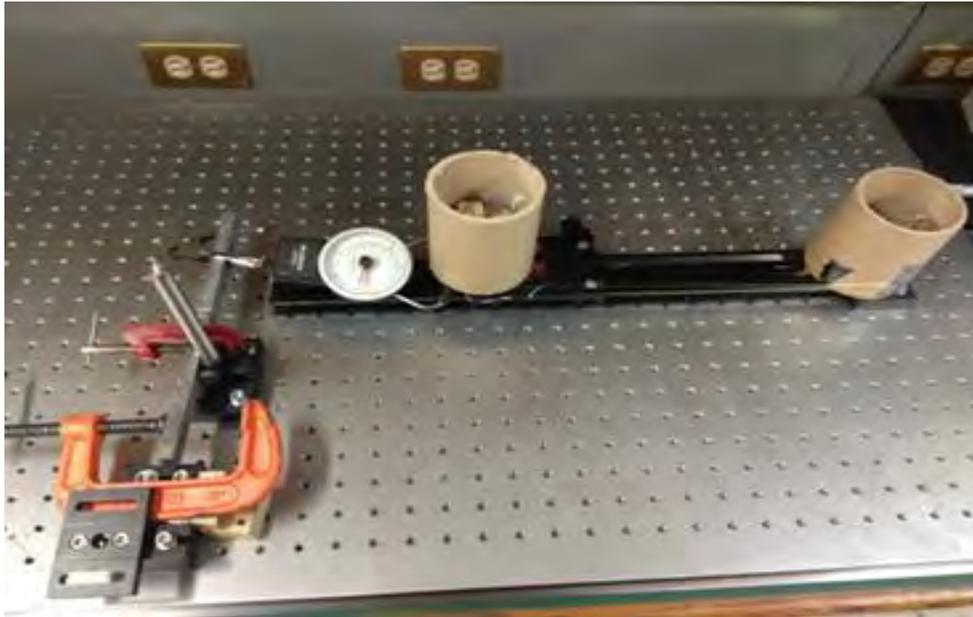
En el caso de la fuerza que se menciona en este dibujo, se mide mediante una galga electrónica que está conectada a un dinamómetro digital, con el cual se hacen las mediciones de fuerza.

#### 3.2.3 Estudio de la fuerza de rotura de las fibras ópticas en el modo de tracción directa

Estos ensayos se hicieron con el propósito de observar del comportamiento y la fuerza de rotura de esta fibra, pues no se tenían muchos datos acerca de esta fibra.

### Capítulo 3. Planteamiento del experimento

La instalación en donde se realizaron estos ensayos es mostrada en la figura 3.4.



*Figura 3.4 Instalación para ensayo de tracción*

Los resultados expresados en Newtons vienen de un proceso de conversión, pues el dinamómetro tiene como unidad principal las libras y tiene una resolución de 1 libra, por lo cual la conversión es la siguiente:

$$W = (F * 0.454) * 9.81 \text{ [N]} \quad (8)$$

Dónde F es la fuerza registrada en el dinamómetro, 0.454 equivale la fuerza de una libra en Kilogramos y el cociente de 9.81 es la constante de gravedad en Ciudad Universitaria.

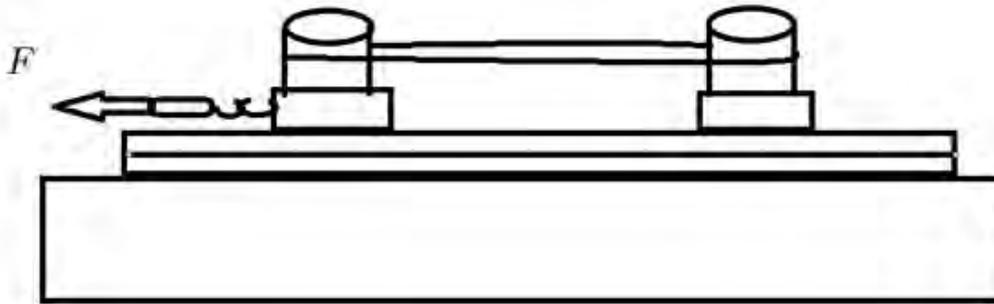
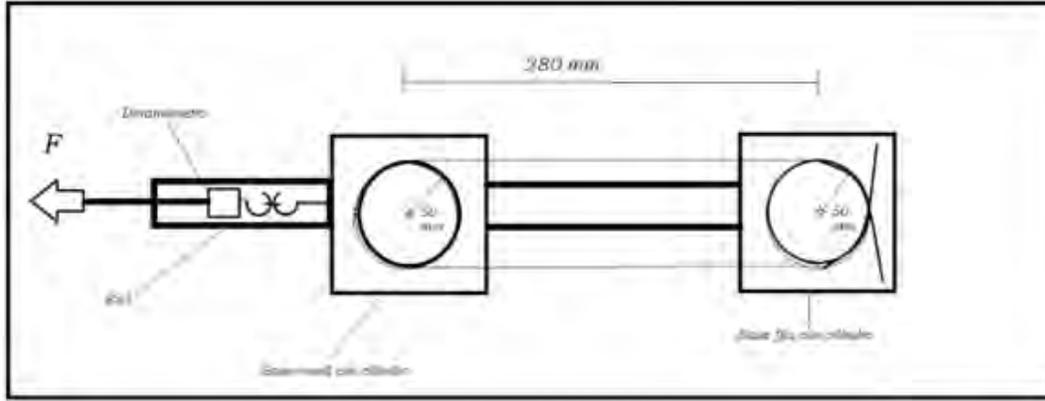
En los siguientes subcapítulos se da a conocer los experimentos realizados en la instalación con su respectivo análisis estadístico para cada caso, así mismo, se anexa un histograma para visualizar la tendencia de rotura de estas fibras y su viabilidad en el proyecto.

#### 3.2.4 Descripción de instalación de tracción en modo directo

La instalación de tracción consiste en un riel con dos soportes para anclar la fibra óptica a los lados. Tiene un mecanismo de Biela-Corredera, la cual está conectada

### Capítulo 3. Planteamiento del experimento

a bases para soporte de fibra óptica a través de un dinamómetro analógico, esto con el objetivo de jalar al cilindro y registrar a fuerza que se está ejerciendo en ese instante.



#### *3.5 Instalación de tracción de modo directo perspectiva frontal y aérea*

La base móvil al ser jalada por la fuerza se desplaza sobre el riel hasta llegar a un máximo permitido por la longitud de la fibra óptica, mientras esto pasa el dinamómetro nos da la lectura de la fuerza, teniendo así registrada la fuerza de rotura de la fibra.

#### 3.2.5 Verificación de la metodología de trabajo experimental

En la instalación de la figura 3.5, se tenía el problema de anclar la fibra a los soportes de fibra, con lo cual en un principio se resolvió por adherir superficies rugosas a los

### Capítulo 3. Planteamiento del experimento

soportes, esto pegando lijas de diversos calibres, siendo calibre 400 el calibre más fino.

Se realizaron experimentos con la fibra FG200LEA en la instalación de tracción de modo directo, esto por ser la fibra de mayor grosor

**Tabla 3.1 Experimentos de rotura de fibra óptica FG200LEA anclada mediante fricción por medio de elementos rugosos.**

Número de Experimento	Lija empleada	Fuerza medida	Comentario
1	Sin lija	112.75 N	Se hizo esta prueba utilizando pegamento epóxico para sostener la fibra, se toma en cuenta para el análisis con fibra sin lijas mostrado más adelante.
1*	Lija cal. 120	12.25 N	Al utilizar lija con calibre grueso se rompió la fibra al mínimo esfuerzo
1**	Lija cal. 400	78.5 N	Al tener la rotura de la fibra se observó que fue en la parte de la lija, por lo cual, la lija seguía siendo factor en el ensayo.
2	Lija cal. 400	51.45N	
3	Lija cal. 400	60.3 N	
4	Lija cal. 400	51.45 N	

Se optó por quitar las lijas y realizar de nuevo los experimentos, de manera que se sostuviera la fibra óptica por medio de fricción.

Es importante decir que para mantener fija la fibra en los soportes es necesario dar un promedio de 5 vueltas de fibra en cada soporte, de lo contrario se desliza y afecta

en las mediciones. En cada vuelta que se da a los soportes se ocupa un aproximado de 320 [mm] de fibra, por lo cual se debe tener consideración de la cantidad de fibra a utilizar.

### 3.3 Elección de dinamómetros

Para el experimento se consideraron diversos tipos de dinamómetros para medir la fuerza de tensión que se aplicaría en la fibra, estos eran digitales y analógicos.

En cuanto a los dinamómetros digitales se vieron diversos modelos, todos estos cambiaban en precio y en rango medibles, además debido a que eran digitales nos da la ventaja de tener un error de 0.5%, aunque por ende eran mucho más caros que los analógicos.

Mientras los analógicos al ser más baratos eran mucho más rudimentarios, esto al tener como unidad de medida la elongación de un resorte o resortes interiores y con esto daba una medición más imprecisa.

En la tabla comparativa 3.2 se encuentra diversas características de los dinamómetros con los que contamos en el laboratorio.

**Tabla 3.2 Características de dinamómetros.**

Dinamómetro	Precio	Capacidad		Tecnología	Medición	Resolución	Transductor
Global Luggage scale	6 usd	0-35 [Kg]	0-343.35 [N]	Analógico	Por tensión	0.5 Kg	Resorte
exTEch 475055	616 usd	0-100 [Kg]	0-981[N]	Digital	Tensión y compresión	0.05 Kg	Célula de carga

### 3.3.1 Comparación de respuesta a la carga entre dinamómetros empleados

Debido a que se tenía incertidumbre entre ambos dinamómetros se necesitaba comprobar si coincidían en la medición empleando la misma fuerza, por lo cual se realizó el siguiente arreglo para obtener la diferencia existente entre ambos dinamómetros, uno digital y uno analógico.

Los resultados son presentados en la tabla 3.3, en donde debido a que era más fácil leer la fuerza en el analógico se tomó de referencia.

**Tabla 3.3 Mediciones realizadas para la comparación entre dinamómetros.**

Dinamómetro analógico fuerza registrada		Prueba 1 dinamómetro digital Fuerza registrada		Prueba 2 dinamómetro digital Fuerza registrada		Fuerza ajustada	
[Kg]	[N]	[Kg]	[N]	[Kg]	[N]	[Kg]	[N]
0	0	0	0	0	0	0	0
1	9.81	0.8	7.84	1.2	11.77	1	9.81
2	19.62	2.8	27.46	2.9	28.44	2.85	27.95
3	29.43	3.75	36.78	4	38.24	3.85	37.76
4	39.24	5.15	50.52	5.2	51.01	5.17	50.71

### Capítulo 3. Planteamiento del experimento

5	49.05	5.9	57.87	6.15	59.84	6.02	59.1
---	-------	-----	-------	------	-------	------	------

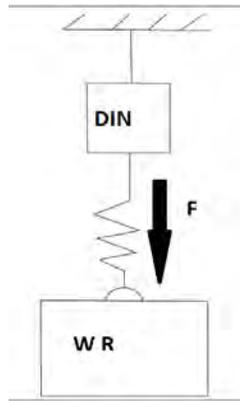
De esto se obtuvo una gráfica con una aproximación por mínimos cuadrados, esta fue de primer grado, y representa la relación entre los dos dinamómetros.



Figura 3.6 Gráfica de relación entre dinamómetro analógico y digital

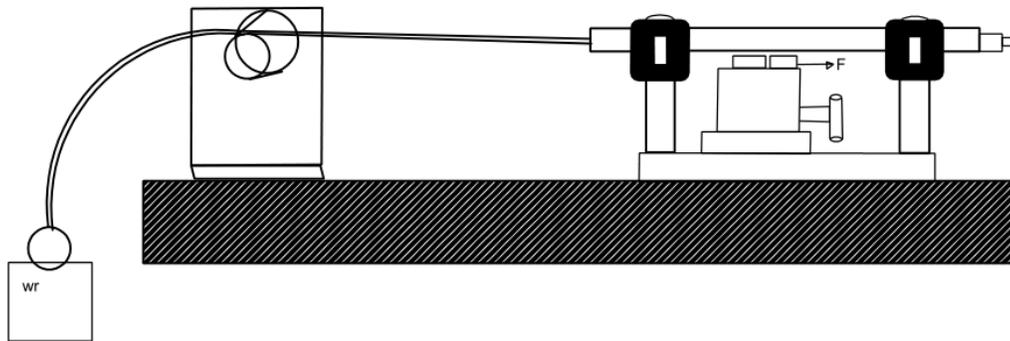
En general los resultados no tienen diferencia de más de 2 cifras significativas dado los dinamómetros que se utilizaron, además, se realizó una prueba más para confirmar la afinidad de ambos dinamómetros

En el caso del dinamómetro analógico fue un cuerpo suspendido para realizar la medición.



3.7 Diagrama de cuerpo libre para medición por medio de dinamómetro analógico

En caso del dinamómetro digital se resolvió por utilizar la instalación de tracción con el riel por motivos de comodidad, pues el sensor de fuerza se tenía conectado a la prensa, por lo cual hacer la prueba de manera vertical no era opción como con el dinamómetro analógico.



3.8 Ensayo para medir respuesta a la carga en dinamómetro digital

Con estas dos variantes de ensayos se recabaron los datos de la tabla 3.4:

**Tabla 3.4 Mediciones para comparación de dinamómetros.**

Medición en dinamómetro analógico	Medición en dinamómetro digital
Peso de 22.17 [N]	24.4 [N]
	25.4 [N]
	24.4 [N]

Con los resultados obtenidos de ambas pruebas, se comprueba que la diferencia entre los dinamómetros es debida a la tecnología con la cual están fabricados.

La tecnología del dinamómetro analógico es más rudimentaria, lo cual no lo hace preciso, pero al ver los resultados obtenidos tampoco tiene una diferencia de más de un orden de magnitud en las lecturas con el dinamómetro digital.

Se decidió utilizar el dinamómetro digital en la instalación de tracción con fibra adherida a los ladrillos y el dinamómetro analógico en la instalación de tracción de modo directo.

### 3.4 Estimación de fuerza máxima soportada por la fibra óptica

Se realizó un análisis matemático, con el fin de tener un punto de comparación entre las fuerzas teórica y experimental de rotura (capítulo 4).

Al ser la fibra un material compuesto a partir de principalmente dos capas para su funcionamiento: Sílice en el núcleo y alguna otra variante de sílice dopado con algún otro elemento en el revestimiento, además de ser envuelto en el recubrimiento por materiales que ayudan a proteger estas dos capas como lo son el acrílico o algún tipo de polímero.

Al ser manufacturada por medios industriales a grandes temperaturas y presiones, se puede decir que la fuerza total para la fractura de un hilo de fibra puede ser definida por una suma de fuerza.

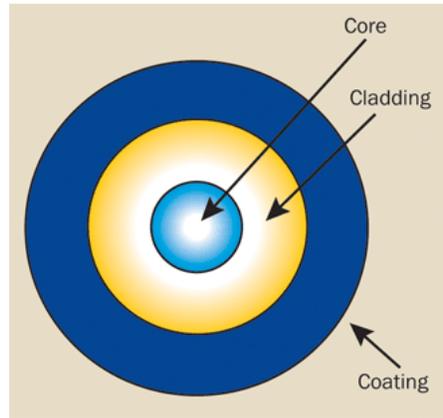


Figura 3.9 Dibujo esquemático de la sección transversal de fibra óptica [27]

Siendo:

*F<sub>1</sub>* - fuerza ejercida en el núcleo

*F<sub>2</sub>* - fuerza ejercida en el revestimiento

*F<sub>3</sub>* - fuerza ejercida en el recubrimiento

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_T \quad (9)$$

Y tomando como base la expresión de esfuerzo y despejando la fuerza de esa expresión

$$F_T = \sigma * A \quad (10)$$

Para saber la tensión que podría soportar las fibras ópticas, Chen, C. P. & Chang T. H. [28] realizaron pruebas en fibras ópticas hechas de sílice con recubrimiento de acrílico, ellos enfrentaron el problema de que la fibra óptica, por ser frágil y tener defectos distribuidos de forma aleatoria a lo largo de su longitud, no tienen un valor único de fuerza de rotura. Es decir, la fuerza de rotura se caracteriza por medio de la probabilidad de rotura que depende de la longitud de la muestra, entre otros factores. Dicha propiedad de materiales frágiles en general es bien conocida [29].

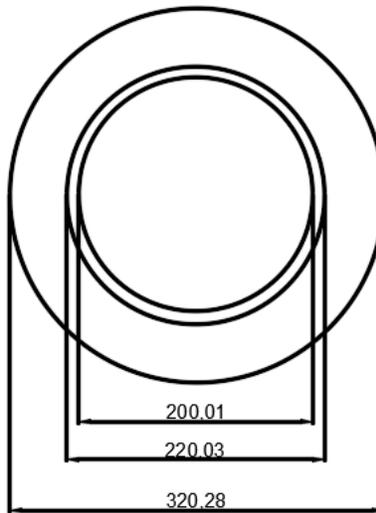
Por lo cual los autores manejan tres valores típicos de la “fuerza de rotura” que ellos se obtuvieron con sus muestras, que va de 2.4 a 4.5 GPa. En esta tesis, compararemos nuestros propios resultados con los resultados de [28].

### 3.4.1 Estimación de fuerza de rotura para la fibra óptica FG200LEA

Para calcular la fuerza que puede soportar esta fibra se conocían sus materiales y los diámetros de cada capa de fibra. Más información sobre esta fibra se puede encontrar en el anexo C.

**Tabla 3.5 Diámetros de capas en la fibra FG200LEA**

Capa	Diámetro
Núcleo	200 $\mu\text{m}$
Revestimiento	220 $\mu\text{m}$
Recubrimiento	320 $\mu\text{m}$



*Figura 3.10 Representación de capas en fibra óptica FG200LEA  $d=200 \mu\text{m}$  es el núcleo,  $d= 220 \mu\text{m}$  es el revestimiento y  $d=320 \mu\text{m}$  es el recubrimiento*

Lo siguiente fue calcular el área de la sección de Sílice en la fibra, tomando en cuenta el núcleo y el revestimiento, esto debido a que el material en el recubrimiento tiene un mucho menor módulo de resistencia a la tracción, por lo cual la sílice es la que da la mayor firmeza a la fibra. Dado que es un círculo se aplicó la siguiente fórmula.

$$A=\pi * r^2 \tag{11}$$

Él área resultante es:

$$A_{\text{sílice}}=38.0132 \times 10^{-9} \text{ m}^2$$

Con esto se estimó la fuerza para los rangos que se obtuvieron del artículo [28]. Utilizando la fórmula (10):

$$F_T = \sigma * A$$

**Tabla 3.6 Fuerza de rotura para la fibra FG200LEA según estimaciones de Cheng et al [28]**

Tensión ejercida [GPa]	Fuerza de rotura teórica [N]
2.4	91.23
3.5	133.04
4.5	171.05

### 3.4.2 Estimación de fuerza de rotura para la fibra FG105LCA

Para esta fibra se tiene una constitución de sílice en el núcleo, sílice dopada en el revestimiento y acrílico en el recubrimiento. Más información sobre esta fibra se puede encontrar en el anexo C.

**Tabla 3.7 Diámetros de capas en la fibra FG105LCA**

Capa	Diámetro
Núcleo	105 um
Revestimiento	125 um
Recubrimiento	250 um

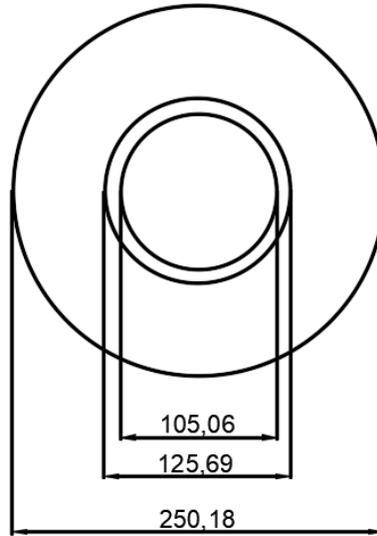


Figura 3.11 Representación de diámetros de capas en la fibra FG105LCA,  $d=105 \mu\text{m}$  es el núcleo,  $d= 125 \mu\text{m}$  es el revestimiento y  $d=250 \mu\text{m}$  es el recubrimiento

De igual manera se calculó el área que ocupa la sílice en esta fibra, tomando en cuenta el núcleo y el revestimiento, por lo cual el diámetro era de 125  $\mu\text{m}$ , dando un área de:

$$A = \pi * (62.5 \times 10^{-6})^2 = 12.2718 \times 10^{-9} \text{ m}^2$$

Para el rango de tensiones encontrado en el artículo los valores de la fuerza fueron los siguientes:

Tabla 3.8 Fuerza de rotura para la fibra FG105LCA según estimaciones de Cheng et al [28]

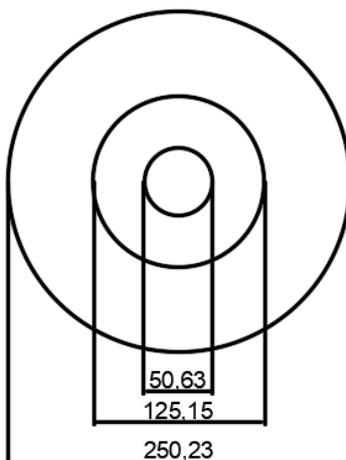
Tensión de la fibra [GPa]	Fuerza rotura teórica[N]
2.4	29.5
3.5	43
4.5	55.2

### 3.4.3 Estimación de fuerza de rotura para la fibra AFS 50/125Y

Para la fibra AFS 50/125Y tiene una constitución de sílice en el núcleo, sílice dopada en el revestimiento y acrílico en el recubrimiento. Más información sobre esta fibra se puede encontrar en el anexo D.

**Tabla 3.9 Diámetros de capas en la fibra AFS 50/125Y**

Capa	Diámetro
Núcleo	50 $\mu\text{m}$
Revestimiento	125 $\mu\text{m}$
Recubrimiento	250 $\mu\text{m}$



*Figura 3.12 Representación de diámetros de sílice en la fibra AFS 50/ 125Y,  $d=50 \mu\text{m}$  es el núcleo,  $d= 125 \mu\text{m}$  es el revestimiento y  $d=250 \mu\text{m}$  es el recubrimiento*

**Tabla 3.10 Fuerza de rotura para la fibra AFS 50/125Y según estimaciones de Cheng et al [28]**

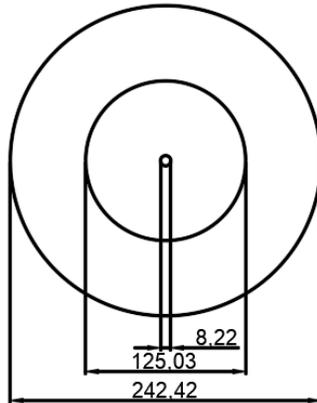
Tensión de la fibra [GPa]	Fuerza de rotura teórica [N]
2.4	29.5
3.5	43
4.5	55.2

### 3.4.4 Estimación de fuerza de rotura para la fibra SMF28

En cuanto a la fibra para telecomunicaciones SMF28; los materiales de constitución de la fibra son de sílice en el núcleo, sílice dopada en el revestimiento y acrílico en el recubrimiento. Más información sobre esta fibra se puede encontrar en el anexo B.

**Tabla 3.11 Diámetros de capas en la fibra SMF28**

Capa	Diámetro [ $\mu\text{m}$ ]
Núcleo	8.2
Revestimiento	125
Recubrimiento	242



*Figura 3.13 Representación de diámetros de sílice en fibra SMF 28,  $d=8.2 \mu\text{m}$  es el núcleo,  $d= 125 \mu\text{m}$  es el revestimiento y  $d=242 \mu\text{m}$  es el recubrimiento*

**Tabla 3.12 Fuerza de rotura para la fibra SMF28 según estimaciones de Cheng et al [28]**

Tensión de la fibra [GPa]	Fuerza soportada [N]
2.4	29.5
3.5	43
4.5	55.2

### 3.5 Conclusiones del capítulo

1. Se realizaron cálculos para la fuerza máxima soportada por diferentes diámetros de fibra a probar en las instalaciones, en la fibra FG200LEA se calculó una fuerza máxima de 170 [N], en las fibras SMF 28, FG105LCA, AFS50/125Y la fuerza máxima calculada fue de 55 [N].
2. Comparamos dinamómetros existentes en el laboratorio, uno analógico y otro digital, al realizar pruebas dieron lecturas con 3 [N] de diferencia entre dinamómetros, con lo cual se comprobó la validez para el uso de ambos en las dos instalaciones utilizadas.
3. Las instalaciones empleadas fueron diseñadas para realizar experimentos de tracción para hacer los ensayos de rotura de fibra óptica y tener lectura de la fuerza de rotura de la misma, adecuados para hacer en modo de tracción directa y con fibra adherida a ladrillos.

## Capítulo 4. Sistema de monitoreo

En esta parte de la tesis se exploran los componentes del sistema de monitoreo existente en el grupo de trabajo de la FI-UNAM con el cual se hizo el presente proyecto de tesis, este sistema incluye la parte transmisora y receptora.

El transmisor debe proporcionar una corriente directa igual o mayor a 10 [mA] y contar por lo menos la mitad de corriente directa en corriente alterna, en orden de mantener la alimentación de corriente en el LED constante.

En este caso hablamos de poco más de 5 [mA] rms, por lo cual, en esta parte, se medirán las corrientes del sistema transmisor.

Así mismo, en la parte receptora, fue necesario verificar el ancho de banda del receptor y el funcionamiento del filtro integrado en el receptor, por lo cual se medirán el ancho de banda del receptor con y sin el filtro.

En estas pruebas se utilizó un foto-receptor con amplificador incluido como medio alternativo al receptor electrónico con el cual se hicieron pruebas, evaluando características principales, como lo son la amplitud máxima y distorsión de la señal.

### 4.1 Transmisor óptico del sistema de monitoreo

El objetivo de hacer pruebas en el circuito transmisor es analizar la respuesta en frecuencia de la configuración utilizada en la etapa de amplificación de señal. Se debe cumplir que la corriente alterna sobre el LED sea mayor a 10 [mA] rms aunado a que la señal de voltaje sobre la resistencia  $R_L$  no presente distorsión (figura 4.1), con esto se asegura que la señal alterna enviada por la fibra llegué al receptor sin distorsión.

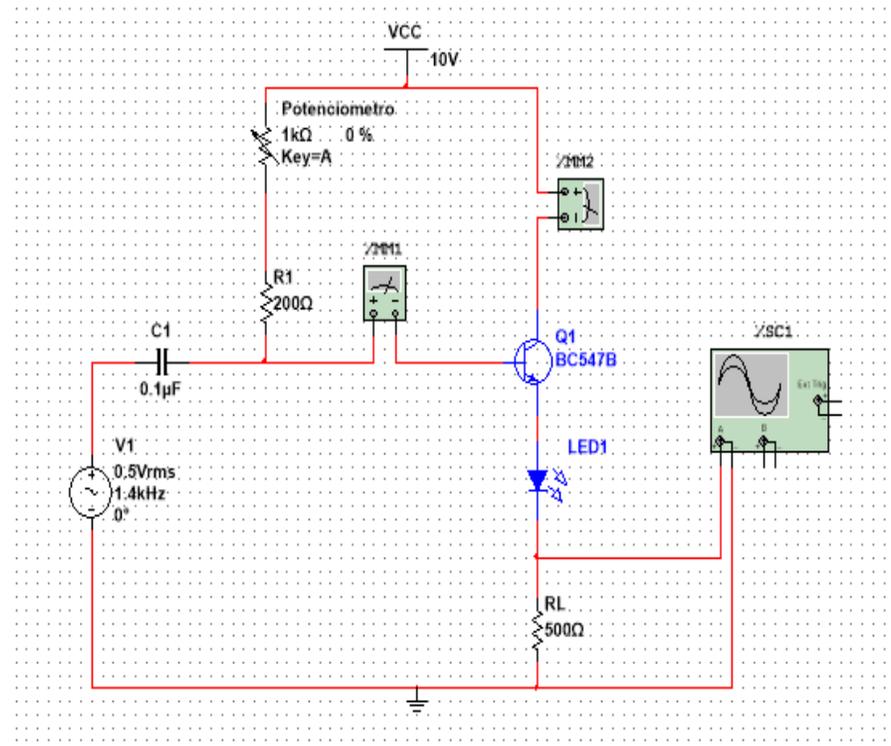


Figura 4.1 Circuito transmisor TxA [14]

Materiales:

Cantidad

- Resistencia 200  $\Omega$ , P= 0.25 W. 1
- Resistencia 500  $\Omega$ , P= 0.25 W 1
- Potenciómetro 1k  $\Omega$ . 1
- Transistor BC547 Fairchild 1
- LED's Modelo: DIP 3mm Marca: SiLed 1
- Rojo 1

Equipo:

- Generador de funciones Standford 1
- Osciloscopio Gould 200 MHz 1
- Multímetros 2
- Fuente de DC 1

Por otra parte, se analizó otro circuito transmisor con amplificador clase B [30], TxB, que da ganancia en corriente. El circuito fue diseñado sin potenciómetro de TxA y

con distintos valores de resistencias  $R_1$  y  $R_L$  de TxA, pues en estas cae la ganancia y el funcionamiento del amplificador.

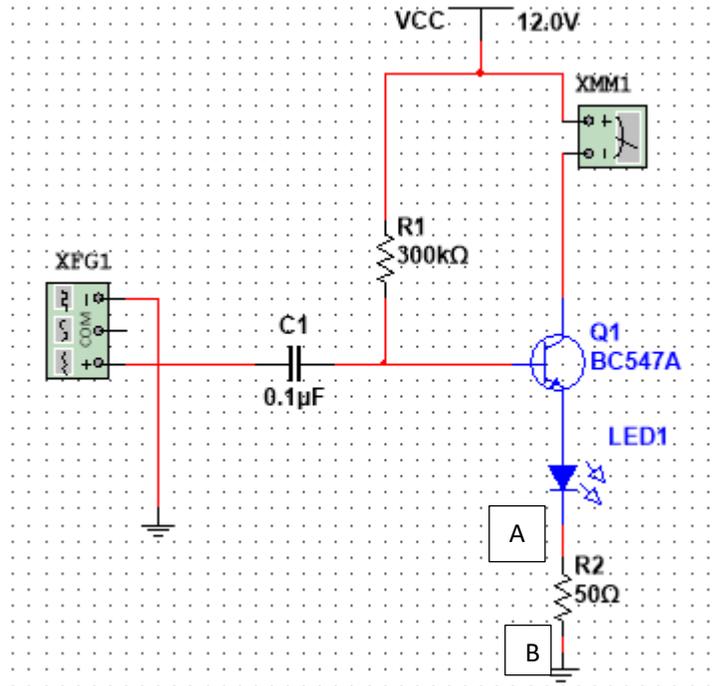


Figura 4.2 Modelo de emisor seguidor para transmisor TxB [30]

Materiales:

Cantidad

- |   |   |
|---|---|
| • Resistencia 300K $\Omega$ , P= 0.25 W | 1 |
| • Resistencia 50 $\Omega$ , P= 0.25 W   | 1 |
| • Transistor BC547 Fairchild            | 1 |
| • LED's Modelo: DIP 3mm Marca: SiLed    |   |
| • Rojo                                  | 1 |

Equipo:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| • Generador de funciones Stanford | 1 |
| • Osciloscopio Gould 200 MHz      | 1 |
| • Multímetros                     | 2 |
| • Fuente de DC                    | 1 |

**Nota:** A partir de esta sección se referirá a la figura 4.1 como TxA y a la figura 4.2 como TxB.

De igual manera midió la corriente  $i_{rms}$  en el colector, así como la corriente  $I_C$  de directa y en osciloscopio se vió el voltaje que se tenía en la resistencia R2. En el diagrama (figura 4.2), se observan los puntos A y B en los cuales se realizó la medición.

De igual forma, se calcula las potencias de salida del LED a partir de las corrientes de directa y alterna; en conjunto con el voltaje medido en el LED.

$$P_{LED} = I_{prom} * V_{LED} \quad (12)$$

Sabemos que la potencia del LED ( $P_{LED}$ ) es calculada mediante la corriente promedio y el voltaje en el LED. Por lo cual, la corriente promedio ( $I_{prom}$ ) es el producto de dos veces la corriente máxima ( $I_{max}$ ) entre  $\pi$ .

$$I_{prom} = \frac{2 * I_{max}}{\pi} \quad (13)$$

Dónde  $I_{max}$  es la suma de la corriente de directa ( $I_{DC}$ ) y la corriente alterna pico ( $I_{ACpico}$ )

$$I_{max} = I_{DC} + I_{ACpico} \quad (14)$$

Este cálculo se hace con la finalidad de obtener la potencia eléctrica del LED, debido a que no tenemos instrumentos para medir la potencia luminosa de este.

## 4.2 Receptor del sistema de monitoreo.

Para la parte receptora se utilizó un receptor utilizado en [14] y [15], en el cual el objetivo es obtener el ancho de banda del circuito y la ganancia que da en su etapa de amplificación.

Debido a que se utiliza fibra como canal de transmisión, también se realizan pruebas con dos fibras diferentes, esto para comprobar que el acoplamiento es un problema de gran relevancia, pues afecta a la potencia tanto de recepción y a la potencia de entrada a la fibra. Las pruebas se realizan con fibra óptica con conectores de metal

y plástico (figura 4.2) y se compararán los resultados después de la etapa de amplificación en el receptor.

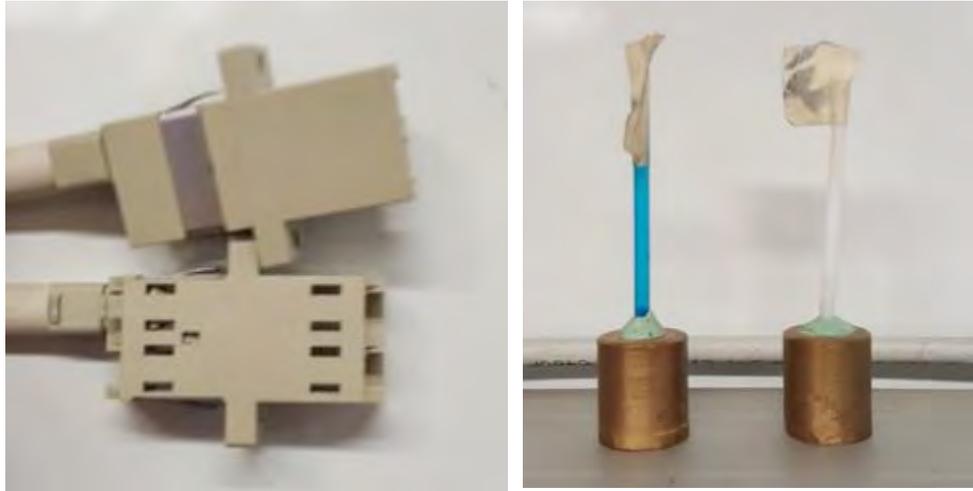


Figura 4.3 Lado izquierdo acopladores de plástico, lado derecho acopladores de metal

Con los acopladores de plástico viene una fibra de 62.5  $\mu\text{m}$  de núcleo y 125  $\mu\text{m}$  de revestimiento, con cubierta riser retardante a la flama, mientras en los acopladores de metal se utilizó la fibra FG105LCA.

El diagrama de bloques con el cual se hicieron las pruebas fue el siguiente:

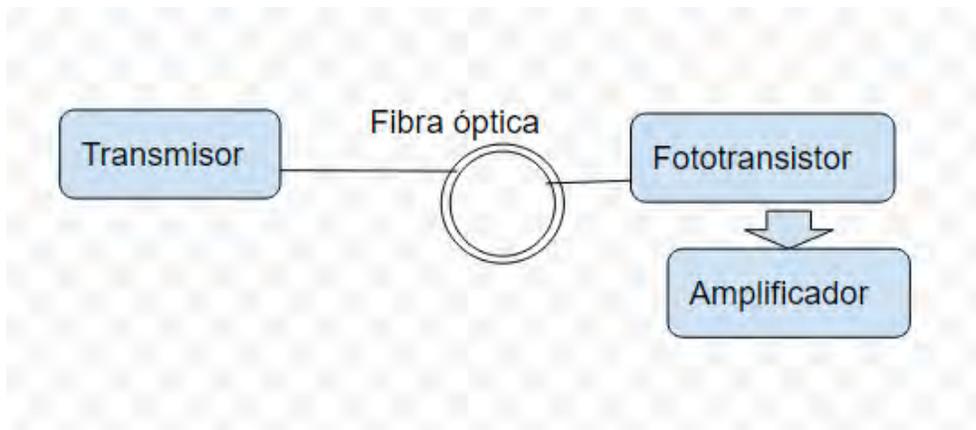


Figura 4.4 Diagrama de conexiones para obtener respuesta del receptor

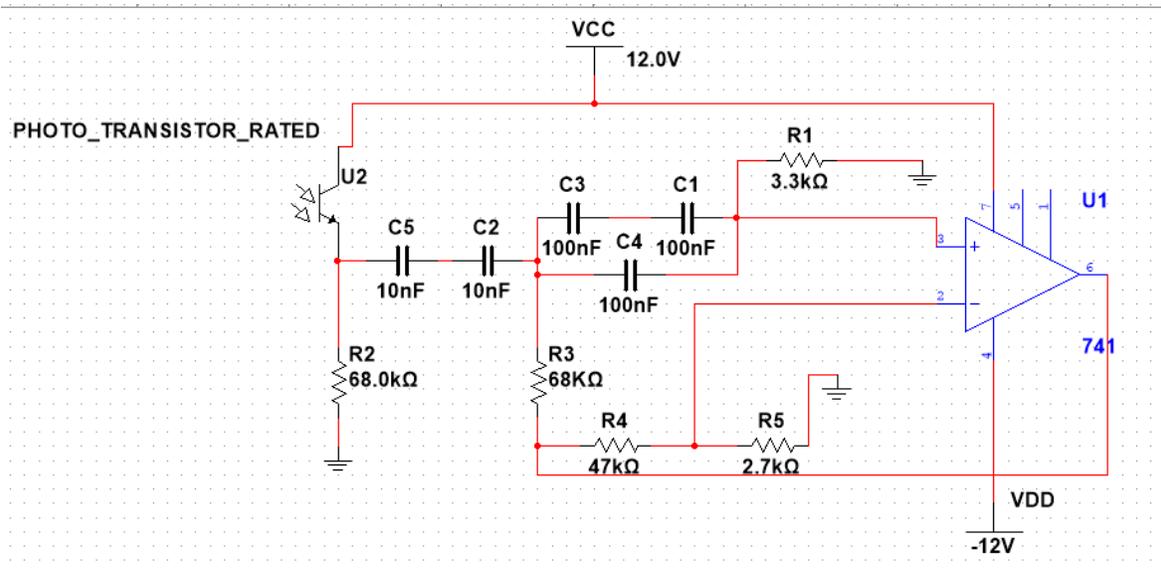


Figura 4.5 Fototransistor y amplificador con filtro Butterworth [14] [15]

En el circuito receptor (figura 4.5) se tiene un amplificador que tiene como característica un filtro activo Butterworth con una respuesta a la frecuencia pasa altas.

Por lo que se prueba la ganancia del amplificador y filtro por separado del fotoreceptor, utilizando una señal de 1 Vpp y variando la frecuencia para obtener su ancho de banda.

Para esto se utilizó un generador de señales de marca Stanford Research System con una señal senoidal de amplitud 1 Vpp. En la parte de la frecuencia se revisaron puntos claves para ver su respuesta, empezando por 100 Hz y terminando en 50 KHz, de esta forma se obtiene el comportamiento de la señal, su nivel de voltaje pico-pico y su atenuación a -3 dB.

En la parte receptora, también se calculó la potencia eléctrica de entrada de manera experimental, utilizando únicamente el foto-transistor y una resistencia (figura 4.6).

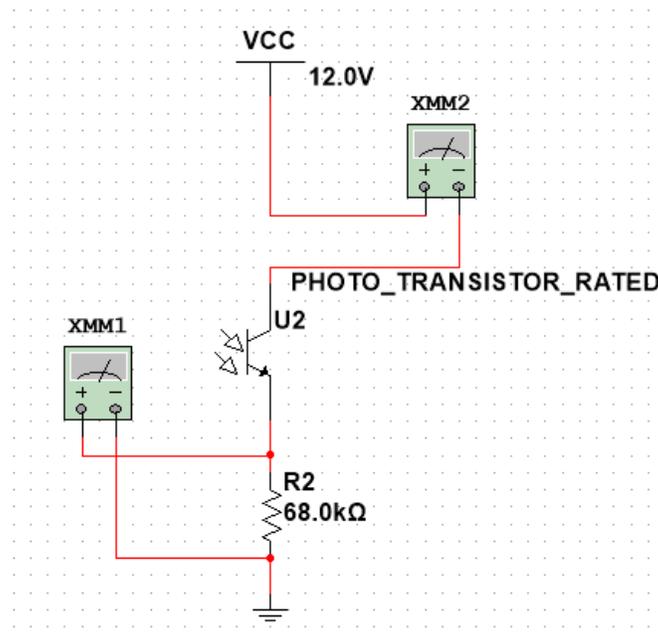


Figura 4.6 Conexiones del circuito para medición de corriente y voltaje

Midiendo corrientes tanto de AC y DC, así como el voltaje en el foto-transistor. Utilizando las ecuaciones (12), (13), (14).

### 4.3 Conclusiones del capítulo

1. Se diseñaron pruebas que den detalles sobre la amplitud de señal eléctrica enviada y recibida por el equipos transmisores TxA y TxB y receptor respetivamente, con la finalidad de evitar la saturación de la señal en el sistema de monitoreo
2. Se diseñaron pruebas de barrido en frecuencia para encontrar anchos de banda del circuito receptor y transmisor, y analizar la compatibilidad entre los diseños de transmisores TxA y TxB con el del circuito receptor.
3. Se obtuvieron ecuaciones para realizar cálculos sobre la potencia eléctrica de los LEDs para los transmisores, con la finalidad de evitar sobrecarga en los LEDs y el fototransistor conectado al receptor del sistema, pues este último no soporta altas potencias.

## Capítulo 5. Resultados

### 5.1 Estudio fuerza de rotura de la fibra óptica en modo directo

Los experimentos en este apartado, fueron hechos en la instalación de la figura 3.5.

#### 5.1.1 Ensayo #1: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica FG105LCA

Tabla 5.1 Fuerza de rotura de fibra FG105LCA

Número de experimento	Fuerza de rotura [N]
1	60
2	55.4
3	50.5
4	62
5	55.4
6	64.5

Media aritmética  $X = 57.96$  [N]

Varianza  $\sigma^2 = 26.3169$  N<sup>2</sup>

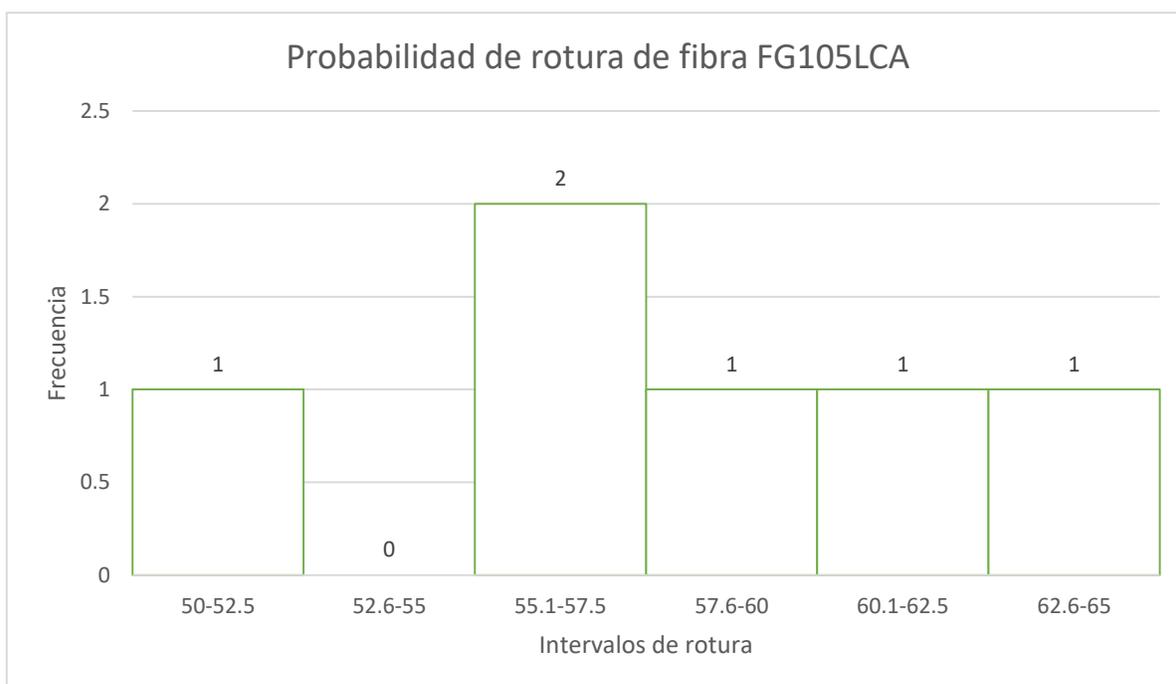
Desviación estándar  $\sigma = 5.13$  N

Rango  $R = 14$  N

**Tabla 5.2 Datos agrupados del experimento con fibra óptica FG105LCA**

Fuerza de rotura de la fibra [N]	Frecuencia relativa	Marca de clase	Frecuencia acumulada
Intervalo	$f_i$	$X_i$	$F_i$
50-52.5	1	51.25	1
52.6-55	0	53.8	1
55.1-57.5	2	56.35	3
57.6-60	1	58.9	4
60.1-62.5	1	61.3	5
62.6-65	1	63.8	6

En cuanto a su histograma se ve una tendencia centralizada en los valores de 55.1 a 57.5 [N].



*Figura 5.1 Histograma de rotura de fibra FG105LCA*

## Capítulo 5. Resultados

Aunado a esto, se decidió hacer tres ensayos más para comparar con los resultados anteriores y comprobar si los datos obtenidos eran correctos para el proyecto. Los siguientes resultados muestran diferencias con los ya obtenidos.

En el primer ensayo la fuerza de rotura fue de 129 [N], para los siguientes dos resultados, la fuerza de rotura fue de 93.52 [N].

Por lo cual, estos resultados a pesar de tener diferencias son considerados como ensayos válidos para el proyecto.

### 5.1.2 Ensayo #2: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica FG200LEA

**Tabla 5.3 Fuerza de rotura de fibra FG200LEA.**

Número de experimento	Fuerza de rotura
1	111.2 N
2	155.68 N
3	175.704 N
4	135.67 N
5	133.44 N
6	162.36 N

Media aritmética  $X=140.97$  N

Varianza  $\sigma^2= 607.6225$  N<sup>2</sup>.

Desviación estándar  $\sigma= 24.65$  N.

Rango  $R=64.504$  N.

## Capítulo 5. Resultados

**Nota:** El análisis estadístico contempló el primer experimento de la tabla 3.1 en donde no se tenía agregada una lija para sostener la fibra, y los resultados de la tabla 4.5.

Para la fibra con núcleo de 200 [µm] se tomó en cuenta la fuerza con la que se rompió a lo largo de los ensayos y se clasificaron por clases.

**Tabla 5.4 Datos agrupados del experimento con fibra óptica FG200LEA**

Fuerza de rotura de la fibra [N]	Frecuencia relativa	Valor medio del intervalo	Frecuencia acumulada
Intervalos	$f_i$	$X_i$	$F_i$
110-120	2	115	2
120.1-130	0	125.05	2
130-140	2	135.05	4
140.1-150	0	145.05	4
150.1-160	1	155.05	5
160.1-170	1	165.05	6
170.1-180	1	175.05	7

En cuanto al histograma se observa que tiene sesgo a la izquierda, lo cual da información importante para ver su rotura debido a la tensión.

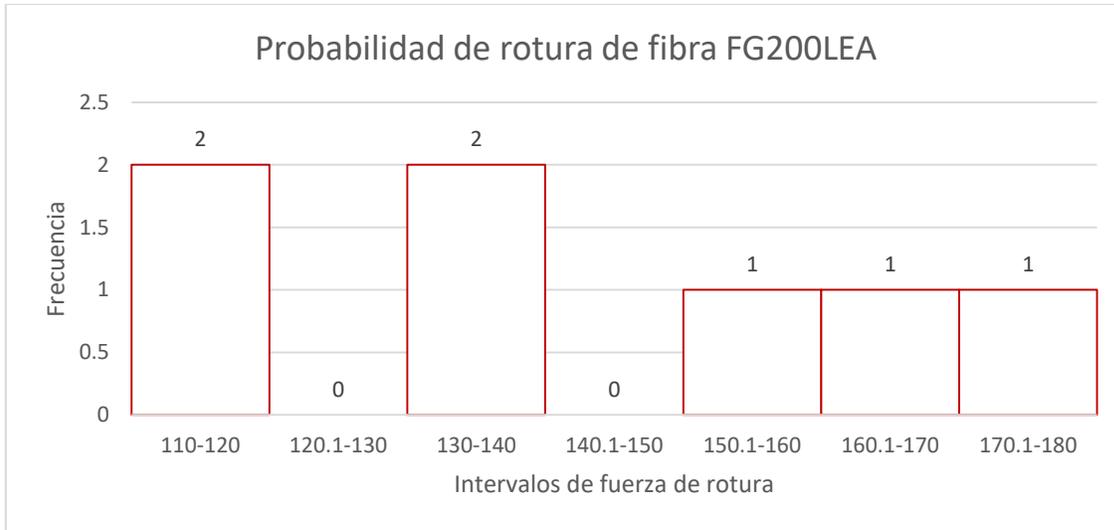


Figura 5.2 Histograma de rotura de fibra FG200LEA

En el histograma se observa que en los experimentos realizados la mayor rotura de fibra se encuentra entre los 110 a 140 [N], lo cual, en comparación con los resultados teóricos, están por debajo de la máxima fuerza de rotura que es de 170[N], aunque también hay resultados que salieron de estos intervalos, como lo son el ensayo que pasó de 170 [N], lo cual conlleva a una fuerza mayor que la fuerza de rotura calculada.

Posteriormente se realizaron otros dos experimentos para observar que tanta congruencia se tendría con los ya realizados. Los resultados fueron los siguientes:

1er experimento Fuerza de rotura = 169.24 [N]

2do experimento Fuerza de rotura= 204.87 [N]

Los resultados anteriores son bastante congruentes, y en el caso de este último experimento, donde la rotura de la fibra fue en 204.84 [N], se tiene una posible respuesta, debido al tipo de fabricación de la fibra y al no tener un protocolo de producción tan riguroso en comparación con las fibras estandarizadas, puede que

## Capítulo 5. Resultados

la fuerza de tensión en esta tenga partes donde es mayor o menor, esto debido a defectos de fabricación al tener micro fisuras en el hilo.

### 5.1.3 Ensayo #3: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica AFS 50/125Y

Se realizaron 3 experimentos con esta fibra debido a que se tenía poco material para realizar los ensayos de tracción. En estos fue considerado el perímetro de las circunferencias con las cuales se hace el ensayo, pues al tener el material limitado es de gran importancia para su aprovechamiento.

Los resultados de las pruebas fueron los siguientes:

**Tabla 5.5 Fuerza de rotura para fibra AFS50 / 125Y**

Número de experimento	Fuerza de rotura [N]
1	89.07
2	35.62
3	84.62

La distancia entre los soportes es de 260 [mm], mientras que el material de fibra utilizado en el ensayo es alrededor de 900 [mm] en total, considerando una vuelta en el cilindro.

En el caso del experimento número 2, mostró una fuerza de rotura del orden de 50 [N], por debajo de los experimentos 1 y 3 de la tabla 5.5.

Para esta prueba al romperse la fibra en el centro, también se rompió en la primera vuelta del cilindro que se queda estático, por lo cual se vio disminuida esta fuerza.

En el caso de la última prueba se necesitó utilizar más cinta adhesiva para poder fijar la fibra, pues al ser tan poca fibra no se podía dar las vueltas requeridas a los soportes para fibra óptica, sin embargo, el resultado del experimento fue acorde al primero con una fuerza de rotura de 85 [N] aproximadamente.

### 5.1.4 Ensayo #4: fuerza de rotura en modo directo de la fibra óptica SMF 28

La fibra SMF 28, es una fibra utilizada en las telecomunicaciones como canal, además de esto es una fibra estandarizada por la ITU, la norma en la cual está definida es la G.652, y en el caso particular de la empleada para estos ensayos tenía un recubrimiento de plástico de diferentes colores, lo cual es importante para realizar los empalmes y soluciones en un cableado de redes ópticas, lo cual en nuestro caso también sirve para poder distinguir entre diversos canales.

Se realizaron 20 ensayos de tracción para obtener datos de la fuerza de rotura en la fibra.

Para este experimento se realizaron pruebas de alineación del haz para ver si la fibra no se encontraba cortada dentro del recubrimiento de plástico. Una vez realizado esto se siguió con los ensayos de rotura de fibra.

## Capítulo 5. Resultados

**Tabla 5.6 Fuerza de rotura en fibra SMF-28.**

# de Experimento	Fuerza de rotura [N]
1	93.5285
2	89.0748
3	97.9822
4	89.0748
5	102.43
6	75.713
7	91.3016
8	84.621
9	97.9822
10	84.621
11	86.8447
12	80.1673
13	89.0748
14	84.621
15	75.713
16	93.52
17	89.0748
18	84.621
19	89.0748
20	86.8447

Los valores estadísticos de estas pruebas son los siguientes:

Media aritmética  $X=88.2942$  [N]

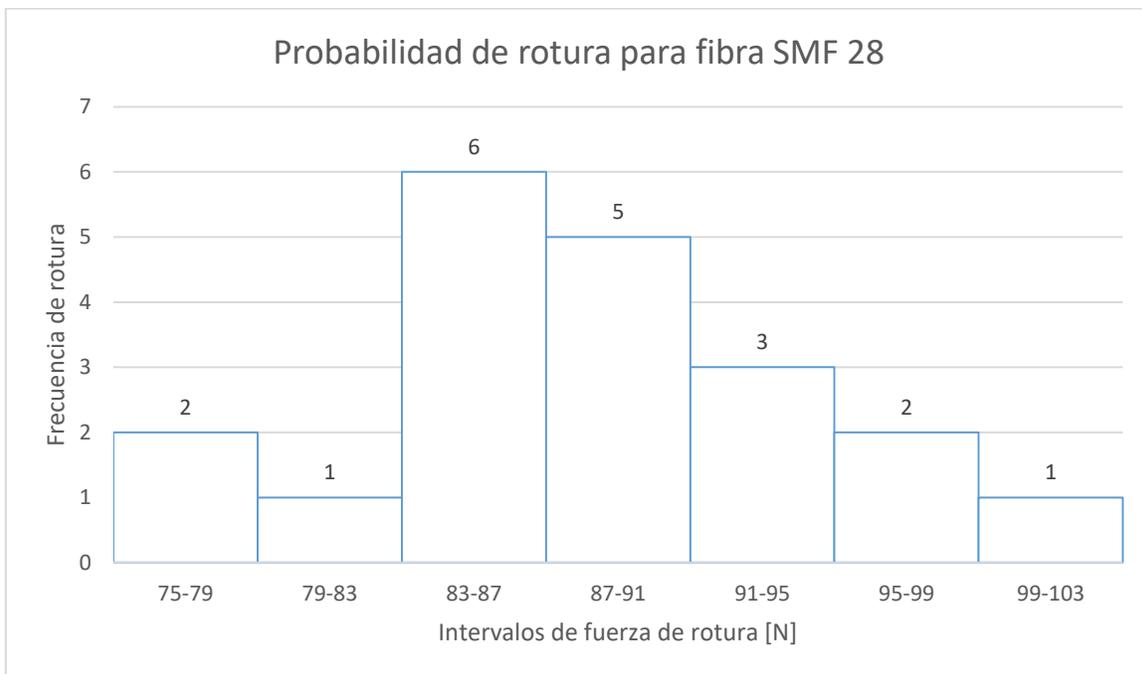
Varianza  $\sigma^2=44.7562$  [N<sup>2</sup>]

Desviación estándar  $\sigma=6.69$  [N]

Rango  $R= 26.7164$  [N]

**Tabla 5.7 Datos agrupados del experimento con fibra óptica SMF 28.**

Fuerza de rotura [N]	Frecuencia absoluta	Valor medio de los intervalos	Frecuencia acumulada.
Intervalos	$f_i$	$X_i$	$F_i$
75-79	2	77	2
79-83	1	81	3
83-87	6	85	9
87-91	5	89	14
91-95	3	93	17
95-99	2	97	19
99-103	1	101	20



*Figura 5.3 Probabilidad de rotura para fibra SMF-28*

En esta fibra se vio una tendencia centralizada de la gráfica de probabilidades de rotura, dando como resultado un mayor número de roturas entre 83 a 87 [N], aunque ensanchando el intervalo, la fuerza más probable de rotura puede dar, según la

gráfica entre 83 y 91 [N], con lo cual mostró una fuerza de rotura mayor a los cálculos realizados, que en su caso era de 55.2 [N]

Por otra parte, la fibra en este caso es estandarizada lo cual, a pesar de ser de diversos proveedores cuenta con las mismas características que pueden servir para homologación de equipos y sistemas.

## 5.2 Resultados del experimento de fuerza de rotura de la fibra óptica adherida a ladrillo por medio de ensayos de tracción

El experimento fue realizado en la instalación de la figura 3.4.

### 5.2.1 Ensayo #5

En la primer prueba de este experimento se utilizó pegamento epóxico y la fibra FG200LEA, con esta se recolectaron los datos del anexo G, en el apartado del primer ensayo.

Se mantuvo una señal en el osciloscopio de aproximadamente 10 Vpp y en el multímetro de 5.74 V de directa. En cuanto inició la prueba, empezó un desplazamiento de los tabiques diferente a lo que marcaba el sensor de desplazamiento, por lo cual se marcaron los tabiques para hacer las mediciones con el Vernier.

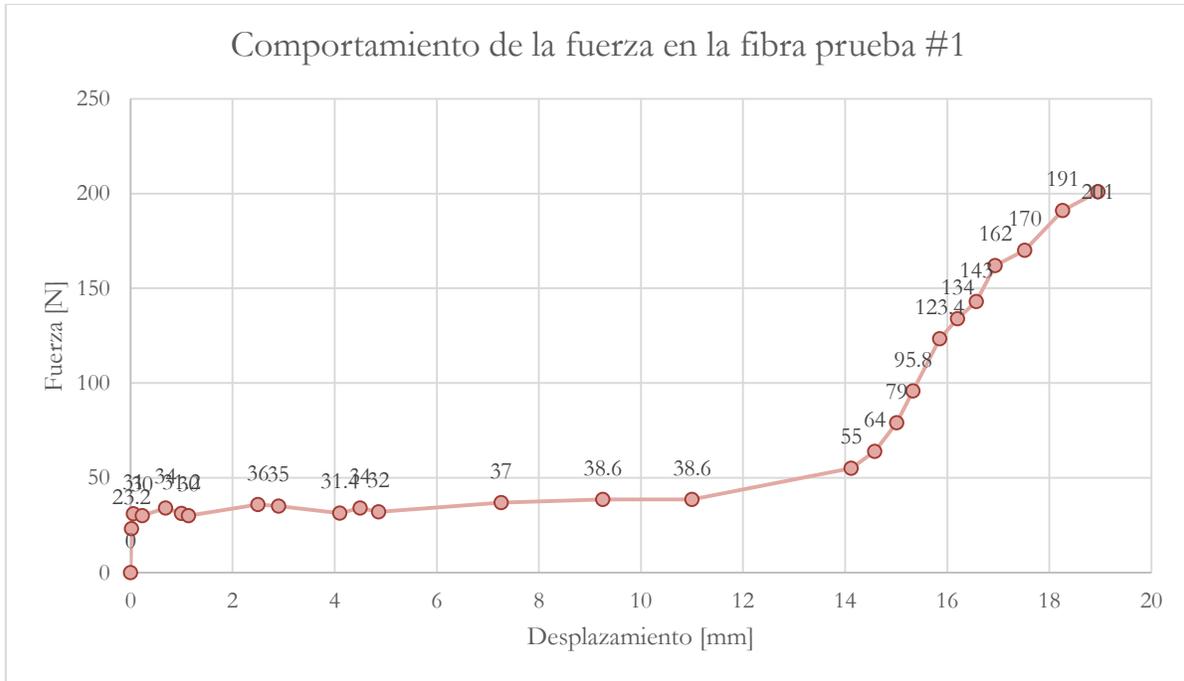


Figura 5.4 Comportamiento de la fuerza  $F$  contra el desplazamiento  $D$  en la fibra en la prueba 1, el pegamento utilizado fue epóxico

A partir de la fuerza  $F=85$  [N] existe un incremento fuerza, este valor de la fuerza  $F$  empieza de un desplazamiento de  $9.6$  [mm] real medido con el Vernier, por lo cual, el desplazamiento final quedo en  $13.2$  [mm], al medir la grieta como tal el desplazamiento fue de  $3.6$  [mm] hasta la rotura de la fibra. En cuanto a la fuerza que llegó a soportar fue de  $201$  [N], hasta un momento antes de su rotura.

### 5.2.2 Ensayo #6

En una segundo prueba se marcó la fibra (figura 5.5) para ver el desplazamiento de la fibra en el pegamento si es que lo había mediante las marcas. Estas estaban cada  $2$  [mm] desde el centro hacia los ladrillos por  $20$  [mm], después eran marcas cada  $10$  [mm] hasta cubrir la distancia lineal de un ladrillo.

## Capítulo 5. Resultados

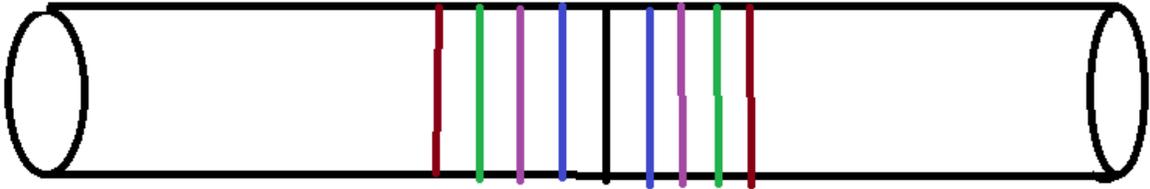


Figura 5.5 Representación de la fibra marcada, marcas hechas por medio de plumones a base de aceite. Siguiendo el patrón de colores

En este caso el comportamiento de la fibra se encuentra en el anexo G, en el apartado del segundo ensayo:

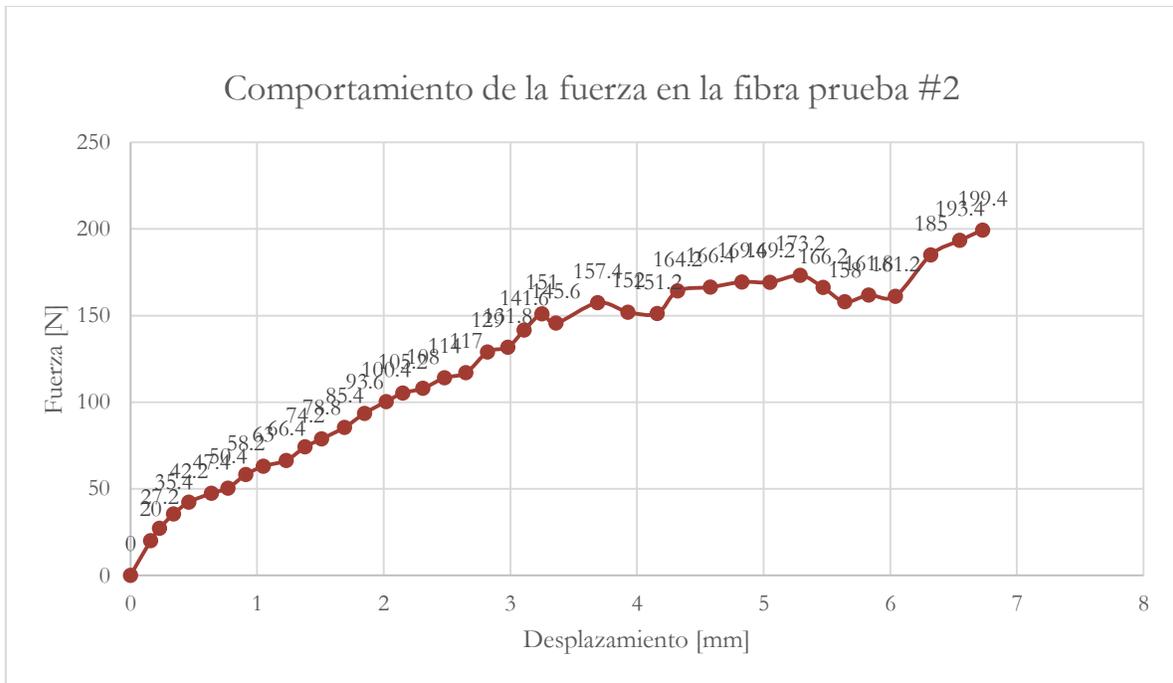


Figura 5.6 Comportamiento de la fuerza la fuerza  $F$  contra el desplazamiento  $D$  en la fibra de prueba #2, el pegamento utilizado fue epóxico.

La rotura de esta fibra se dio en los 199.4 [N] con un desplazamiento de 6.73 [mm].

En este caso, el voltaje medido en el multímetro se fue reduciendo de 4.29 [V] a 3.23 [V] hasta antes de su rotura.

### 5.2.3 Ensayo #7

En la prueba número 3 fue utilizado pegamento acrílico, para que este adquiriera toda su fuerza se dejó por 3 días y en estos se calentaba con una parrilla, además de taparse como papel aluminio para que se conservara el calor en la instalación.

Los resultados de esta experimentación se encuentran en el anexo G, apartado del tercer ensayo.

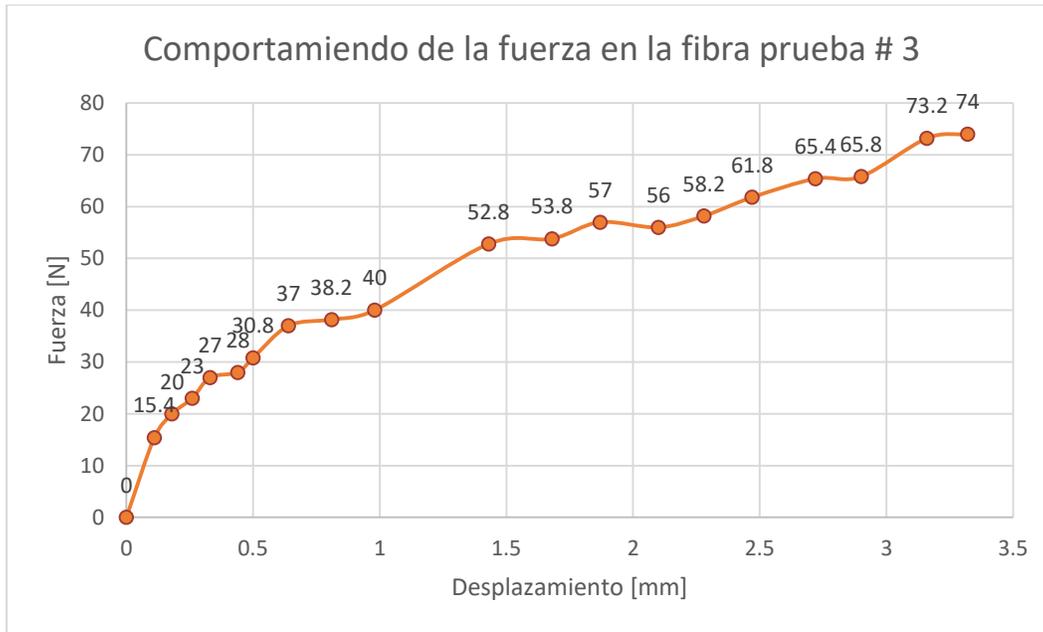
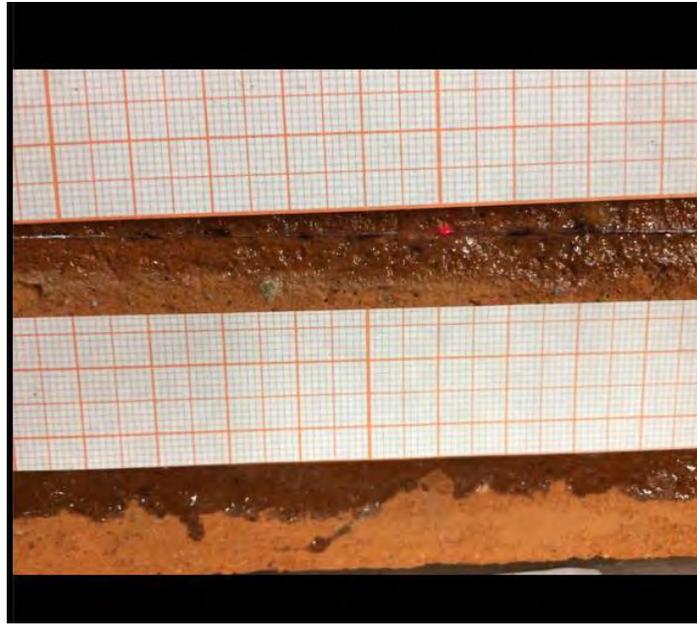


Figura 5.7 Comportamiento de la fuerza  $F$  contra desplazamiento  $D$  en la fibra, prueba # 3, pegamento empleado: acrílico.

En caso de la tercera prueba, la fibra se rompió en medio del ladrillo (figura 5.8), el pegamento no logró anclar completamente la fibra.

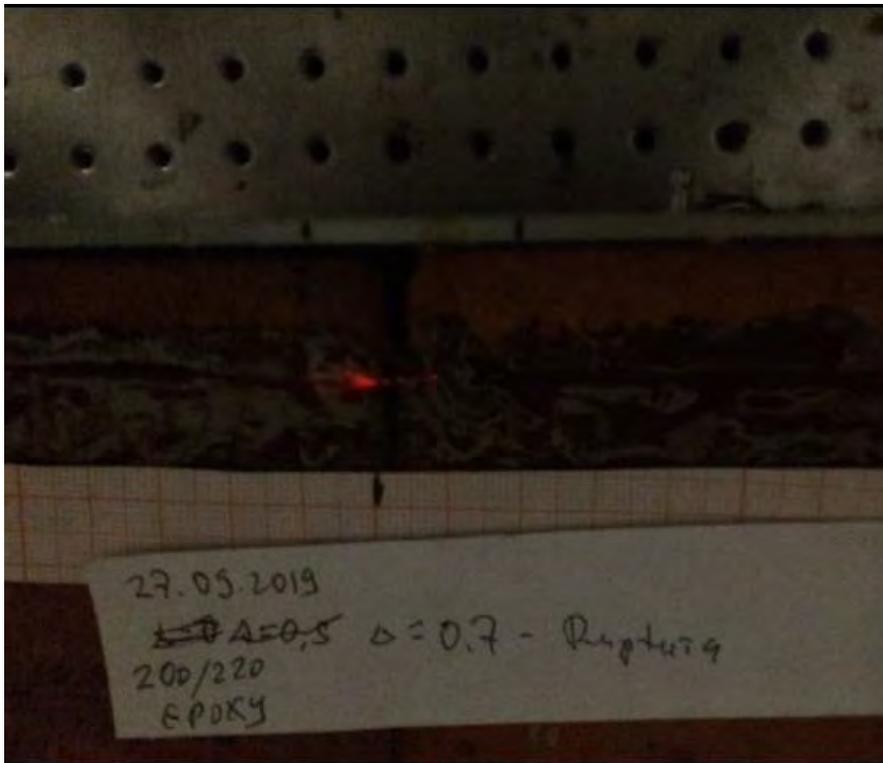


*Figura 5.8 Rotura de la fibra en la mitad del ladrillo*

#### 5.2.4 Ensayo #8

En la prueba 4, se tuvo rotura solo con 0.7 mm de separación en la grieta (figura 5.9), pero este caso fue muy interesante porque a pesar de estar rota la fibra siguió recibiendo señal en el osciloscopio y en el multímetro. La fibra se volvió a acoplar y por ende no se perdió la señal, notamos la rotura pues en la instalación salía la luz del láser por la fibra.

En esta prueba no se obtuvieron datos acerca de la fuerza con la cual se rompió debido a que al aplicar el primer desplazamiento la rotura fue instantánea.



*Figura 5.9 Rotura de la fibra con 0.7 mm de apertura en la grieta, se acoplo nuevamente y así no perdimos la señal en el osciloscopio y en multímetro*

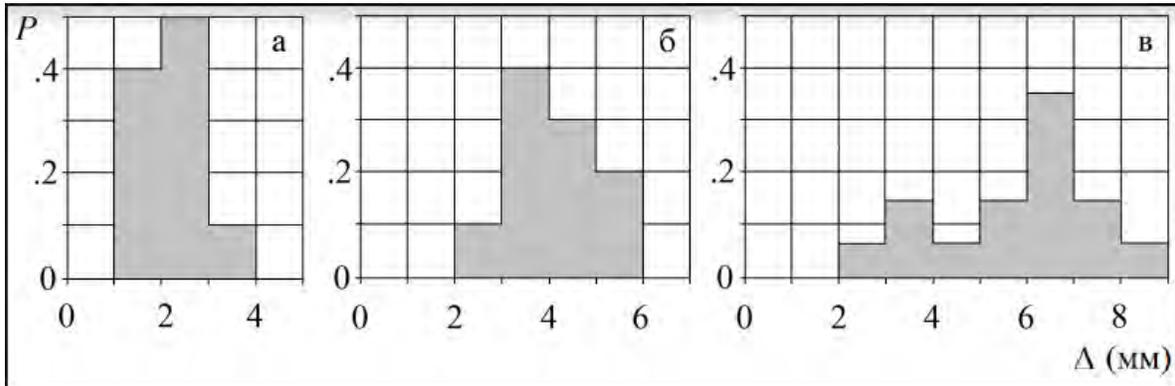
### 5.2.5 Ensayo #9

En la prueba 5, se puso utilizó una fibra con recubrimiento de poliamida, la cual fue adherida a los ladrillos con pegamento epóxico.

Al realizar la prueba, se observó que la fibra se deslizaba dentro del pegamento, por lo cual la rotura de la fibra no se dio. En el anexo D se ve imágenes de esta fibra al ser puesta en la instalación

### 5.2.6 Ensayo #10

Se realizaron pruebas de fibra pegadas a ladrillo con diferentes pegamentos, los resultados son presentados en la figura 5.10. En estos resultados se da una relación entre la apertura de la grieta y la probabilidad de rotura de la fibra en el ensayo.



5.10 De izquierda a derecha se tiene la probabilidad de rotura de a) fibra de 125 $\mu$ m con pegamento epóxico, b) fibra de 220  $\mu$ m de revestimiento y pegamento epóxico, c) fibra de 125 $\mu$ m con pegamento acrílico [1]

La gráfica a) de la figura 5.10 representa datos obtenidos en el trabajo [13].

## 5.3 Pruebas en sistema electrónico

Para las pruebas, se utilizaron los circuitos de las figuras 4.1, 4.2 para el transmisor y 4.5 y 4.6 para el receptor. Por lo cual los siguientes resultados se expresan en dos partes, la parte del transmisor y la parte del receptor.

### 5.3.1 Parámetros de operación de elementos clave del transmisor

Se realizaron pruebas de los circuitos de las figuras 4.1 [14] [15] y 4.2 [30], en donde se tiene un amplificador de clase B que tiene como característica principal tener una ganancia en corriente, esta depende de los valores de resistores utilizados en la configuración.

**Tabla 5.8 Parámetros del transmisor TxA**

$i_{pico}$	$i_{rms}$	$I_{DC}$	$V_{LED}$
<b>0.257 mA</b>	<b>0.183 mA</b>	<b>18.55 mA</b>	<b>1.96 V</b>

Se obtuvo la potencia eléctrica del LED, calculado por medio de las ecuaciones (12), (13) y (14).

$$I_{max}=18.73 \text{ mA}$$

$$I_{prom}=11.92 \text{ mA}$$

$$P_{LED}=23.36 \text{ mW}$$

**Tabla 5.9 Parámetros del transmisor TxB**

$i_{pico}$	$i_{rms}$	$I_{DC}$	$V_{LED}$
<b>7.53 mA</b>	<b>5.33 mA</b>	<b>9.94 mA</b>	<b>1.96 V</b>

$$I_{max}=17.47 \text{ mA}$$

$$I_{prom}=11.12 \text{ mA}$$

$$P_{LED}=21.8 \text{ mW}$$

A pesar de que en el circuito transmisor TxA se tiene una mayor potencia eléctrica a la del circuito de la TxB, la corriente de alterna es mayor en TxB, lo cual buscamos para que el transmisor pueda mandar una señal con amplitud de AC.

Las siguientes gráficas representan las tablas 4.9 y 4.10.

## Capítulo 5. Resultados

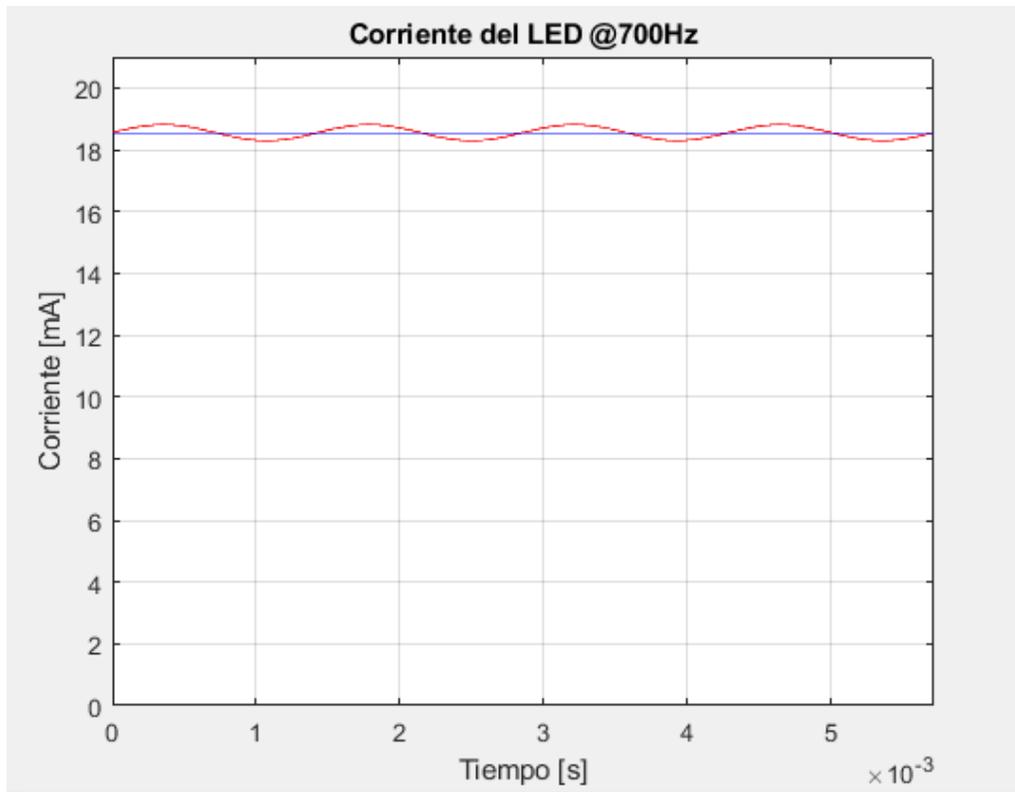


Figura 5.11 Corriente del LED, representación de tabla 4.9

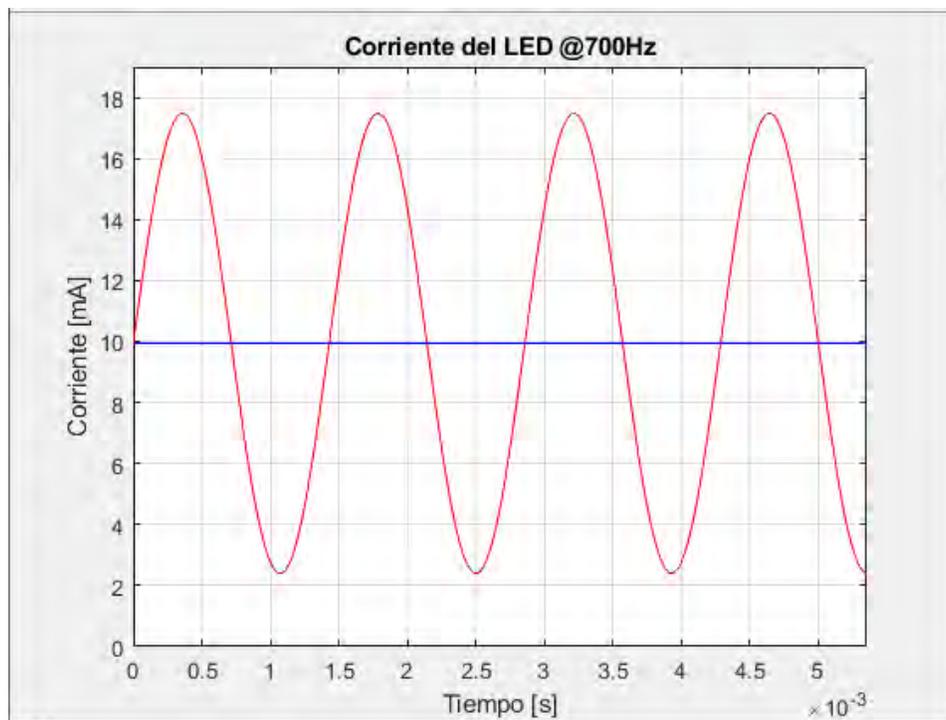


Figura 5.12 Corriente del LED, representación de tabla 4.10

### 5.3.2 Respuesta en frecuencia del receptor

Se utilizó en un principio un generador de señales de marca Stanford Research System con una señal senoidal de amplitud 1 Vpp, esto sin contemplar al foto-receptor (Figura 4.5). Esta señal se fue variando de frecuencia de 100 Hz hasta 50 KHz.

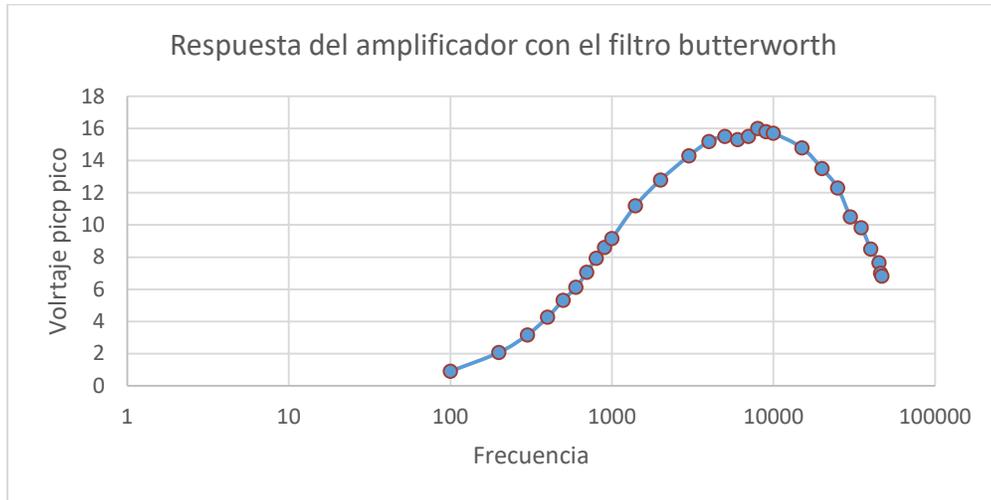


Figura 5.13 Respuesta a la frecuencia del amplificador en el receptor

En la figura 5.13 se aprecia la respuesta del filtro, teniendo su máxima amplitud de 16 Vpp en los 8 KHz y llega a mantenerse a 15.7 Vpp para 10 KHz. Mientras que la marca de los -3 dB's se encuentra alrededor de 46 KHz con un voltaje de 7.66 Vpp. No obstante, el efecto del filtro es de frecuencia altas, lo cual no se ve algún tipo de utilidad más allá de eliminar ruido por señales luminosas de 60 Hz, corroborado en tablas de anexo H.

Siguiendo las pruebas, se inició obteniendo el ancho de banda del foto-transistor. Las siguientes figuras son pruebas realizadas con los transmisores TxA y TxB, con 2 modos de acoplamiento diferentes.

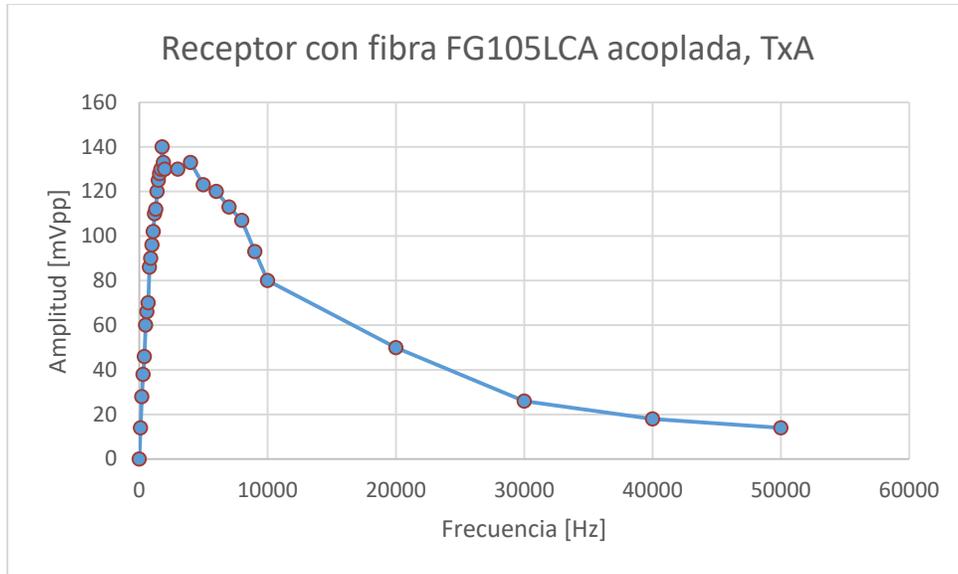


Figura 5.14 Fibra óptica FG105LCA acoplada con receptor con transmisor TxA

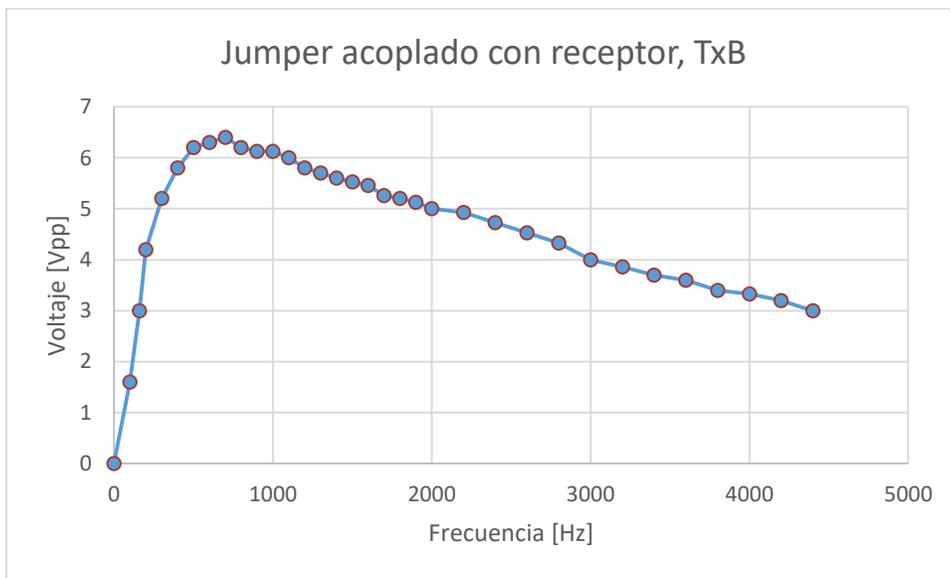


Figura 5.15 Jumper 62.5/125 acoplado al receptor con transmisor TxB

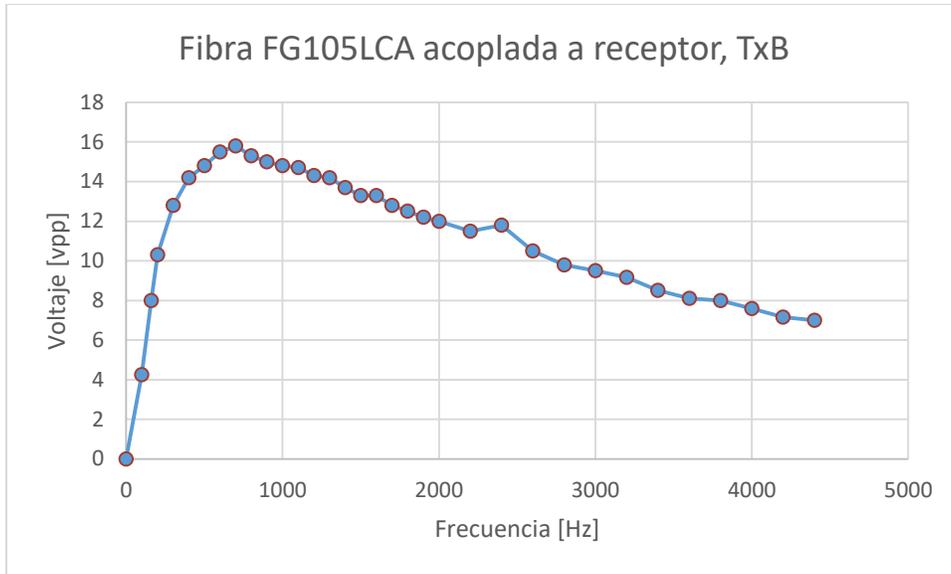


Figura 5.16 Fibra óptica FG105LCA acoplada a receptor con transmisor TxB

En las tres figuras (5.14, 5.15, 5.16) se ven comportamientos similares, las tablas se encuentran en anexo I, el ancho de banda del foto-transistor es de 4040 Hz, esto teniendo en cuenta la caída de señal a -3 dB (anexo I).

Por otra parte, se corrobora que el transmisor TxB tiene mejor desempeño con la fibra, pues en el caso del transmisor de la figura TxA no se obtuvo recepción de señal para el Jumper 62.5/125 en el rango de operación de los otros ensayos, y en las pruebas con la fibra FG105LCA se tuvo una ganancia de voltaje del orden de 39.5 con el transmisor TxB, mientras que utilizando el transmisor TxA la ganancia de voltaje fue apenas de 6, teniendo en cuenta que para TxA llegaba un voltaje amplificar de 20 mVpp, y en caso de TxB llega una señal de 40 mVpp .

Se realizó una última prueba con el transmisor TxB, con una entrada al transmisor de 10 mVpp, en donde se comprobó que tanto el transmisor como el receptor son capaces de enviar y recibir señales con poca magnitud de voltaje y aun así ser funcionales (Anexo I).

Dentro de las pruebas hechas en el apartado de recepción, se calculó la potencia eléctrica en el LED, utilizando el diagrama de la figura 4.6, se midió la corriente en el colector del foto-transistor.

Así mismo se midió voltaje del foto-transistor.

**Tabla 5.10** Parámetros de operación del receptor de la figura 3.19

$i_{pico}$	$i_{rms}$	$I_{DC}$	$V_{FT}$
<b>2.4 <math>\mu A</math></b>	<b>1.7 <math>\mu A</math></b>	<b>14.7 <math>\mu A</math></b>	<b>10.7 V</b>

$$I_{max}=17.1 \mu A$$

$$I_{prom}=10.88 \mu A$$

$$P_{LED}=116.51 \mu W$$

Y el voltaje que recibe la resistencia R2 es de 400 mVpp, el cual es el que amplifica para su lectura a la salida del amplificador operacional.

Por último, se realizaron pruebas con el foto-receptor, modelo PDA100A de Thorlabs (especificaciones en anexo G), se utilizó bajo condiciones controladas, pues si estaba a la expuesto a luz eléctrica existían interferencias haciendo que la señal recibida estuviera montada sobre una señal de 60 Hz. Por lo cual se apagaron luces y se realizaron las pruebas. El diagrama de conexión fue el siguiente:



*Figura 5.17* Diagrama de conexiones para prueba de foto receptor

Se probaron con 4 diferentes formas de onda, con una amplitud de salida de 1 Vpp y una frecuencia de 1 KHz, teniendo en cuenta que en la recepción se tenía una ganancia de 70 dB's debido a que daba la mejor amplitud.

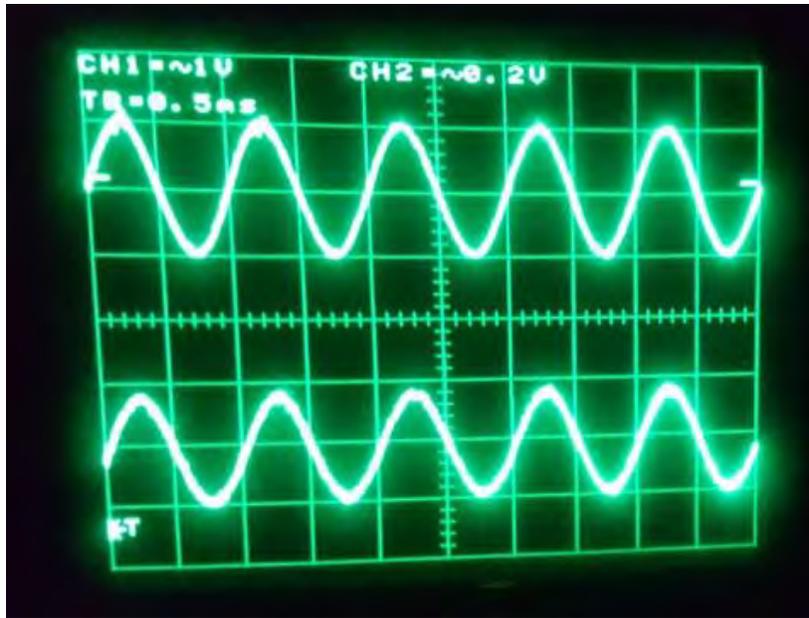


Figura 5.18 Forma de onda senoidal en prueba. Señal superior es la transmitida, señal inferior es la recibida

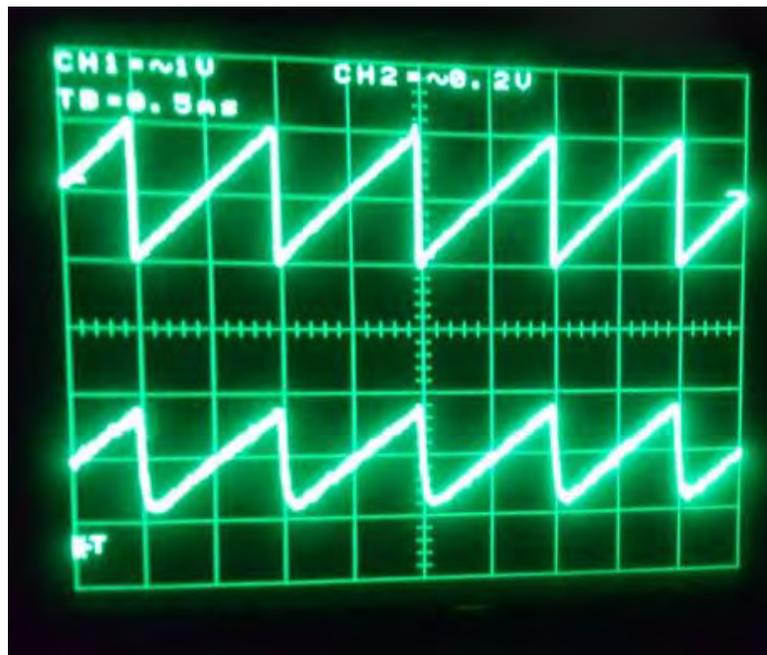


Figura 5.19 Forma de onda rampa. Señal superior es la transmitida, señal inferior es la recibida



Figura 5.20 Forma de onda cuadrada. Señal superior es la transmitida, señal inferior es la recibida

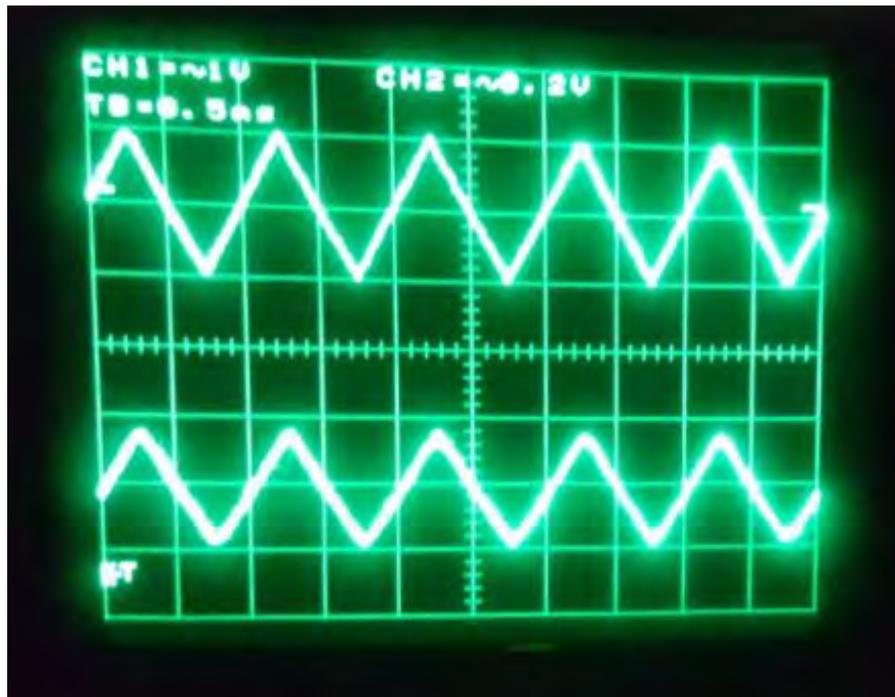


Figura 5.21 Forma de onda triangular. Señal superior es la transmitida, señal inferior es la recibida

En las figuras 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21, se tiene una señal de salida del transmisor de 2 Vpp vista en la parte superior de las figuras, la cual al llegar al foto receptor solo cuenta con una amplitud de 400 mVpp como máximo, aun teniendo la máxima ganancia de 70 dB's en el amplificador de foto receptor, sin embargo, la señal tanto transmitida como recibida, no tienen distorsión lo cual hace posible y viable alguna implementación con este foto receptor. Cabe decir que este carece de un acoplamiento bueno, por lo cual esto causa que la potencia señal recibida no sea la óptima, así que se tendría que buscar un mejor acoplamiento de la fibra con el foto-receptor.

## 5.4 Conclusiones del capítulo

1. En los ensayos de tracción de la fibra adherida a los ladrillos se obtuvo la rotura de la fibra FG200LEA pegada con pegamento epóxico con una fuerza cerca de 200 [N], un valor que sobrepasa las estimaciones teóricas de 170 [N].
2. Utilizando pegamento acrílico y fibra de FG200LEA adherida a los ladrillos, se obtuvo una fuerza de rotura cerca de 74 [N], 59 [N] por debajo de lo estimado en los cálculos teóricos.
3. En el ensayo con fibra FG200LEA y pegamento epóxico sucedió la rotura con poco menos de 48 [N] en medio del ladrillo. Además, a pesar de la rotura de la fibra la transmisión no se cortó. Suponemos que de alguna forma los núcleos de las dos partes de la fibra óptica rota se acoplaron ópticamente, así que la señal siguió llegando al foto-receptor.
4. Se descartó el uso de pegamento acrílico en los siguientes ensayos, debido a su proceso de curación, pues este debe ser hecho con factores ambientales muy controlados, los cuales no son logrados fácilmente.
5. Utilizando fibra óptica con recubrimiento de poliamida adherida a los ladrillos con pegamento epóxico, se observó deslizamiento dentro del pegamento con lo cual no ocurrió una rotura incluso después de una separación de ladrillos de 20 mm.
6. En las pruebas hechas en el modo de tracción directa realizadas con las fibras FG105LCA y AFS50/125Y, se obtuvo una fuerza de rotura mayor a la estimada siendo la estimada de 52 [N]. En caso de la fibra FG105LCA se obtuvo una media de fuerza de rotura de 60 [N] y un valor medio de 69 [N] para la fibra AFS50/125.
7. Por parte de las pruebas con la fibra FGLEA200, los resultados estuvieron dentro de los estimados entre 110 [N] y 180 [N], aunque existieron ensayos que sobrepasaron estas fuerzas, llegando a una fuerza de rotura máxima de hasta 204 [N].

## Capítulo 5. Resultados

8. Para la fibra SMF 28, se obtuvo valores de fuerza de rotura semejantes entre sí, teniendo una desviación estándar de aproximadamente 7 [N] y teniendo un valor medio de fuerza de rotura de 89 [N].
9. En prueba de dos configuraciones de transmisión citados como TxA y TxB, se obtuvo la potencia del LED en el orden de 20 [mW] de potencia eléctrica.
10. Se obtuvo TxA tiene una corriente alterna de 0.2 [mA] pico en comparación de 7.5 [mA] pico de TxB, lo cual ayuda a tener una señal transmitida de mayor magnitud y esto mismo provoca una señal recibida de mayor magnitud.
11. Se comprobó que el filtro utilizado en el receptor, es de tipo paso altas con aplicación a eliminar señales de 60 [Hz], lo cual en caso del circuito receptor no es necesario pues la señal llega sin distorsión. Además de obtener que el filtro tiene un ancho de banda de 44 [KHz].
12. En caso del receptor, se comprobó que el ancho de banda de este es de 4 [KHz] aproximadamente, y que este funciona mejor o peor según el acoplamiento de la fibra óptica, llegando a tener una señal recibida de hasta 15.8 [Vpp].
13. Utilizando otro modelo de foto receptor con amplificador incorporado PDA100, se obtuvo que puede trabajar con diversas formas de onda, sin distorsión del orden de 40 [mVpp] con el amplificador configurado con ganancia de 70 [dB].
14. En caso de utilizar el fotoreceptor PDA100 se vería más viable el uso del filtro Butterworth pues a este foto-receptor le afecta la señal de 60 [Hz] de la luz ambiental.

## Capítulo 6. Conclusiones generales

1. Se constató que las fibras ópticas tienen una fuerza de rotura mayor a la que arrojaron los cálculos teóricos realizados en el capítulo 3 de esta tesis, la posible causa de esta diferencia podría ser debido al proceso de fabricación de las fibras ópticas y el proceso de rotura de fibra en el laboratorio.
2. Las fibras no necesariamente dejan de transmitir al estar rotas, creemos que es debido a que la fibra óptica se rompe en el núcleo-revestimiento, dejando la parte del recubrimiento intacto por lo cual no causa la pérdida de toda la potencia dentro de la fibra, y teniendo los ángulos correctos dentro del revestimiento y el pegamento epóxico se consigue seguir transmitiendo la señal dentro de la fibra.
3. Un estudio comparativo de eficacia de dos pegamientos diferentes en la presente aplicación, reveló que las fibras ancladas con pegamento acrílico tienden a dejar la fibra expuesta y no la adhiere de manera correcta a la superficie. Además, el proceso de curado del pegamento acrílico es demandante debido a temperatura alta necesaria y tiempo largo de secado.
4. Para anclar las fibras a la superficie del ladrillo que se quiere monitorear la mejor opción es el pegamento epóxico, da mayor agarre a la superficie y mejor protección a la fibra óptica dentro del pegamento, esto al ser espeso, aunado a que el proceso de curado es sencillo.
5. Las fibras ópticas mayormente utilizadas en este proyecto de tesis han sido con recubrimiento de acrílico, y se ha tenido un mejor anclaje con pegamento epóxico. En cuanto a las fibras con recubrimiento de poliamida (Nylon), no se han logrado anclar, creemos que es debido a los coeficientes de fricción que tiene el nylon con las superficies, el cual es bajo, haciendo al material liso y muy complicado de adherir a cualquier superficie.
6. Algunos resultados de las investigaciones científicas realizadas en el apartado de fuerza de rotura de fibra óptica adherida a ladrillos se publicaron en forma de artículo en la revista Journal of Optical Technology.

7. En el modo de tracción directa fue imposible romper alguna fibra óptica de recubrimiento de nylon, ya que no se logró anclar por medio de fricción a los cilindros de la instalación.
8. Realizando las pruebas en la parte electrónica, en el transmisor se comprobó que el tipo óptimo de polarización para la etapa de amplificación es el seguidor emisor, pues da ganancia de corriente con lo cual se alimentan los LED's y adquieren mayor intensidad luminosa debido al incremento en la corriente alterna del LED.
9. En la recepción, comprobamos que el ancho de banda del filtro Butterworth es de 44.2 [KHz], y que obedece a un filtro paso altas, con utilidad para eliminación de señales de 60 [Hz].
10. En el fototransistor comprobamos el ancho de banda con fibra acoplada de 4 [KHz], que va desde los 160 [Hz] hasta los 4.4 [KHz], con pico de ganancia en 700 [Hz].
11. La amplitud de señal recibida en los fototransistores depende del acoplamiento que se tenga entre la fibra y el transmisor que se utilice.
12. Se comprobó que se puede tener una alternativa de foto receptor con base en foto-transistor al emplear el foto-receptor PDA100A, pues en pruebas se observa que el voltaje de salida del foto-receptor PDA100A es de 400 mVpp con una ganancia configurada de 70 dB y que la onda recibida no tiene distorsión.

## Referencias

- [1] A. Hurtado de Mendoza L, S. Khotiaintsev, H. J. Guzman-Olguin, D. A. Hernandez-Reyes, J. A. Lopez-Mancera y M. A. Zuñiga-Bravo, «Application of optical fibers with silica core and cladding, and plastic coating as indicators of cracking in brick masonry,» *Journal of Optical Technology*, vol. Vol. 3, n° Issue 2 (in print), 2020.
- [2] A. H. Cherin, *An Introduction to Optical Fibers*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1983.
- [3] K. S. Kuang y W. J. Cantwell, «Real-Time Damage Detection in Thermoplastic-Based,» *POLYMER COMPOSITES*, pp. 603-618, 2002.
- [4] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [5] Newport Corporations, «Tutorial: Fiber optics basics,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>.
- [6] Fluke Networks, «Series 101: Multimode vs. Singlemode,» 30 Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/series-101-multimode-vs-singlemode>.
- [7] J. E. Midwinter, *Optical Fibers for Transmission*, United States: John Wiley & Sons, Inc. , 1979.
- [8] «Test and Measurement world,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.test-and-measurement-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-Step-Index-and-Graded-Index-Fiber.html>.
- [9] TeleGeography, «Submarine Cable Map,» 29 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.submarinecablemap.com/#/> .
- [10] H. Hu, F. Da Ros y M. e. a. Pu, «Single-source chip-based frequency comb enabling extreme parallel data transmission,» *Nature Photon* 12 , pp. 469-473, 2018.
- [11] C. I. Merzbacher, A. D. Karsey y E. J. Friebele, «Fiber optic sensors in concrete: A review,» *Smart Mater, Struc* 5, pp. 196-208, 1996.
- [12] J. M. López-Higuera, *HANDBOOK OF OPTICAL FIBRE SENSING TECHNOLOGY*, Wiltshire: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

## Referencias

- [13] A. Hurtado de Medoza L., «Las fibras ópticas como testigos de agrietamiento en la mampostería de tabique,» Tesis de Maestría, UNAM, Ciudad de México, 2019.
- [14] J. E. González T., «Redes de fibra óptica de monitoreo de salud de estructuras,» Tesis de Doctorado, UNAM, Ciudad de México, 2018.
- [15] J. E. González T., «Sistema optoelectrónico de interrogación de arreglos de sensores de fibras ópticas,» Tesis de Maestría, UNAM, Ciudad de México, 2013.
- [16] I. Ramírez S., «Fibras ópticas con rejillas de Bragg en el monitoreo de estructuras,» Tesis de Licenciatura, UNAM, Ciudad de México, 2014.
- [17] Z. D. Jastrzebski, Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería, Interamericana, 1979.
- [18] Jihan Liangong testing technology Co., Ltd. , «Universal CMT-50 Control de computadora máquina universal de ensayos,» 15 Enero 2020. [En línea]. Available: <http://www.testermachine.com/testermachinecom/content/?127.html>.
- [19] V. L. Carmona, «Curvas de esfuerzo-deformación,» Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://psmpprocesos.blogspot.com/2016/02/curva-de-esfuerzo-y-deformacon.html>.
- [20] Escuela colombiana de Ingeniería, «Ensayos de tensión. Protocolo,» 2011. [En línea]. Available: [https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9026\\_tension.pdf](https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/9026_tension.pdf).
- [21] G. Keiser, Optical Fiber Communications, United States: McGraw-Hill, 1991.
- [22] Mecanizados Sinc., «Características y aplicaciones del Nylon y del teflón para los mecanizados,» 12 Noviembre 2019. [En línea]. Available: : <https://www.mecanizadossinc.com/caracteristicas-aplicaciones-nylon-y-teflon-mecanizados/>.
- [23] W. W. Hines, D. C. Montgomery, D. M. Goldsman y C. M. Borrer, Probability and Statistics in Engineering, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [24] Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", «UCA,» [En línea]. Available: <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2019.pdf>.
- [25] M. T. Todinov, «Is Weibull distribution the correct model for predicting probability of failure initiated by non-interacting flaws?,» *International Journal of Solids and Structures*, pp. 887-901, 2009.

## Referencias

- [26] D. Krohn y A. Méndez, «Fiber Optics Sensors Standars Report,» IEEE, New York, 2017.
- [27] Photonics, «Fiber Optics: Understanding the Basics,» [En línea]. Available: [https://www.photonics.com/Articles/Fiber\\_Optics\\_Understanding\\_the\\_Basics/a25151](https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151).
- [28] C. P. Chen y T. H. Chang, «Fracture mechanics evaluation of optical fibers,» *Materials Chemistry and Physics* 77, pp. 110-116, 2002.
- [29] R. Romaniuk, «Tensile strength of tailored optical fibers,» *Optoelectronics Review*, pp. 101-116, 2000.
- [30] J. A. Juárez M., «Sistema de monitoreo de una red óptica de sensores,» Tesis de Maestría, UNAM, Ciudad de México, 2020 en proceso.

## Anexos

Anexo A. Artículo [1]: Journal of Optical Technology (OSA, Optical Society of America), 1 February 2020, Volume 87, Issue 2, pp. xx-yy (in print)

**Application of optical fibers with silica core and cladding, and plastic coating as indicators of cracking in brick masonry**

A. Hurtado de Mendoza-Lopez, S. Khotiaintsev, H. J. Guzman-Olguin, D. A. Hernandez Reyes, J. A. Lopez-Mancera, M. A. Zuñiga-Bravo.

Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.

E-mail: [sergeikh@unam.mx](mailto:sergeikh@unam.mx)

Keywords: fiber optic fibers, optical fibers, fiber optic sensors, building structures, masonry cracking

Codes OCIS: [120.0120](#), 060.2370, 060.2400

Fiber optic fibers can be used as indicators (witnesses) of the appearance of cracks in brick masonry. In this article, we study the relationship between the type and size of the fiber and the crack opening in which the fiber is broken. This relationship has been experimentally investigated by physically modeling the opening of cracks in a special bank. Two sizes of multimode optical fibers with a core and a silica cover and a polymethyl methacrylate (acrylic) coating were studied in detail. The results can be useful for the practical implementation of this method in the form of automatic optoelectronic crack detection systems in buildings and brick structures.

### Introduction

The appearance and growth of cracks in building structures is a dangerous phenomenon, fraught with serious consequences. Therefore, timely detection of cracks in buildings and structures is of great practical importance [1]. In particular, masonry structures are very common throughout the world. However, traditional means and methods for observing cracks in building structures are laborious and do not allow automation of crack detection [2].

There is no consensus yet among civil engineers about the significance and danger of cracks of varying widths in building structures. In relation to the effects of earthquakes, it is believed that cracks in masonry with a width of less than 0.2 mm are not significant (class I).

Cracks with a width of 0.2 mm to 1 mm, 1 mm to 3 mm, more than 3 mm and more than 3 mm in combination with other injuries are classified as classes II, III, IV and V, respectively, where class V corresponds to the most severe damage, up to complete destruction of the structure [3]. Of greatest interest for practice is the early detection of cracks of class II - IV, since such information allows timely appropriate measures to be taken and thereby avoid more serious consequences.

One of the simple and reliable methods for indicating the appearance of cracks is the breaking of a fiber waveguide mounted on a structure or built into it [4-7]. The optical fiber plays the role of a destructible “witness” of crack opening beyond a certain threshold value (Fig. 1).



Fig. 1. The fracture and glow of the optical fiber, fixed with epoxy adhesive on a brick wall, due to the appearance of a crack in it (photo).

The advantages of fiber optic fibers in this application are their insensitivity to electromagnetic interference and interference, lightning discharges, stray electric currents and potentials of different nature, as well as resistance to chemical corrosion. These factors make it very difficult to use electrical and electromechanical measuring instruments at buildings and structures, especially large ones, with spaces exposed to atmospheric influences, etc. Another advantage of fiber optical fibers is the ability to create measuring networks of various topologies and with the help of appropriate optical electronic systems automatically detect damage to buildings and structures.

In our previous work [8], we described a successful experiment to detect cracking of a brickwork column using a set of optical fibers as witnesses for cracking. The “witness method” is inherently intended to indicate a violation of the integrity of objects and objects. At the same time, it is important to know at what width of the crack aperture there is a rupture of a fiber of one type or another type and size. Therefore, the goal of this work was to study the quantitative relationship between the parameters of the fiber used as a witness to cracking and the magnitude of the crack opening in masonry at which this type of fiber is broken.

In our previous work [8], we described a successful experiment to detect cracking of a brickwork column using a set of optical fibers as witnesses for cracking. The “witness method” is inherently intended to indicate a violation of the integrity of objects and objects. At the same time, it is important to know at what width of the crack aperture there is a rupture of a fiber of one type or another type and size. Therefore, the goal of this work was to study the quantitative relationship between the parameters of the fiber used as a witness to cracking and the magnitude of the crack opening in masonry at which this type of fiber is broken.

### **Materials and methods**

The technique described here for detecting cracks in building structures made of masonry consists of using fiber optic fibers in the form of groups, arrays, or networks placed on a structure according to a certain geometric pattern and fixed to its surface with glue. In the event of a crack in the structure that crosses the optical fiber, this fiber breaks when the crack opens over a certain limit width. The rupture of the optical fiber leads to a sharp decrease in its optical transmittance, which is automatically detected by the appropriate equipment and indicates the presence of a crack.

We investigated the operation of a fiber waveguide in such an application experimentally. The occurrence of a crack in the brickwork was modeled on a special stand (the layout of the stand is shown in Fig. 2). The crack width was measured at which the test fiber was broken.

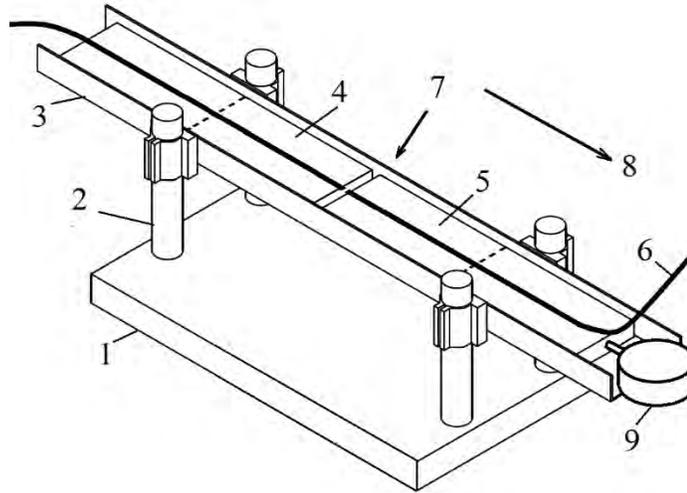


Fig. 2. Scheme of the experimental stand. 1 - base, 2 - supports, 3 - guides, 4 - test samples of ceramic brick, fixed group, 5 - test samples of ceramic brick, moving group, 6 - test fiber light guide, 7 - simulated crack, 8 - direction of movement of moving samples, 9 - displacement sensor.

1. Optical fibers. We investigated the possibility of using optical fibers with a silica core and cladding and an external coating of polymethyl methacrylate (acrylic), polyamide (capron) and fluoropolymer (teflon). The last two polymers are known for low adhesion between them and other materials, however polyamides and fluoropolymers are more resistant to external influences than acrylic. Therefore, fibers with a polyamide and fluoropolymer coating have also been tried in this application.

All optical fibers were glued to the surface of ceramic bricks with epoxy glue, which is widely used in construction for fixing various sensors, etc. on the surface of masonry. The experiment showed that a fiber waveguide coated with acrylic and a quartz core with a diameter of up to 220  $\mu\text{m}$ , glued to a length of 50 mm or more, is firmly held on the surface of a ceramic brick with the application of longitudinal tensile force and its increase until the fiber breaks. In contrast, fiber optic fibers coated with polyamide and fluoropolymer glued up to 450 mm in length, despite squeezing with a cured epoxy adhesive, slipped through it with a longitudinal force of only a few Newtons.

Therefore, fibers coated with polyamide and fluoropolymer were excluded from further consideration. All further studies were carried out with silica / silica / acrylic fiber optic fibers

of two sizes: A) with a core, cladding and external coating with diameters  $d_1 = 50 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 125 \mu\text{m}$  and  $d_3 = 250 \mu\text{m}$ , respectively; B) with a core, shell and external coating with diameters  $d_1 = 200 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 220 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 350 \mu\text{m}$ , respectively.

These fibers are multimode, with a core made of pure silicon dioxide, a fluorine-doped silicon dioxide sheath, and an outer acrylic coating. Both the core and the cladding have a low concentration of hydroxyl ions (OH<sup>-</sup>), which contributes to high transparency in the visible and infrared spectra (wavelength  $400 \text{ nm} < \lambda < 2400 \text{ nm}$ ). The numerical aperture of the HF and the optical loss of optical fibers of both sizes are almost identical:  $\text{NA} = 0.22$  and  $\alpha = 8 \text{ dB / km}$  at a wavelength of  $\lambda = 808 \text{ nm}$ , respectively.

We used multimode rather than single-mode fibers, firstly, because in this application the bandwidth of the optical signals is very small, and therefore the broadband of single-mode fibers gives no advantages here. Secondly, the tensile strength of a fiber with a quartz core and cladding is determined by the cladding diameter  $d_2$ . This is due to the fact that in the fiber optic fibers under consideration, the quartz core and cladding are structurally uniform and form a monolithic quartz core. The core and cladding differ only in the degree of doping with impurities, which create some difference in their refractive index, which is necessary for the existence of a fiber. A much more flexible and less durable external plastic coating does not have a practical effect on the strength of the optical fiber.

As is known, the minimum standard sheath diameter is the same for single-mode and multimode fiber optical fibers:  $d_2 = 125 \mu\text{m}$ . Larger sheath diameters  $d_2$  are provided by standards only for multimode fiber optical fibers. So, a significantly different tensile strength, which is of interest for detecting cracks of different widths, can only be found among the existing range of multimode fiber optical fibers with different cladding diameters  $d_2$ .

As for other important differences between single-mode and multimode optical fibers, due to the relatively large core diameter of multimode optical fibers, their sources of radiation can be LEDs or IR emitting diodes instead of lasers, which are necessary in the case of single-mode optical fibers. This greatly simplifies and reduces the cost of all optical-electronic equipment designed to detect cracks, and is an advantage of multimode fibers compared to single-mode fibers, including the implementation of a fiber-optic version of the "witness method".

2. Adhesives. Due to the lack of specific recommendations in the literature on bonding acrylic with ceramics, we tested the following options:

A) Two-component epoxy adhesive, which is a thermosetting polymer, cured by mixing with the catalyst. We used this glue for fixing optical fibers to the surface of masonry in our previous work [8]. However, when the length of the adhesive joint is less than 50 mm, when a longitudinal force is applied, the optical fiber noticeably slid in the adhesive layer. Another disadvantage of epoxy glue is that its components must be mixed in small doses immediately before use, which is laborious and inconvenient.

B) One-component acrylic adhesive, which is a solution of methyl methacrylate in dichloromethane. This glue was chosen due to the identity of its main substance and the coating material of the fiber, which allowed us to expect partial dissolution of the acrylic shell in dichloromethane and good adhesion between the adhesive layer and the fiber coating.

3. Bricklaying. An ordinary ceramic clay brick of 229 x 110 x 25 mm in size was used. The masonry was modeled with four bricks installed in one row on a specially designed stand, schematically shown in Fig. 2.

The stand is mounted on a steel base 1, where two guides 3 are made on four supports 2, made of metal corners with a cross section of 20 x 40 mm and a length of 1 m. Four ceramic bricks 4 and 5 imitating masonry are installed on these guides in one line. The test fiber 6 is glued to all four bricks in the middle. Two left ones according to the scheme of brick 4 are fixed motionless, and a group of their two right 5 can be moved in the longitudinal direction (indicated by arrow 8) using a mechanical drive (not shown in Figure 2). Moving the right group leads to an increase in the gap between the left and right group of bricks, which simulates the opening of a crack in the brickwork.

Fiber optic gluing. The upper surface of the bricks was cleaned with a wire brush with a bar diameter of 0.3 mm, and the dust was removed. A section of the fiber optic under test with a total length of 3 m was located on the bricks, along their mid-longitudinal line. On top of the fiber, manually using a spatula, glue was applied with a strip 10 mm wide. In the case of epoxy glue, the prepared sample was kept for 24 hours at a temperature of + 24 ° C for complete polymerization of the glue. In the case of acrylic glue, the sample was kept for 48

hours at a temperature of + 60 ° C, for complete drying of the solvent and gaining the adhesive strength of the nominal strength.

Testing. The ends of the optical fibers were cleaved at right angles, and one connected to an optical radiation source, and the other to a photodetector. To simplify the introduction of radiation into the fiber, the source was a helium-neon laser with a power of 1 mW, a radiation wavelength  $\lambda = 633$  nm, a beam diameter of 0.48 mm and a beam divergence of 1.7 mrad. The radiation was modulated in intensity by a mechanical modulator and focused using a lens on the core of the fiber. The photodetector output signal level was measured with a multimeter and was observed on an oscilloscope. In addition, when a fiber was torn, the fact and place of the tear were observed visually and photographed.

Two movable bricks 5 moved together at a constant speed of 0.2 mm / s. In this case, their displacement was measured (equal to the width of the simulated crack  $\Delta$ ), at which the test fiber was broken.

### Results

The experimental results are shown in Fig. 3 for three tested combinations of fiber size and type of glue. These results are presented in the form of histograms of the probability of rupture of the fiber waveguide  $P$  from the crack width  $\Delta$ . In the table. Figure 1 shows the main statistical characteristics of the experimental data: spread (range)  $W = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ , where  $\Delta_{\max}$  and  $\Delta_{\min}$  are the maximum and minimum values of the crack width  $\Delta$ , respectively; the arithmetic average of the crack width at which the fiber was broken  $A = (\Delta_1 + \dots + \Delta_n) / n$ , where  $\Delta_i$  is the measured partial value of the crack width  $\Delta$ ,  $n$  is the number of measurements; standard deviation  $\sigma = \sqrt{((\Delta_1 - A)^2 + \dots + (\Delta_n - A)^2) / n}$ .

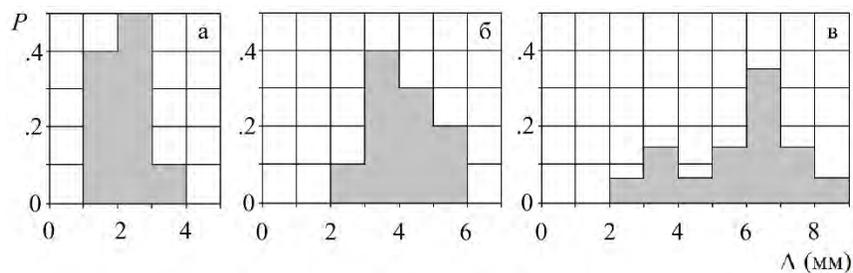


Fig. 3. The probability of rupture of the fiber waveguide  $P$  depending on the crack width  $\Delta$  for successive intervals of a width of 1 mm each: a - fiber waveguide with  $d_2 = 125$   $\mu$ m,

epoxy glue; b - fiber optic fiber with  $d_2 = 220$  microns, epoxy adhesive; c - fiber optic fiber with  $d_2 = 125 \mu\text{m}$ , acrylic adhesive.

**Table 1. The main statistical characteristics of the experimental data.**

Statistical characteristics	Diameter of the silica thread of the optical fiber, $d_2$		
	125 $\mu\text{m}$	220 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$
	Adhesive type		
	Epoxy	Epoxy	Acrylate
Number of tests	10	10	14
Range, $W$ (mm)	2.38	3.53	5.45
Arythmetic mean, $A$ (mm)	2.11	4.08	5.83
Standard deviation, $\sigma$ (mm)	0.81	0.59	1.63

As follows from the table 1, when using epoxy adhesive, the breakdown of a fiber with a quartz core with a diameter of  $d_2 = 220 \mu\text{m}$  occurred at a crack width  $\Delta$  approximately two times larger than in the case of a fiber with a core diameter of  $d_2 = 125 \mu\text{m}$ . This difference is explained by a significantly larger (3, 1 time) by the cross section of a quartz core and, accordingly, a higher tensile strength of a fiber with a quartz core with a diameter of  $d_2 = 220 \mu\text{m}$ .

It is noteworthy that epoxy and acrylic glue give significantly different results with the same fiber light guide (with a sheath with a diameter of  $d_2 = 125 \mu\text{m}$ ). In the case of acrylic adhesive, the scatter of the crack width  $W$ , the arithmetic mean of the crack width  $A$ , and the standard deviation of the crack width  $\sigma$  are much larger than when using epoxy glue (2.3, 2.8, and 2 times, respectively). We assume that the arithmetic mean of the crack width is  $A$

□

5.83 mm and the spread of the crack width  $W \approx 5.45$  mm obtained with acrylic adhesive are excessively large for reliable detection of cracks of smaller width (cracks II – IV classes), which are most important for practice. For this reason, we believe that the one-component acrylic adhesive we tested is not suitable for use in this crack detection method using fiber optic fibers.

The difference in the results obtained with the two types of glue can be explained by both weak adhesion between the acrylic adhesive and ceramics, and the lower viscosity of the acrylic adhesive when applied, compared with epoxy. Therefore, acrylic glue is quickly and strongly absorbed into the pores of ceramic bricks, and the glue film, which eventually forms on the surface, turns out to be thin and heterogeneous in thickness and width. In contrast, freshly prepared epoxy adhesive is very viscous and therefore easier to apply with a strip of uniform thickness and width over a fiber light guide placed on the surface of a ceramic brick. As a result, the epoxy adhesive layer is thick and uniform, and as a result, it holds the fiber light guide better than acrylic adhesive.

### **Conclusions**

We investigated experimentally the use of fiber optic fibers with a quartz core and a cladding and coating of some polymers as indicators (witnesses) of the appearance of cracks in the masonry of building ceramic bricks. The results obtained allow us to draw the following conclusions:

1. Quartz fiber optical fibers with an external acrylic coating are well held on the surface of ceramic bricks with epoxy glue. These fiber waveguides break when a crack in a masonry is opened in excess of a few millimeters. These properties make it possible to use them as reliable indicators of cracking of building structures from masonry.
2. One-component acrylic adhesive: a solution of methyl methacrylate in dichloromethane is not suitable for use in the present crack detection method.
3. Fiber optic fibers with an external coating of polyamide (kapron) and fluoropolymer (teflon) do not adhere well to epoxy glue (and, as far as is known, to other adhesives) and therefore are not suitable for use in the present crack detection method.
4. Using quartz fiber optical fibers with an external acrylic coating and a quartz core with a diameter of 125 and 220  $\mu\text{m}$ , it is possible to determine the appearance of cracks of class III

and IV in the masonry of ceramic brick, which corresponds to medium and heavy damage, respectively.

5. It can be assumed that using fiber optic fibers coated with acrylic and a different diameter of a quartz core, cracks of larger and smaller widths can be detected, compared with the values obtained in this work.

This work was supported by the National Autonomous University of Mexico (Universidad Nacional Autonoma de Mexico) [grant DGAPA - PAPIIT IT101618].

## REFERENCES

1. *Dobromyslov A.N.* Diagnosis of damage to buildings and engineering structures. 2nd ed. M.: Publishing House of the Association of Building Universities, 2008. 304 p.
2. *Rodriguez M., Castrillon E.* Manual de evaluacion postsismica de la seguridad estructural de edificaciones // Informe № 569. Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico. 1995. 84 P.
3. *Schwartz V.M., Ivannikov V.V., Nikolaev A.G., Ryabov O.B., Stepanov V.N.* Cracks in the brick walls of buildings. Diagnostics, repair, amplification // Chemical Engineering. 2015. No. 10. C. 22-25.
4. *Hale K.F., Hockenhull B.S., Christodoulou G.* The application of optical fibres as witness devices for the detection of plastic strain and cracking // Strain. 1980. V. 16. № 4. P. 150–154.
5. *Balageas D., Bourasseau S., Dupont M., Bocherens E., Denynter-Marty V., Ferdinand P.* Comparison between non-destructive evaluation techniques and integrated fiber optic health monitoring systems for composite sandwich structures // J. Intelligent Material Systems Structures. 2000. V. 11. P. 426-437.
6. *Khotiaintsev S., Beltran-Hernandez A., Gonzalez-Tinoco J.E.* Structural health monitoring of concrete elements with embedded arrays of optical fibers // Proc. SPIE. 2013. V. 8695. P. 1–6.

7. *Gonzalez-Tinoco J.E., Martinez-Gonzalez D.M., Miron-Carrasco J., Khotiaintsev S., Guzman-Olguin H.J., Lopez-Bautista M.C., Zuñiga Bravo M.A., Ovando-Shelley E., Sanchez-Ramirez A.R.* Specialized optical fibre sensor array for structural damage detection // 10th IEEE/IET International Symposium on Communications Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP'16). 2016.
8. *Gonzalez-Tinoco J.E., Khotiaintsev S., Lopez-Bautista M.C., Timofeev V.I., Vountesmery Yu.V.* Arrays of optical fibers as detectors of cracks in brick structural elements // IEEE 38<sup>th</sup> International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2018. P. 717–720.

## Anexo B. Especificaciones de fibra óptica SMF28



### Single Mode Fiber with Ø900 µm Hytrel Jacket



**SMF-28-100**

### Description

Thorlabs' single mode SMF-28-100 fiber jacketed with Ø900 µm yellow Hytrel tubing delivers high performance across a broad spectral range in the telecom region, and also features exceptional core / clad concentricity specifications.

### Specifications

Geometrical & Mechanical	
Core Diameter	8.2 µm
Cladding Diameter	125 ± 0.7 µm
Coating Diameter	242 ± 5 µm
Core-Clad Concentricity	≤ 0.5 µm
Coating-Clad Concentricity	< 12 µm
Fiber Curl	≥ 4.0 m Radius of Curvature
Operating Temperature	-60 to 85 °C
Proof Test Level (245 coat)	≥ 100 kpsi (0.7 GN/m <sup>2</sup> )
Fiber Length	100 m
Jacket	Ø900 µm Hytrel

Optical	
Numerical Aperture (nominal)	0.14
Attenuation*	≤ 0.32 dB/km @ 1310 nm
	≤ 0.32 dB/km @ 1383 nm**
	≤ 0.21 dB/km @ 1490 nm
	≤ 0.18 dB/km @ 1550 nm
	≤ 0.20 dB/km @ 1625 nm
Operating Wavelength	1260 - 1625 nm
Mode Field Diameter	9.2 ± 0.4 µm @ 1310 nm
	10.4 ± 0.5 µm @ 1550 nm
Dispersion	≤ 18.0 ps/(nm-km) @ 1550 nm
	≤ 22.0 ps/(nm-km) @ 1625 nm
Polarization Mode Dispersion, Link Design Value	≤ 0.04 ps//km
Polarization Mode Dispersion, Maximum Individual Fiber	≤ 0.1 ps//km
Bend Loss for 100 Turns on 25 mm Mandrel	≤ 0.01 dB @ 1550 nm



\*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.  
 \*\* Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Thorlabs, Inc.  
 3000 Central Expressway  
 Santa Clara, CA 95051

November 24, 2015  
 2290-501, Rev H  
[www.thorlabs.com/contact](http://www.thorlabs.com/contact)

# Anexo C: Especificaciones de fibra óptica FG105LCA/FG200LEA



## 0.22 NA Standard Glass-Clad, Silica Core Multimode Fiber



**Description**

Thorlabs' 0.22 NA step-index multimode fibers feature a pure silica core with a fluorine-doped silica cladding, and are available with either high or low hydroxyl ion (OH) concentrations for UV to visible (250 - 1200 nm) or visible to NIR (400 - 2400 nm) applications, respectively.

**Specifications**

0.22 NA Hard Cladding, Silica Core, Multimode Fiber	
Wavelength Range	400 - 2400 nm (Low OH) 250 - 1200 nm (High OH) <sup>a</sup>
Core / Cladding	Pure Silica / Fluorine-Doped Silica
Coating	Acrylate
Operating Temperature	-40 to 85 °C
Numerical Aperture (NA)	0.22 ± 0.02
Bandwidth @ 820 nm	15 MHz·km

a. Solarization may occur at wavelengths below 300 nm

**Visible to IR Transmission (400 - 2400 nm), Low OH**

Item #	Core Diameter	Clad Diameter	Coating Diameter	Maximum Attenuation @ 808 nm	Bend Radius Short Term / Long Term
FG050LGA	50 μm ± 2%	125 ± 1 μm	250 μm ± 4%	8 dB/km	120 x Cladding Diameter / 240 x Cladding Diameter
FG105LCA	105 μm ± 2%	125 ± 1 μm	250 μm ± 4%	8 dB/km	
FG200LEA	200 μm ± 2%	220 ± 2 μm	320 μm ± 5%	8 dB/km	

**UV to Visible Transmission (250 - 1200 nm), High OH**

Item #	Core Diameter	Clad Diameter	Coating Diameter	Maximum Attenuation @ 808 nm	Bend Radius Short Term / Long Term
FG050UGA	50 μm ± 2%	125 ± 1 μm	250 μm ± 4%	10 dB/km	120 x Cladding Diameter / 240 x Cladding Diameter
FG105UCA	105 μm ± 2%	125 ± 1 μm	250 μm ± 4%	10 dB/km	
FG200UEA	200 μm ± 2%	220 ± 2 μm	320 μm ± 5%	10 dB/km	



April 23, 2019  
TTN006635-S01, Rev D  
[www.thorlabs.com/contact](http://www.thorlabs.com/contact)

Anexos

Anexo D. Especificaciones de fibra óptica AFS50/125Y

THORLABS

## Step-Index Multimode Fiber



AFS50/125Y

### Description

Thorlabs' low loss, step-index, multimode fiber is excellent for holmium and erbium laser delivery. The low hydroxyl ion content provides high transmission efficiency and has a useful spectral transmission range from 400 to 2400 nm.

### Specifications

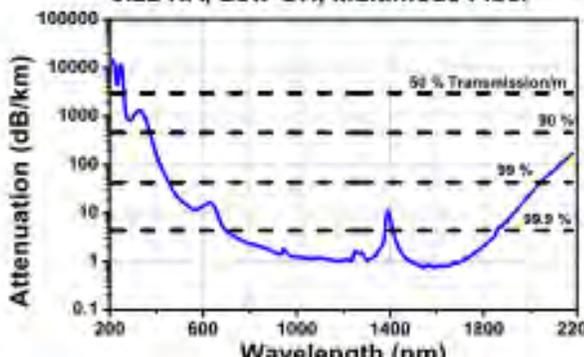
Geometrical & Mechanical	
Core Diameter	50 $\mu\text{m} \pm 2\%$
Cladding Diameter	125 +1 / -3 $\mu\text{m}$
Coating Diameter	250 $\mu\text{m} \pm 5\%$
Core/Clad Ratio	2.5
Coating Material	Acrylate
Operating Temperature	-40 to 85 °C
Minimum Bend Radius	120 x Clad (Recommended Short Term) 240 x Clad (Recommended Long Term)
Proof Test Level (bend method)	100 kpsi

Optical	
Numerical Aperture	0.22 $\pm$ 0.02
Attenuation	15 dB/km @ 633 nm 10 dB/km @ 1385 nm

### Performance Plots

**0.22 NA, Low-OH, Multimode Fiber**



USA, Canada, & South America: +1-973-300-3000 | France: +33 (0) 970-444-844 | Europe: +49 (0) 8731-5958-0 | UK & Ireland: +44 (0) 153-4454400  
 Brazil: +55-16-3211-1000 | Japan: +81-3-5979-8889 | China: +86 (0) 21-62561122

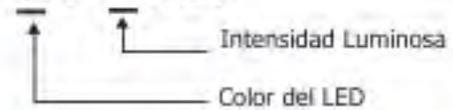
April 1, 2013

# Anexo E. Especificaciones LED's utilizados en parte electrónica



## LED DIP 3mm

LED-Y3D-PP-R30



### Especificaciones

Tipo de LED: DIP 3mm

Temperatura de operación: - 40 a 70 °C

Angulo de apertura: 15° a 30°

Corriente nominal: 20mA

Encapsulado transparente y difuso

Y	Colores disponibles	Longitud de onda [nm] / TC [K]	Voltaje de Operación [V]		Consumo (mW)	PP		Intensidad Luminosa [mcd]					
			Min	Max		AD	AC	S		SB		UB	
								Min	Max	Min	Max	Min	Max
-R	Red	600-650	1.8	2.2	40	***	-	-	-	1000	2900	2900	11000
-G	Green	490-540	1.8	2.2	40	***	-	-	-	3000	6900	4900	12000
-B	Blue	450-500	3.0	3.4	40	-	***	-	-	1300	2000	1700	4000
-Y	Yellow	550-600	1.8	2.2	40	***	***	-	-	2200	4000	2800	13500
-O	Orange	600-650	1.8	2.2	40	-	-	-	-	1000	1300	-	-
-W	White	5000 - 10000 K	3.0	3.4	40	-	-	-	-	6000	9000	7000	11500
-Rc	Red Clear	430-440	1.8	2.2	40	-	***	-	-	-	-	-	-
-Bc	Blue Clear	380-420	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
-LPr	Light Purple	430-440	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
-LBl	Light Blue	450-500	3.0	3.4	60	-	***	-	-	-	-	-	-
-LGr	Light Green	490-540	3.0	3.4	40	-	***	-	-	-	-	-	-
-LW	Light White	-	3.0	3.4	-	-	***	-	-	-	-	-	-

Los datos mostrados son únicamente de referencia, éstos pueden variar entre lotes diferentes.  
 \*\*\* LED de uso general como indicadores

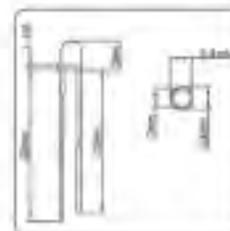
Acabado Difuso



Acabado Claro



Dimensiones



Anexo F. Especificaciones de transistor

Discrete POWER & Signal Technologies

**BC547  
BC547A  
BC547B  
BC547C**

TO-92

**NPN General Purpose Amplifier**

This device is designed for use as general purpose amplifiers and switches requiring collector currents to 300 mA. Sourced from Process 10. See PN100A for characteristics.

**Absolute Maximum Ratings\*** (TA = 25°C unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Value	Units
V <sub>CE(s)</sub>	Collector-Emitter Voltage	-45	V
V <sub>CB(s)</sub>	Collector-Base Voltage	-50	V <sup>†</sup>
V <sub>EB(s)</sub>	Emitter-Base Voltage	5.0	V
I <sub>C</sub>	Collector Current - Continuous	300	mA
T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>	Operating and Storage Junction Temperature Range	-50 to +150	°C

\* Derating and other limits apply when the parameter is Vary continuously during any or all of the above.

**NOTES:**

†) These ratings are based on a maximum ambient temperature of 100°C.

‡) Base-emitter diode reverse current. The value should be corrected for ambient temperature as per data sheet conditions.

**Thermal Characteristics** (TA = 25°C unless otherwise noted)

Symbol	Characteristic	Max	Units
		BC547/A/B/C	
P <sub>D</sub>	Total Device Dissipation Dissipate above 25°C	625 50	mW mW/°C
R <sub>θ(j-c)</sub>	Thermal Resistance, Junction to Case	80-3	°C/W
R <sub>θ(j-a)</sub>	Thermal Resistance, Junction to Ambient	300	°C/W

© 1998 Fairchild Semiconductor Corporation
D0401 Rev. 3

BC547 / BC547A / BC547B / BC547C

## NPN General Purpose Amplifier

(continued)

## Electrical Characteristics

TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
$V_{BR(CEO)}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage	$I_C = 1.0 \text{ mA}, I_B = 0$	45		V
$V_{BR(CBO)}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ } \mu\text{A}, I_E = 0$	50		V
$V_{BR(CEB)}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10 \text{ } \mu\text{A}, I_E = 0$	50		V
$V_{BR(EBB)}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10 \text{ } \mu\text{A}, I_C = 0$	6.0		V
$I_{CO}$	Collector Cutoff Current	$V_{CE} = 30 \text{ V}, I_B = 0$ $V_{CE} = 30 \text{ V}, I_B = 0, T_A = +150 \text{ }^\circ\text{C}$		15 5.0	nA $\mu\text{A}$
<b>ON CHARACTERISTICS</b>					
$h_{FE}$	DC Current Gain	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$	547 547A 547B 547C	110 110 200 420	800 220 450 800
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 10 \text{ mA}, I_B = 0.5 \text{ mA}$ $I_C = 100 \text{ mA}, I_B = 5.0 \text{ mA}$		0.25 0.60	V V
$V_{BE(on)}$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 2.0 \text{ mA}$ $V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 10 \text{ mA}$	0.58	0.70 0.77	V V
<b>SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
$h_{fe}$	Small-Signal Current Gain	$I_C = 2.0 \text{ mA}, V_{CE} = 5.0 \text{ V},$ $f = 1.0 \text{ kHz}$	125	900	
NF	Noise Figure	$V_{CE} = 5.0 \text{ V}, I_C = 200 \text{ } \mu\text{A},$ $R_B = 2.0 \text{ k}\Omega, f = 1.0 \text{ kHz},$ $B_{NF} = 200 \text{ Hz}$		10	dB

BC547 / BC547A / BC547B / BC547C

## Anexo G. Especificaciones de foto receptor PDA100A

## Chapter 6 Specifications

All performance specifications are typical, performed at 25 °C ambient temperature, and assume a 50 Ω load, unless stated otherwise.

Performance Specifications <sup>2</sup>			
0 dB Setting		40 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	$1.51 \times 10^7$ V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	$1.51 \times 10^6$ V/A $\pm 2\%$
Gain (50 Ω)	$0.75 \times 10^7$ V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	$0.75 \times 10^6$ V/A $\pm 2\%$
Bandwidth <sup>3</sup>	2.4 MHz	Bandwidth <sup>3</sup>	225 kHz
Noise (RMS)	254 μV	Noise (RMS)	799 μV
NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$2.7 \times 10^{-11}$ W/√Hz	NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$3.56 \times 10^{-12}$ W/√Hz
Offset	$\pm 5$ mV (10 mV max)	Offset	$\pm 8$ mV (15 mV max)
10 dB Setting		50 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	$4.75 \times 10^7$ V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	$4.75 \times 10^7$ V/A $\pm 2\%$
Gain (50 Ω)	$2.38 \times 10^7$ V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	$2.38 \times 10^6$ V/A $\pm 2\%$
Bandwidth <sup>4</sup>	1.8 MHz	Bandwidth <sup>4</sup>	76 kHz
Noise (RMS)	261 μV	Noise (RMS)	998 μV
NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$1.1 \times 10^{-11}$ W/√Hz	NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$2.42 \times 10^{-12}$ W/√Hz
Offset	$\pm 6$ mV (12 mV max)	Offset	$\pm 8$ mV (15 mV max)
20 dB Setting		60 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	$1.5 \times 10^8$ V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	$1.5 \times 10^7$ V/A $\pm 5\%$
Gain (50 Ω)	$0.75 \times 10^8$ V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	$0.75 \times 10^6$ V/A $\pm 5\%$
Bandwidth <sup>4</sup>	860 kHz	Bandwidth <sup>4</sup>	20 kHz
Noise (RMS)	348 μV	Noise (RMS)	1163 μV
NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$8.91 \times 10^{-12}$ W/√Hz	NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$1.22 \times 10^{-12}$ W/√Hz
Offset	$\pm 6$ mV (15 mV max)	Offset	$\pm 8$ mV (15 mV max)
30 dB Setting		70 dB Setting	
Gain (Hi-Z)	$4.75 \times 10^8$ V/A $\pm 2\%$	Gain (Hi-Z)	$4.75 \times 10^7$ V/A $\pm 5\%$
Gain (50 Ω)	$2.38 \times 10^8$ V/A $\pm 2\%$	Gain (50 Ω)	$2.38 \times 10^6$ V/A $\pm 5\%$
Bandwidth <sup>4</sup>	480 kHz	Bandwidth <sup>4</sup>	5.9 kHz
Noise (RMS)	561 μV	Noise (RMS)	1490 μV
NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$4.65 \times 10^{-12}$ W/√Hz	NEP (@ $\lambda_{op}$ )	$9.73 \times 10^{-13}$ W/√Hz
Offset	$\pm 8$ mV (15 mV max)	Offset	$\pm 30$ mV (Max)

<sup>2</sup> The PDA100A(-EC) has a 50 Ω series terminator resistor (i.e. in series with amplifier output). This forms a voltage divider with any load impedance (e.g. 50 Ω load divides signal in half).

<sup>3</sup> For NIR wavelengths, the rise time of the photodiode element will become slower which may limit the effective bandwidth of the amplified detector.

Electrical Specifications		
Detector		Si PIN
Active Area		10 x 10 mm (100 mm <sup>2</sup> )
Wavelength Range	$\lambda$	340 to 1100 nm
Peak Wavelength	$\lambda_p$	980 nm (Typ)
Peak Response	$\mathcal{R}(\lambda_p)$	0.62 A/W (Typ)
Amplifier GBP		600 MHz
Output Impedance		50 $\Omega$
Max Output Current	$I_{out}$	100 mA
Load Impedance		50 $\Omega$ to Hi-Z
Gain Adjustment Range		0 to 70 dB
Gain Steps		8 x 10 dB Steps
Output Voltage	$V_{out}$	0 to 5 V (50 $\Omega$ ) 0 to 10 V (Hi-Z)

General	
On/Off Switch	Slide
Gain Switch	8 Position Rotary
Output	BNC (DC Coupled)
Package Size	2.76" x 2.06" x 0.88" (70.1 mm x 52.3 mm x 22.4 mm)
PD Surface Depth	0.16" (4.1 mm)
Weight, Detector Only	0.15 lbs
Accessories	SM1T4 Coupler SM1RR Retainer Ring
Operating Temp	10 to 40 °C
Storage Temp	-20 to 70 °C
AC Power Supply	AC – DC Converter
Input Power <sup>4</sup>	31 W 100 – 200 VAC (50 to 60Hz) 220 – 240 VAC (50 to 60 Hz)

**Anexo H Resultados de fibra óptica adherida a ladrillos**  
**Tabla 1. Fibra FG200LEA y pegamento acrílico**

Desplazamiento (mm)	Fuerza [N]
0	0
0.02	23.2
0.06	31
0.23	30
0.69	34
1	31.2
1.14	30
2.5	36
2.9	35
4.1	31.4
4.5	34
4.86	32
7.26	37
9.25	38.6
11	38.6
14.12	55
14.58	64
15.01	79
15.33	95.8
15.85	123.4
16.2	134
16.57	143
16.94	162
17.52	170
18.26	191
18.95	201

A partir de la casilla en color amarillo, la fuerza F empieza a crecer, esto en comparación con datos anteriores, que a pesar del desplazamiento D de hasta 11 [mm] solo se tenían registrados 38.6 [N].

Por otra parte, la rotura se da después de las lecturas de las celdas en color rojo, donde según los cálculos teóricos, la fuerza con la que se rompe la fibra es menor a la experimental.

**Tabla 2. Fibra FG200LEA, anclada con pegamento acrílico.**

Desplazamiento [mm]	Fuerza [N]
0	0
0.16	20
0.23	27.2
0.34	35.4
0.46	42.2
0.64	47.4
0.77	50.4
0.91	58.2
1.05	63
1.23	66.4
1.38	74.2
1.51	78.8
1.69	85.4
1.85	93.6
2.02	100.4
2.15	105.2
2.31	108
2.48	114
2.65	117
2.82	129
2.98	131.8
3.11	141.6
3.25	151
3.36	145.6
3.69	157.4
3.93	152
4.16	151.2
4.32	164.2
4.58	166.4
4.83	169.4
5.05	169.2

## Anexos

5.29	173.2
5.47	166.2
5.64	158
5.83	161.8
6.04	161.2
6.32	185
6.55	193.4
6.73	199.4

En las celdas en color amarillo, se tuvo una fuerza de 43 [N] a un desplazamiento de menos de 0.5[mm]. Para los resultados en las celdas color rojo, se tuvo la rotura de la fibra. Siendo similar a la registra en la prueba anterior.

**Tabla 3. Fibra FG200LEA anclado con pegamento acrílico.**

Desplazamiento [mm]	Fuerza [N]
0	0
0.11	15.4
0.18	20
0.26	23
0.33	27
0.44	28
0.5	30.8
0.64	37
0.81	38.2
0.98	40
1.43	52.8
1.68	53.8
1.87	57
2.1	56
2.28	58.2
2.47	61.8
2.72	65.4
2.9	65.8
3.16	73.2
3.32	74

## Anexos

Para la prueba 3, se ancló con pegamento acrílico, la rotura se dio a una separación de ladrillos de 3.32 [mm] con una fuerza  $F$  de 74[N], muy por debajo de lo registrado en pruebas anteriores.

**Tabla 4. Fibra FG200LEA con pegamento acrílico**

Desplazamiento [mm]	Fuerza [N]
0	0
0.5	48
0.7	7

De esta fibra solo se obtuvieron 2 datos registrados, debido a que la fibra se rompió después del primer dato registrado, el segundo dato fue para corroborar que seguía transmitiendo la señal.



*Figura A.1 Ensayo de fibra óptica con recubrimiento de poliamida y pegamento acrílico*

En el quinto ensayo, utilizando fibra óptica con recubrimiento de poliamida y pegamento epóxico, se observó que no se anclaba al ladrillo, al contrario, se deslizaba, llegando a tener una apertura de grieta de hasta 20 [mm] sin romper la fibra.

## Anexo I. Respuesta a la frecuencia del receptor.

**Tabla 5. Respuesta a la frecuencia de filtro butterworth**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [Vpp]
0	0
100	0.9
200	2.07
300	3.17
400	4.27
500	5.33
600	6.13
700	7.06
800	7.93
900	8.6
1000	9.16
1400	11.2
2000	12.8
3000	14.3
4000	15.2
5000	15.5
6000	15.3
7000	15.5
8000	16
9000	15.8
10000	15.7
15000	14.8
20000	13.5
25000	12.3
30000	10.5
35000	9.83
40000	8.5
45000	7.66
46000	7
47000	6.83

Las casillas en amarillo son el voltaje máximo de salida del filtro, mientras que las casillas en verde son los voltajes a -6 dB.

Anexos

**Tabla 6. Respuesta a la frecuencia de receptor con jumper 62.5/125 y utilizando transmisor TxA**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [mVpp]
0	0
100	16
200	17
300	18
400	20
500	33
600	34
700	42
800	44
900	49
1000	55
1100	52
1200	60
1300	70
1400	75
1500	75
1600	70
1700	73
1800	86
1900	83
2000	83
3000	105
4000	110
5000	113
6000	125
7000	133
8000	137
9000	140
10000	137
20000	137
30000	120
40000	107
50000	110

**Tabla 7. Respuesta a la frecuencia de receptor con fibra acoplada y transmisor TxA**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [mVpp]
0	0
100	14
200	28
300	38
400	46
500	60
600	66
700	70
800	86
900	90
1000	96
1100	102
1200	110
1300	112
1400	120
1500	125
1600	128
1700	130
1800	140
1900	133
2000	130
3000	130
4000	133
5000	123
6000	120
7000	113
8000	107
9000	93
10000	80
20000	50
30000	26
40000	18
50000	14

Los voltajes de salida del receptor, utilizando el transmisor TxA, dieron lecturas en mili volts, teniendo su máximo en las celdas en amarillo y su voltaje a -3 dB en las casillas en verde. Las celdas en color rojo indican que se recibió la señal con

## Anexos

distorsión. La señal de entrada al transmisor fue de amplitud 1 Vpp, puesto que con magnitud menor no se tenía respuesta en el receptor.

**Tabla 7. Respuesta a la frecuencia de receptor con fibra acoplada y transmisor TxB**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [Vpp]
0	0
100	4.26
160	8
200	10.3
300	12.8
400	14.2
500	14.8
600	15.5
700	15.8
800	15.3
900	15
1000	14.8
1100	14.7
1200	14.3
1300	14.2
1400	13.7
1500	13.3
1600	13.3
1700	12.8
1800	12.5
1900	12.2
2000	12
2200	11.5
2400	11.8
2600	10.5
2800	9.8
3000	9.5
3200	9.16
3400	8.5
3600	8.1
3800	8
4000	7.6
4200	7.16
4400	7

**Tabla 8. Respuesta a la frecuencia de receptor con jumper 62.5/125 y utilizando transmisor TxB**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [Vpp]
0	0
100	1.6
160	3
200	4.2
300	5.2
400	5.8
500	6.2
600	6.3
700	6.4
800	6.2
900	6.13
1000	6.13
1100	6
1200	5.8
1300	5.7
1400	5.6
1500	5.53
1600	5.46
1700	5.26
1800	5.2
1900	5.13
2000	5
2200	4.93
2400	4.73
2600	4.53
2800	4.33
3000	4
3200	3.86
3400	3.7
3600	3.6
3800	3.4
4000	3.33
4200	3.2
4400	3

En el caso de la señal recibida, utilizando el transmisor TxB se tuvo una respuesta en el receptor en volts, con menor ancho de banda, pero mayor magnitud en el

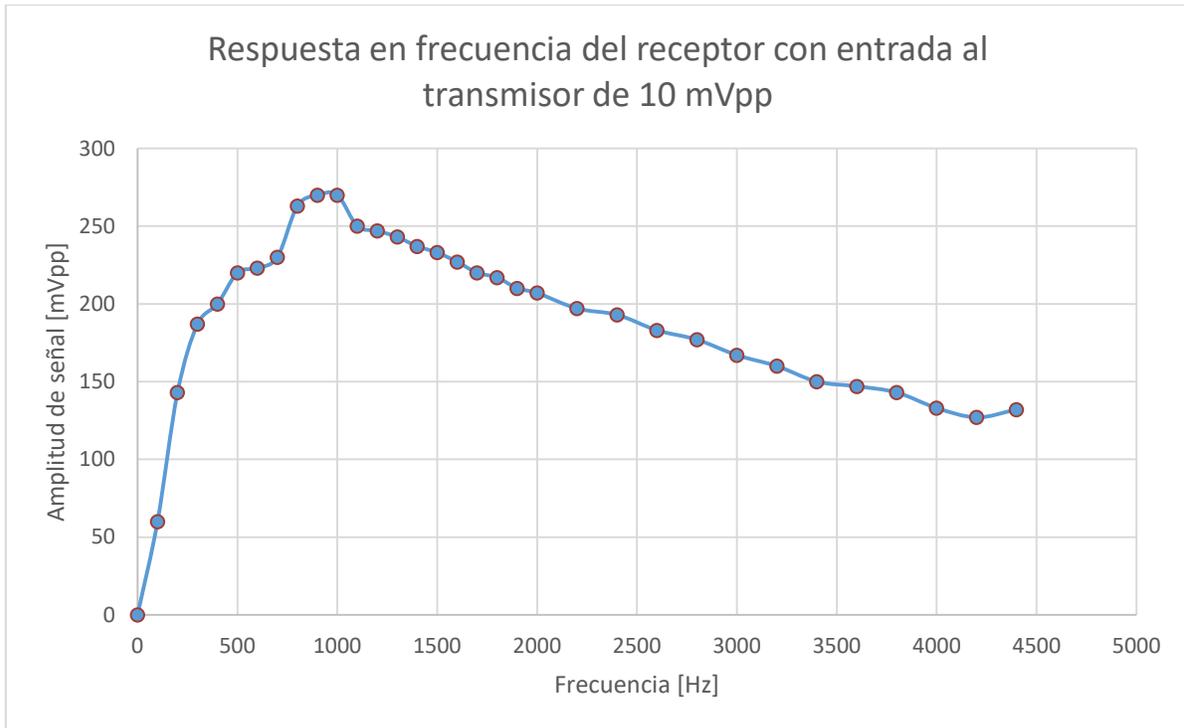
voltaje. En amarillo el pico máximo del voltaje y en verde el voltaje a la mitad del pico máximo. La señal de entrada al transmisor fue de 300 mVpp.

### **Prueba del receptor utilizando fibra acoplada y transmisor TxB**

**Tabla 9. Respuesta del receptor con señal de entrada al transmisor de 10 mVpp**

Frecuencia [Hz]	Amplitud [mVpp]
0	0
100	60
200	143
300	187
400	200
500	220
600	223
700	230
800	263
900	270
1000	270
1100	250
1200	247
1300	243
1400	237
1500	233
1600	227
1700	220
1800	217
1900	210
2000	207
2200	197
2400	193
2600	183
2800	177
3000	167
3200	160
3400	150
3600	147
3800	143
4000	133
4200	127
4400	132

En la tabla a partir de un voltaje de 10 [mVpp] de entrada al transmisor se tuvo una salida en el receptor de hasta 270 [mVpp], teniendo una señal sin distorsión, sin embargo, el máximo de la señal estuvo entre los 900 y 1000 [Hz], así como su caída a la mitad de voltaje máximo estuvo en los 200 [Hz] y los 4000 [Hz].



*Figura A.2 Respuesta a la frecuencia del receptor utilizando TxB con señal de entrada al Tx de 10 mVpp*

La gráfica no tiene variaciones más allá de los cambios en el pico máximo de voltaje, antes ubicados en los 700 [Hz] al introducir 300 mVpp al transmisor, ahora siendo desplazados a 900 -1000 [Hz]. En el oscilograma de la parte inferior se muestra tanto la señal de salida del transmisor como la recibida en el receptor después de la etapa de amplificación.

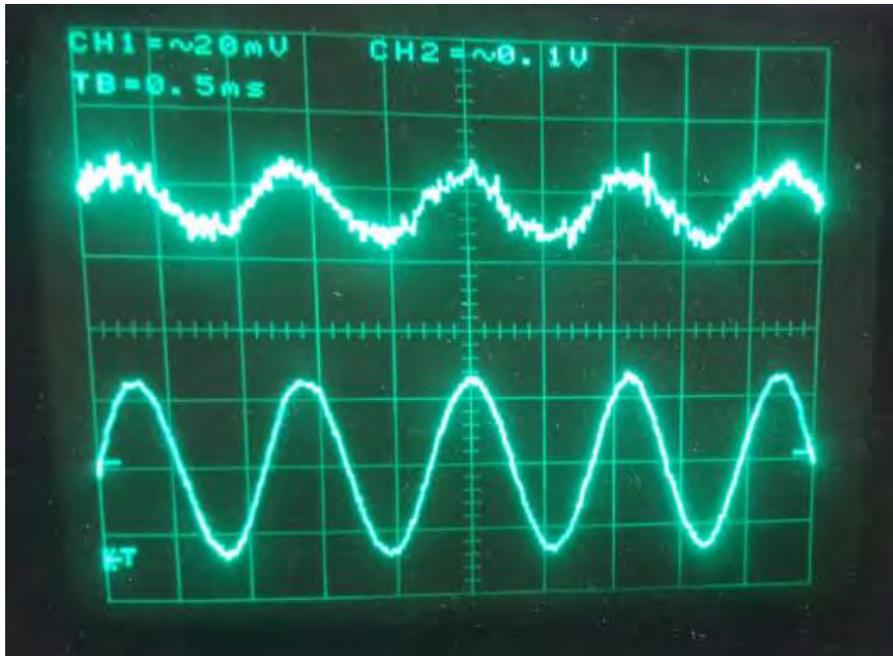


Figura A.3 Señal superior es la entrada a TxB, señal inferior es la señal de salida del receptor