



METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE COMPUESTOS DE FIBRA DE CARBÓN

Jorge Terán Guillén
Andrés Antonio Torres Acosta
Mariela Rendón Belmonte
María Guadalupe Lomelí González
Miguel Martínez Madrid

**Publicación Técnica No. 504
Sanfandila, Qro, 2018**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Metodología para estimar la resistencia a la tensión
de compuestos de fibra de carbón**

Publicación Técnica No. 504
Sanfandila, Qro, 2018

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Jorge Terán Guillén, Dr. Andrés Torres Acosta, Dra. Mariela Rendón Belmonte e Ing. María Guadalupe Lomelí González.

Se agradecen las observaciones y recomendaciones técnicas del Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural.

También es de merecer agradecimiento, el apoyo del Ing. Daniel Gasca Soto, M.C. José Luis Moreno Jiménez y el Técnico Mario Montes Zea para la fabricación de los especímenes usados en los ensayos.

Por último, se agradece a la compañía SIKA Mexicana S.A. de C.V. por haber proporcionado el apoyo económico para la realización de esta investigación, mediante el suministro del material y asesoría técnica relacionada con las propiedades del mismo durante todo el proceso de experimentación.

Esta investigación es el producto final de los proyectos de investigación externos:

EE 06/08 Pruebas de Laboratorio de los Materiales de la Rehabilitación del Viaducto de Arcos del Puerto de Progreso” y

EE 06/08 Pruebas de Laboratorio de los Materiales de la Rehabilitación del Viaducto de Arcos del Puerto de Progreso.”

Contenido

Índice de tablas	v
Índice de figuras	vii
Sinopsis	xiii
Abstract	xv
Resumen Ejecutivo	xvii
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	3
Capítulo 2. Metodología experimental	9
Capítulo 3. Resultados	23
Capítulo 4. Análisis de los resultados	35
Capítulo 5. Conclusiones	45
Bibliografía	47
Anexo 1	49

Índice de tablas

Tabla 3.1	Resultados de probetas con diseño de acuerdo con la Norma ASTM D-3039	27
Tabla 3.2	Resultados de probetas con diseño de acuerdo con la Norma ASTM D-3039 y utilizando “molde” de pegado	27
Tabla 3.3	Resultados de los 3 diseños de probeta fabricadas y seleccionadas con base a resultados obtenidos con la técnica numérica de elementos finitos	34
Tabla 3.4	Resultados de probetas con geometría con base en la Norma ASTM D-3039 y diseño de Jones, utilizando diseño de laminillas de sujeción recomendadas por Clifton	34
Tabla 3.5	Radios y diámetros correspondientes a cada fibra de carbono	38

Índice de figuras

Figura 1.1	Ensayo de tensión	6
Figura 1.2	Esfuerzo-deformación de un material metálico	7
Figura 1.3a	Curva teórica de fuerza vs desplazamiento de fibra de carbono	8
Figura 1.3b	Curva real de fuerza vs desplazamiento de fibra de carbono	8
Figura 2.1	Medidas de la Probeta de ensayo	11
Figura 2.2	Colocación de las laminillas sobre el ensayo	12
Figura 2.3	Probetas para ensayar	12
Figura 2.4	Probetas de ensayo	13
Figura 2.5	Molde utilizado para el pegado de las laminillas con la fibra de carbono	13
Figura 2.6	Pegado de las laminillas a la probeta de fibra de carbono	14
Figura 2.7	Propuesta I	15
Figura 2.8	Propuesta II	15
Figura 2.9	Propuesta III	16
Figura 2.10	Propuesta IV	16
Figura 2.11	Propuesta V	17

Figura 2.12	Propuesta VI	17
Figura 2.13	Laminillas de acero al carbono	18
Figura 2.14	a) Propuesta I [7], b) propuesta II [8] y c) propuesta IV [9]	18
Figura 2.15	Vista transversal de la probeta sujeta con las plaquitas propuestas por Clifton [11]	19
Figura 2.16	Vista transversal de la plaquita fabricada de acero galvanizado [11]	19
Figura 2.17	Laminillas de acero galvanizado de acuerdo a lo propuesto por Clifton [11] antes de lijar	20
Figura 2.18	Laminillas de acero galvanizado de acuerdo a lo propuesto por Clifton [11] después de lijar con lija #80	20
Figura 2.19	Diseño de la probeta propuesto por Jones [14]	21
Figura 2.20	Diseño de la probeta propuesto por Jones [14]	21
Figura 2.21	Lámina de carbono	22
Figura 2.22	Corte de la sección de fibra de carbono utilizada para el análisis metalográfico	22
Figura 2.23	Fibra de carbono encapsulada en resina para realizar el análisis metalográfico	23
Figura 3.1	Propuesta 1	26
Figura 3.2	Propuesta 2	27

Figura 3.3	Propuesta 3	28
Figura 3.4	Propuesta 4	29
Figura 3.5	Propuesta 5	30
Figura 3.6	Propuesta 6	31
Figura 3.7	Micrografía a 100X de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®, área total que abarca la micrografía = 0,02443121 mm ²	33
Figura 3.8	Micrografías de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®	34
Figura 3.9	Micrografía de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®	35
Figura 4.1	Probeta con diseño de acuerdo a Norma y pegada con el epóxico 330 [8] durante el ensayo de tensión	42
Figura 4.2	Probetas pegadas con el epóxico 330 [8] después de ensayar	42
Figura 4.3	Probeta con diseño de acuerdo a Norma y pegada con el epóxico 35 [9] después de fallar	43
Figura 4.4	Resultados de la Resistencia Última a la Tensión (en MPa·10 ³) de las probetas de (a) Lote 3 y (b) Lote 4, por tipo de geometría de probeta N=ASTM ^[10] y J= Ref. [11]	44

Figura 4.5	Resultados del Módulo de Elasticidad (o de Young) (en MPa·10 ³) de las probetas de (a) Lote 3 y (b) Lote 4, por tipo de geometría de probeta N=ASTM ^[10] y J= Ref. [11]	46
Figura A.1	Información de la prueba para la Probeta 1: Método Norma + epóx. 35	53
Figura A.2	Información de la prueba para la Probeta 2: Método Norma + epóx. 35	54
Figura A.3	Información de la prueba para la Probeta 3: Método Norma + epóx. 330	55
Figura A.4	Información de la prueba para la Probeta 4: Método Norma + epóx. 330	56
Figura A.5	Información de la prueba para la Probeta 5: Método Norma + epóx. 330	57
Figura A.6	Información de la prueba para la Probeta 6: Método Norma + epóx. 330	58
Figura A.7	Información de la prueba para la Probeta 7: Método Norma + epóx. 330	59
Figura A.8	Información de la prueba para la Probeta 8: Método Norma + epóx. 330	60
Figura A.9	Información de la prueba para la Probeta 9: Método Norma + epóx. 330	61
Figura A.10	Información de la prueba para la Probeta 10: Método Norma + epóx. 330	62

Figura A.11	Información de la prueba para la Probeta 11: Método Norma + epóx. 330	63
Figura A.12	Información de la prueba para la Probeta 12: Método Norma + epóx. 330	64
Figura A.13	Información de la prueba para la Probeta 13: Método Norma + epóx. 330	65
Figura A.14	Información de la prueba para la Probeta 14: Método Norma + epóx. 330	66
Figura A.15	Información de la prueba para la Probeta 15: Método Jones + epóx. 330	67
Figura A.16	Información de la prueba para la Probeta 16: Método Jones + epóx. 330	68
Figura A.17	Información de la prueba para la Probeta 17: Método Jones + epóx. 330	69
Figura A.18	Información de la prueba para la Probeta 18: Método Jones + epóx. 330	70
Figura A.19	Información de la prueba para la Probeta 19: Método Jones + epóx. 330	71
Figura A.20	Información de la prueba para la Probeta 20: Método Jones + epóx. 330	72
Figura A.21	Información de la prueba para la Probeta 21: Método Jones + epóx. 330	73

Sinopsis

En el presente estudio se determinaron las propiedades mecánicas (módulo de Young y resistencia última a tensión), de un material compuesto reforzado con fibras de carbono, utilizado comúnmente en la rehabilitación de estructuras de concreto que presentan algún daño estructural. Se evaluaron diferentes geometrías de espécimen de este compuesto, ya que algunas fallaban frágilmente, por lo que la sección de este material compuesto no alcanzaba a obtenerse el diagrama esfuerzo-deformación unitario completo y fallaba de manera frágil y localizada.

Durante el desarrollo del trabajo se observó la importancia que tiene el diseño de probeta y de las laminillas de sujeción para la obtención de las propiedades mecánicas. La presente investigación describe los factores que se consideraron en la elección del diseño de las probetas y la metodología que se siguió para realizar las pruebas.

La metodología que logró cumplir con los requerimientos para alcanzar la falla adecuada en el material compuesto (generalizada en lugar de localizada) fue la del procedimiento de la norma ASTM D-3039, cumpliendo el comportamiento con resultados obtenidos en la modelación por elemento finito (programa ANSYS) de seis propuestas de geometría de probeta.

También se explica la metodología seguida en el análisis micrográfico del compuesto reforzado con fibra de carbono, con la finalidad de determinar el contenido de las fibras en el mismo material y así establecer que éste cumple con el rango citado en la ficha técnica del material.

Abstract

In the present study, the mechanical properties (Young's modulus and ultimate tensile strength) of a carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite commonly used in the rehabilitation of structurally damaged concrete structures. Specimen geometries were evaluated of this CFRP composite, since some failed in a fragile way, thus the section of the material did not showed a typical stress-strain curve during testing.

During this investigation, the importance on the specimen geometry and the clamping design was determined to obtain the real mechanical performance of this CFRP composite. The present investigation describes the factors to consider in the specimen design election and the test execution methodology.

The methodology that comply with the typical failure mechanisms for this CFRP composite (generalized instead of localized failure), was the one used in the standard procedure of ASTM D-3039, obtaining similar performance with a finite elements simulations (using ANSYS software), using six different specimen geometries configurations.

A detailed explanation of the methodology followed of the micrographic analysis of the CFRP composite, to determine the amount of fibers in the material, was also included in this investigation. This was performed to determine if the fiber content of the CFRP composite, comply with the manufacturer specification.

Resumen ejecutivo

En esta investigación se pretendió el evaluar el procedimiento de prueba normado por ASTM para pruebas experimentales de resistencia a la tensión de materiales compuestos a base de plástico reforzado con fibras de carbón (con siglas en inglés CFRP). Esto con la finalidad de realizar ensayos de este material, que es muy utilizado para el refuerzo externo de estructuras de concreto (principalmente puentes) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), ya que durante la ejecución de estas pruebas se encontraron varias inconsistencias en el método de preparación de los especímenes y de los elementos de sujeción de éstos a la máquina universal.

Primero se utilizó la herramienta simulación por elementos finitos (programa ANSYS) para manejar diferentes geometrías de probetas, permitiendo seleccionar y fabricar el diseño de probeta adecuado para determinar las propiedades mecánicas de una laminilla de este material (CFRP). Sin embargo, durante el desarrollo de las pruebas experimentales se encontraron dificultades de adherencia entre las laminillas de anclaje del CFRP con la máquina universal, originando la necesidad de experimentar diferentes materiales de sujeción, su rugosidad y los adhesivos de pegado, hasta encontrar aquel con mayor resistencia a la adherencia.

Una vez evaluado el sistema de sujeción y encontrado el más óptimo para que el material CFRP pueda llegar a su carga última y obtener así el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria completo, se hicieron pruebas para determinar la reproducibilidad de los resultados y comparar éstos con los datos de la ficha técnica de estos materiales compuestos denominados CFRP con geometría tipo laminar de 15 mm de ancho y 1.4 mm de espesor.

Introducción

El uso a nivel mundial del concreto en obras civiles, puentes, pavimentos, presas, tanques de almacenamiento, etc., lo coloca como el material de construcción más utilizado en la actualidad. El tiempo de vida útil de una estructura es función de su fabricación, de acuerdo con el servicio que vaya a prestar y a las condiciones a que estará sometido, es deseable que una obra se mantenga en buen estado estructural, químico y estético por tiempo indefinido sin reparaciones o rehabilitaciones mayores que resulten demasiado costosas. Sin embargo, en la realidad, es difícil de conseguir esto, siendo uno de los más graves problemas el deterioro del concreto por la intersección con el medio ambiente. La manera en que se lleva a cabo el deterioro del concreto ha sido estudiada en diferentes países encontrándose que las principales causas son por reacciones químicas con el dióxido de carbono (carbonatación) y por presencia de cloruros a nivel del acero de refuerzo, lo que origina que el acero sufra corrosión [1].

Más del 25 % de los puentes de Estados Unidos han sido clasificados como estructuralmente deficientes, lo que ha dado lugar a gastos importantes de mantenimiento. El costo promedio anual para mantener las condiciones actuales de las carreteras y puentes se estima por el año 2013 en \$ 54,8 mil millones [2].

Para prolongar la vida en servicio de las estructuras de concreto ya existentes se han desarrollado diferentes métodos de protección y refuerzo como el uso de materiales compuestos a base de fibras de carbono (MCFC).

Un material compuesto está formado de 2 o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente, presenta varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase; sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes. Estos materiales surgen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo, en el transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades que rara vez se dan juntas.

Las fibras de carbono son un compuesto polimérico integrado por una fase que constituye de fibras de carbono unidas mediante una resina, donde la materia prima para obtener la fibra de carbono es el poliacrilonitrilo. Las características que posee son: alta resistencia mecánica, módulo elástico elevado, baja densidad en comparación con el acero, resistente a agentes externos, gran capacidad de aislamiento térmico y resistencia a las variaciones de temperatura, de tal manera, que conserva su forma.

I.1 Objetivo

Determinar las propiedades mecánicas en láminas de fibras de carbono marca Sika® CarboDur® utilizadas en la rehabilitación del viaducto de Arcos del puerto de Progreso.

Metas a alcanzar:

1. Realizar ensayos de tensión en probetas de fibras de carbono con diferentes diseños de probeta para alcanzar los valores reportados en literatura de estos materiales.
2. Estimar el porcentaje de fibras presente en el compuesto a ensayar.

1 Antecedentes

1.1 Método de elementos finitos

Una técnica de modelación teórico-numérica aplicado en el análisis de elementos y estructuras es el método de elementos finitos. El método se basa en la discretización del cuerpo, es decir, dividiéndolo en un número finito de partes sencillas y pequeñas que dan una aproximación a su geometría, por complicada que ésta sea. Cada una de estas partes constituye un elemento finito que hereda las propiedades mecánicas del cuerpo y que se interconecta con los demás elementos a través de puntos de unión llamados nodos. La conexión entre elementos a través de los nodos origina una “malla” geométrica, proporcionando la continuidad del cuerpo para la transmisión compatible de esfuerzos y deformaciones entre elementos, cuando se aplican fuerzas sobre este [1,2].

El comportamiento del cuerpo, generado como las respuestas individuales de cada elemento, requiere de la solución de la ecuación de equilibrio del sistema en el que participa, es decir, donde m representa la masa, c el coeficiente de amortiguamiento, k la rigidez, f las fuerzas, x el desplazamiento y sus derivadas la velocidad y aceleración.

En análisis estáticos la ecuación de equilibrio se reduce a la participación de la rigidez, el desplazamiento y las fuerzas. Para el caso de los elementos finitos, la representación de esta ecuación requiere de un manejo matricial, en el que se debe hacer un ensamble de comportamientos individuales en función de la rigidez y los desplazamientos de cada elemento en el modelo. Esto da lugar a la formulación de la matriz de rigidez, al vector de desplazamientos y al vector de fuerzas de restricción, es decir, $[K]\{D\}=\{R\}$.

1.1.1 Tipos de análisis

En mecánica estructural, un problema es no lineal si la matriz de rigidez o el vector de carga depende del desplazamiento. Las estructuras no lineales se clasifican como materiales no lineales (asociado con cambios en las propiedades del material, como la plasticidad) o en geometrías no lineales (asociadas con cambios en la configuración debido a grandes deflexiones de una viga elástica delgada). En transferencia de calor la no linealidad puede ser debido a la dependencia de la temperatura con la conductividad térmica (que hace que los coeficientes de la matriz dependan de la temperatura) y de la radiación (el flujo de calor por radiación es una función no lineal de la temperatura). En general, para problemas independientes del tiempo simbolizado como $[K]\{D\}=\{R\}$, en un análisis lineal

ambos $\{K\}$ y $\{R\}$ se observan independiente de $\{D\}$, mientras en un análisis no lineal $\{K\}$ y/o $\{R\}$ son funciones de $\{D\}$.

La clasificación lineal y no lineal es artificial debido a que la realidad física presenta comportamientos complejos del tipo no lineal. Sin embargo, algunos pueden ser obtenidos satisfactoriamente con aproximación lineales, como son la mayoría de problemas de esfuerzos y de conducción de calor. Las formulaciones no lineales pueden resultar muy complicadas y su solución costar de 10 a 100 veces más de lo requerido en un análisis lineal, teniendo los mismos grados de libertad.

Varias situaciones físicas presentan grandes no linealidades que no pueden ser ignoradas. Las relaciones esfuerzo deformación puede ser no lineal de una manera independiente o dependiente del tiempo. Un cambio en la configuración puede causar que las cargas alteren su distribución y magnitud o causar huecos que abren y cierran. Piezas de acoplamiento pueden golpearse o deslizarse. La soldadura y los procesos de fundición causan que cambie su conductividad, módulo y fase. La generación de vórtices en el vaciado durante el flujo de fluidos genera cargas oscilatorias en la estructura. Rotaciones previas al pandeo alteran la rigidez de un cascarón y cambian su carga de pandeo. La consideración del detalle de estos comportamientos requiere de análisis no lineales.

1.1.2 Ansys

El paquete de elemento finito ANSYS es un software que permite realizar desde un análisis estático lineal simple hasta un análisis dinámico transitorio no lineal. En el método de elemento finito, las componentes del vector desplazamiento en los nodos son las variables principales a determinar en un análisis estructural. En el análisis de transferencia de calor la temperatura será la variable principal desconocida [2]. Un análisis típico en ANSYS consta de tres pasos, que son [3]:

- Construir el modelo geométrico.
- Aplicar cargas y obtener la solución.
- Revisión de los resultados.

1.1.2.1 Construcción del Modelo

En este paso se define lo siguiente:

a) El tipo de elemento. - La librería del ANSYS contiene más de 100 diferentes tipos de elementos y se clasifican como: elemento barra, elemento placa, elementos sólidos, sólidos de eje simétrico, placa plana en flexión, cascarón de eje simétrico y cascarón curvo. Cada elemento tiene un número único y un prefijo que identifica la categoría del elemento, por ejemplo: BEAM4, PLANE77, SOLID96.

- b) Constantes reales del material. - Son propiedades que depende del tipo de elemento, tales como la sección transversal de un elemento barra. Por ejemplo, la constante real para un BEAM3, el elemento barra en dos dimensiones son; área, momento de inercia, altura, masa por unidad de longitud.
- c) Las propiedades del material. - Dependiendo de la aplicación las propiedades del material pueden ser lineal, no lineal, isótropo, ortótropo o anisótropo, a temperatura constante o dependiendo de la temperatura.
- d) La geometría del modelo. - Una vez que se definen las propiedades del material, la siguiente etapa en un análisis es generar un modelo de elemento finito (nodos y elementos) que describan adecuadamente el modelo geométrico. Hay dos métodos para crear el modelo de elemento finito: El modelo sólido, el usuario describe la forma geométrica de su modelo y con una instrucción el ANSYS, automáticamente, malla la geometría con nodos y elementos. Se puede controlar el tamaño y forma del elemento que el programa crea. Con generación directa, el usuario manualmente define la ubicación de cada nodo y la conexión de cada elemento.

1.1.2.2 Aplicar las cargas

En este paso se utiliza el procesador *SOLUTION* para definir el tipo de análisis y opciones de análisis, se especifican los pasos de carga e inicia la solución del elemento finito. El tipo de análisis se escoge con base en las condiciones de carga y la respuesta deseada a calcular. Los análisis que se pueden realizar son estático, transitorio, armónico, pandeo, etc.

A) Aplicación de las cargas. - Con la palabra cargas se incluye las condiciones de frontera (restricciones, apoyos o especificar campo fronteras). Así como aplicar cargas internamente o externamente. Las cargas en el programa de ANSYS son divididas en seis categorías: restricciones a los grados de libertad, fuerzas, cargas superficiales, cargas de cuerpo, cargas inerciales, cargas de campos acoplados. La mayoría de estas cargas se pueden aplicar sobre el modelo sólido (puntos clave, líneas y áreas) o en el modelo de elemento finito (nodos y elementos).

Hay dos términos relacionados a las cargas que es necesario saber, paso de carga y subpaso de carga. Un paso de carga es simplemente una configuración de cargas por las cuales se puede obtener una solución. En un análisis estructural, por ejemplo, se pueden aplicar cargas de viento en un solo paso de carga y la gravedad en otro paso de carga. Los pasos de carga son también útiles para dividir una curva de historia de carga en varios segmentos. Los subpasos de carga son incrementos de paso tomados dentro un paso de carga, se utilizan principalmente para propósitos de convergencia y exactitud.

B) Especificaciones del paso de carga. - Esta opción permite pasar de un solo paso de carga hasta un conjunto de paso de carga, así como a un número de

subpasos y el tiempo al final de un paso de carga, dependiendo del tipo de análisis.

C) Solución. Finalmente, cuando se tiene todo lo anterior el programa de ANSYS puede tomar toda la información del modelo a partir de la base de datos y calcular los resultados.

1.1.2.3 Revisión de los resultados

Una vez que la solución ha sido calculada, se puede utilizar el postprocesador del ANSYS para revisar los resultados. Se pueden visualizar contornos, formas deformadas, listar e interpretar los resultados del análisis.

Dentro de las técnicas que se utilizan para describir la reacción que tiene un material al aplicarle una fuerza externa, se encuentra el ensayo de tensión y flexión.

1.1.2.3.1 Ensayo de tensión

En esta prueba el material suele estirarse y recupera su longitud original si la fuerza no supera el límite elástico del material (Figura 1.1). Bajo tensiones mayores, el material no vuelve completamente a su situación original y cuando la fuerza es aún mayor, se produce la ruptura del material. Se expresa en términos de cantidades que son funciones del esfuerzo o de la deformación o ambas simultáneamente.

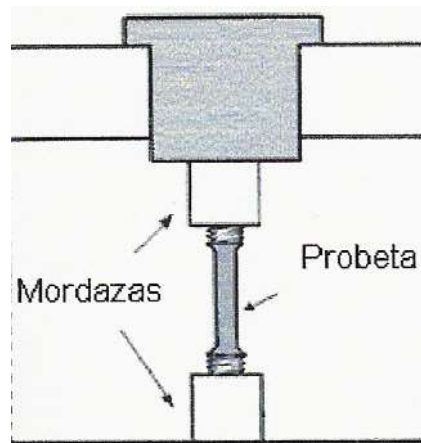


Figura 1.1 Ensayo de tensión

A partir de esta prueba, se obtiene un grafico de σ (GPa, Pa, N) vs. ϵ (mm). Para un material metálico se obtiene como muestra la Figura 1.2.

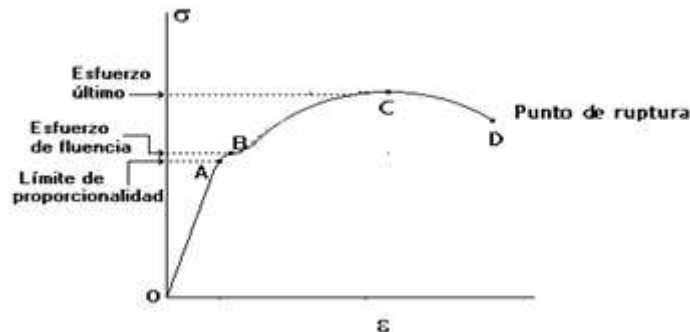


Figura 1.2 Esfuerzo-deformación de un material metálico

Donde:

- a) Límite de proporcionalidad (A): Se define como el esfuerzo máximo en que el esfuerzo y la deformación permanecen directamente proporcionales. Se determina trazando una línea recta tangente a la curva, en el origen, y anotando la primera desviación que tenga la curva en su linealidad.
- b) Límite elástico o esfuerzo de fluencia (B): es el esfuerzo máximo que puede soportar el material sin sufrir una deformación permanente. Para su determinación exacta se requiere que la carga aumente sucesivamente a esfuerzos mayores, seguidos de una descarga y mediciones para detectar alguna deformación permanente.
- c) Esfuerzo máximo o esfuerzo último (C): es el esfuerzo máximo que soporta el material.
- d) Punto de ruptura (D): se define como la elongación máxima que soporta el material antes de sufrir ruptura.

Existen otros parámetros que pueden calcularse como:

e) Elongación en la ruptura: se determina mediante $\Delta L/L_0$, en donde ΔL es el cambio de longitud ($L_f - L_0$), casi siempre se expresa como porcentaje:

$$\%elongación = 100 \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

L_f = longitud final

L_0 = longitud inicial;

f) Módulo de elasticidad, módulo de Young o rigidez del material: es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación a esfuerzos inferiores al límite proporcional.

$$S = Ee \therefore \frac{S}{e} = E$$

Dónde: S = esfuerzo; e = deformación; E = módulo de elasticidad que se obtiene:

$$E = \frac{(S_1 - S_2)}{(e_1 - e_2)}$$

Por otro lado, para una fibra de carbono se obtiene un gráfico teórico como se muestra en la Figura 1.3a y experimental en la Figura 1.3b [3].

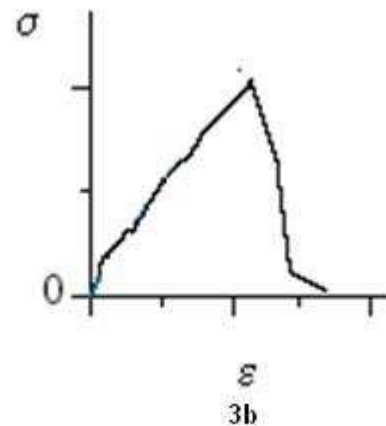
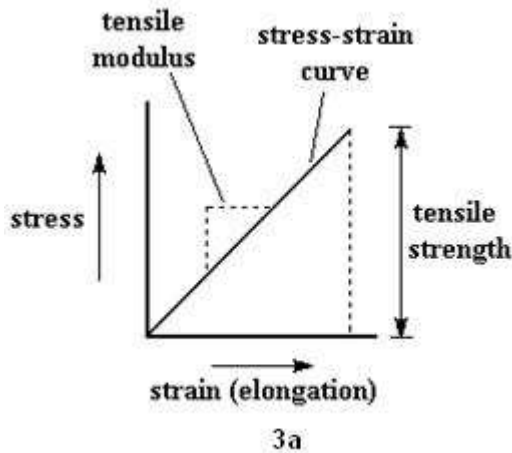


Figura 1.3a Curva teórica de fuerza vs desplazamiento de fibra de carbono

Figura 1.3b Curva real de fuerza vs desplazamiento de fibra de carbono

Como se observa, la forma del gráfico obtenido en un material metálico y un material compuesto, difiere en que en este último gráfico solo es posible determinar el límite de proporcionalidad y punto de ruptura.

2 Metodología experimental

2.1 Selección de diseño de probeta

A continuación, se resume la metodología que fue necesario desarrollar para obtener los valores del módulo de elasticidad y resistencia última especificados por el proveedor de la fibra de carbono. Para facilitar la interpretación de la misma, se dividió en 4 partes.

2.1.1 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039

Se solicitó al proveedor alguna metodología referenciada para estas pruebas, éste proporcionó la Norma D 3039: “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” [5] que recomienda dimensiones de probeta (mostrados en la Figura 2.5) y propone, para realizar estos ensayos, colocar láminas de metal a la probeta para evitar fisuras en la fibra al momento de tener contacto con las mordazas y distribuir la fuerza de sujeción homogéneamente.

Considerando estos aspectos, a partir de una lámina de fibra de carbono se realizó lo siguiente:

- 1) Se fabricaron 4 probetas con una longitud de 250 mm de largo, 15 mm de ancho y 1,4 mm de espesor, como muestra la Figura 2.1.

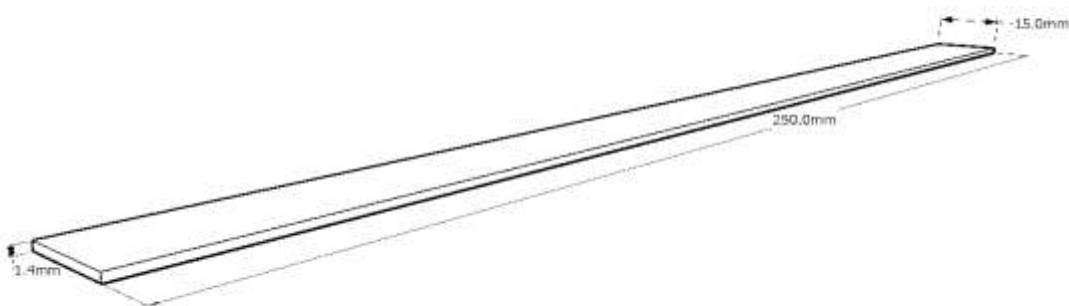


Figura 2.1 Medidas de la Probeta de ensayo

2) A estas probetas se pegaron “tabs” (laminillas) de acero al carbono de 16 mm de largo x 1,4 mm de espesor y un ángulo de inclinación de 7° a las probetas de fibra de carbono (por ambos lados), utilizando resina SikaDur 32 gel (2:1 A:B) [6]. Figura 2.2.

3) Las medidas de las probetas con “tabs” fueron como muestra la Figura 2.3.

4) Las probetas ensayadas se representan en la Figura 2.4.

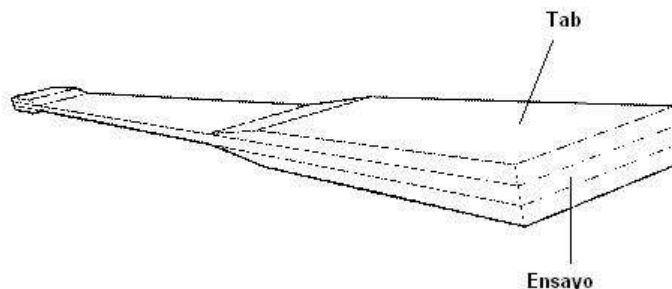


Figura 2.2 Colocación de las laminillas sobre el ensayo

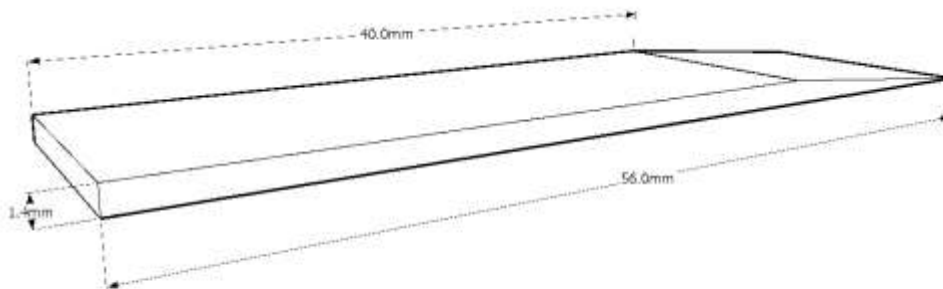


Figura 2.3 Probetas para ensayar

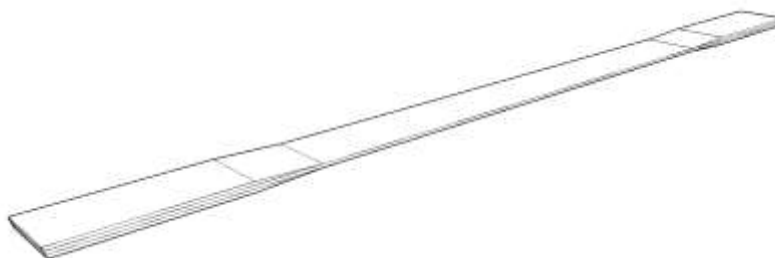


Figura 2.4 Probetas de ensayo

Con esta metodología se logró alcanzar el valor del Módulo de elasticidad requerido por el proveedor, pero desafortunadamente los valores de esfuerzo último no fueron alentadores, esta situación llevó a especular que posiblemente la falta de homogeneidad en el espesor durante el pegado impedía una distribución uniforme de carga en la laminilla, decidiendo diseñar “moldes” para lograr un espesor homogéneo en todas las probetas.

2.1.2 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039/D-3039 M-08 y utilizando “molde” de pegado

Para estas pruebas el diseño de la probeta utilizado fue de acuerdo con lo establecido por la Norma D 3039 pero, para este caso, durante el pegado de las laminillas se utilizó un “molde” metálico, como muestra la Figura 2.5., que previo a su uso fue limpiada con alcohol etílico para eliminar impurezas. La resina utilizada fue SikaDur 32 gel (2:1 A:B) [6], pero por la consistencia muy líquida que presentaba era imposible mantener un espesor uniforme, por lo que por recomendaciones del proveedor; a la mezcla se le añadió una cantidad de cemento (aprox. 6 gramos para 10 ml de A y 5 ml de B) para lograr una consistencia más viscosa y pudiera aplicarse uniformemente.

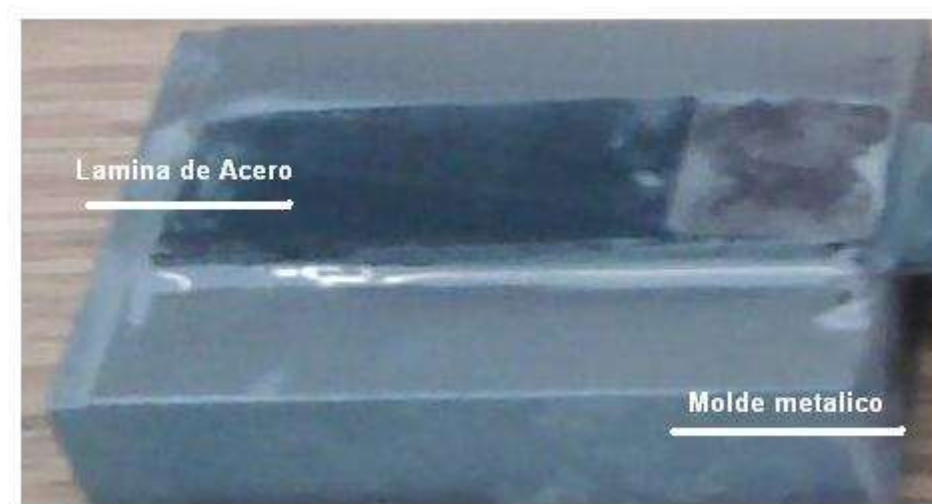


Figura 2.5 Molde utilizado para el pegado de las laminillas con la fibra de carbono

El procedimiento de pegado se describe en la Figura 2.6, primero se colocó la laminilla de acero al carbono dentro del molde, sobre ésta se aplicó, con una brochita, la resina hasta el límite del molde y, finalmente, se colocó la probeta de fibra de carbono ejerciendo presión, después de 20 minutos fue retirada del molde y se le dio un tiempo de secado de 8 días en condiciones estándar y, posterior a este tiempo, se introdujeron a una mufla por 6 horas a 50°C para asegurar el secado.

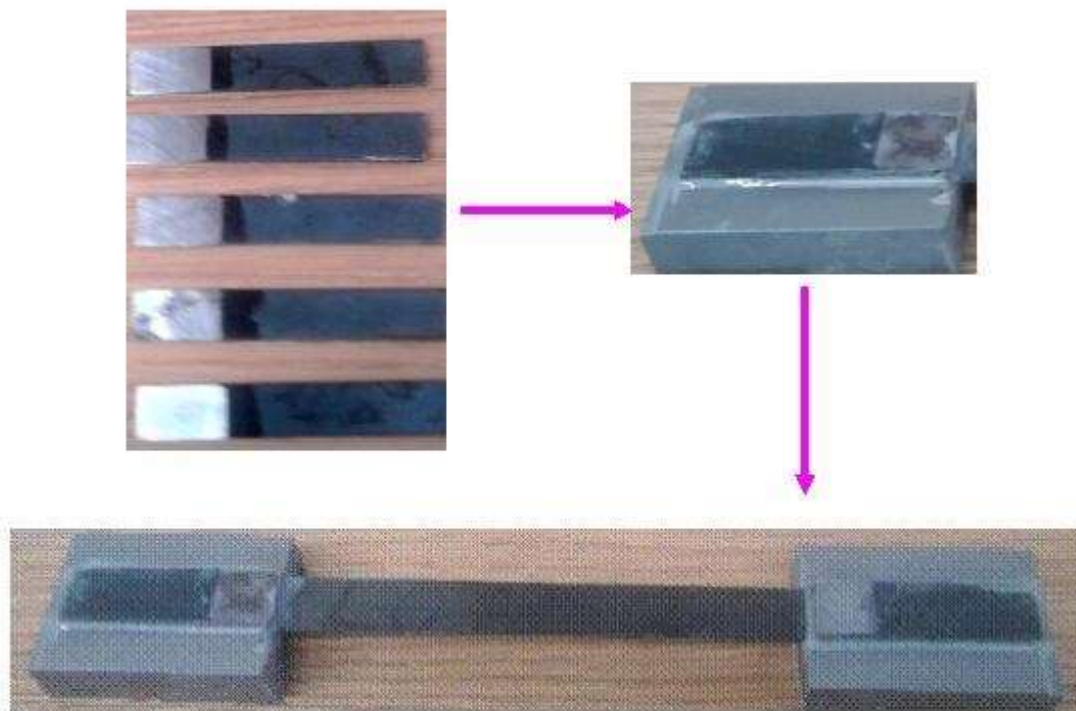


Figura 2.6 Pegado de las laminillas a la probeta de fibra de carbono

Aun con estas consideraciones experimentales los resultados no fueron alentadores y se observaba falta de fraguado, proponiendo 3 relaciones: 1:0.5, 1:1 y 1:2 (resina: cemento), pero los resultados seguían siendo los mismos, lo que llevó a descartar la aplicación de la resina Sika Dur 32 gel + cemento. A la par se evaluó el epóxico Resistol a una relación de 1:1 (A:B) en peso, que fue aplicado con una brochita y un tiempo de secado de 24 horas a temperatura ambiente y 18 horas en la mufla a 45°C, pero los resultados obtenidos no fueron alentadores.

2.1.3 Uso de la técnica numérica de elementos finitos para selección de 3 diseños de probeta fabricadas

Considerando todos los resultados e inconvenientes de los ensayos realizados con base al diseño de la Norma ASTM D-3039, se utilizó la técnica numérica de elementos finitos para encontrar la geometría que distribuya mejor los esfuerzos. Se analizaron 6 diseños de probeta, los cuales se modificaron teniendo en cuenta las relaciones de las dimensiones para adecuarlos al tamaño de las muestras a ensayar, es decir, los modelos propuestos son modificaciones de los originales, los cuales se simulaban con elemento finito. A continuación, se indican las geometrías seleccionadas y referencias utilizadas:

- A) George C. Sih, "Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials: Structural Integrity and Microstructural Worthiness", Springer USA, 2008 [7].

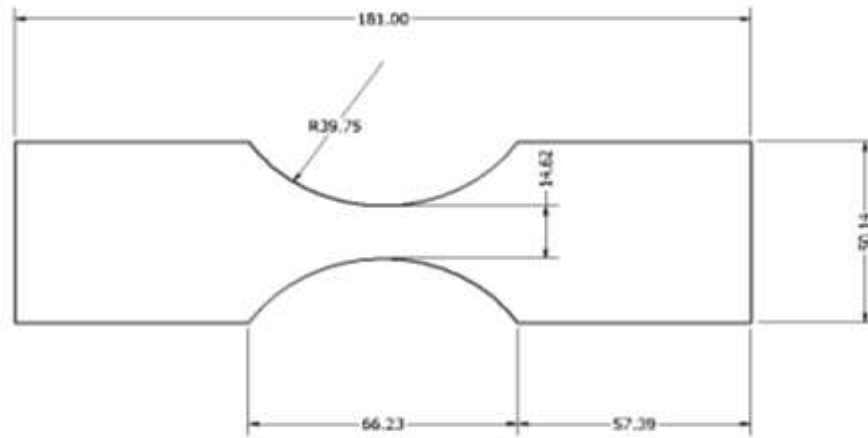


Figura 2.7 Propuesta I

- B) B. Täljsten, K. Orosz and G. Fischer, Crack Development in CFRP Reinforced Mortar – An Experimental Study, 2007 [8].

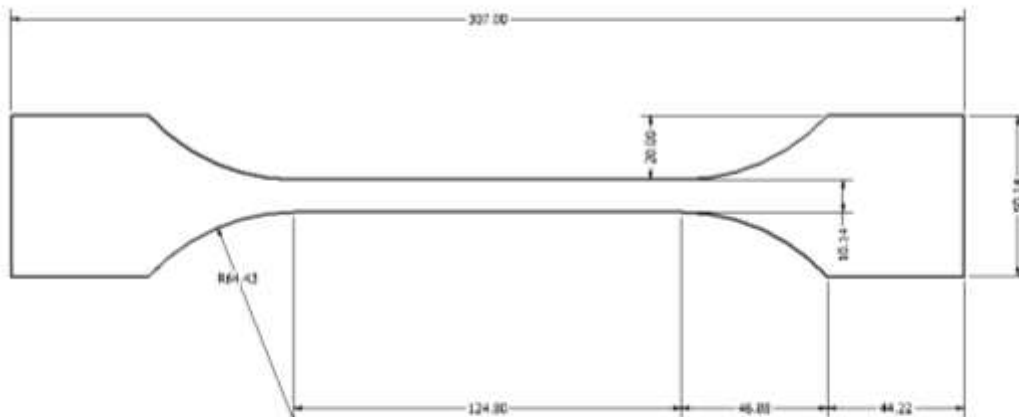


Figura 2.8 Propuesta II

C) ASTM E8 / E8M – 09: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [9].

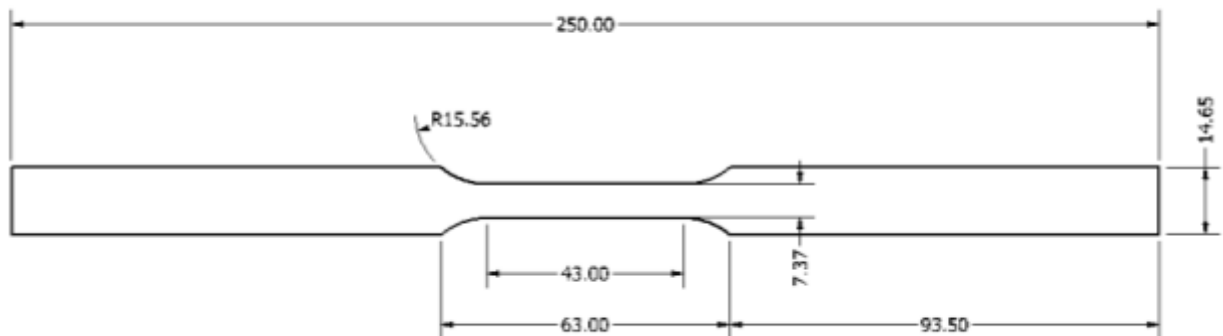


Figura 2.9 Propuesta III

D) ASTM E8 / E8M – 09: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [9].

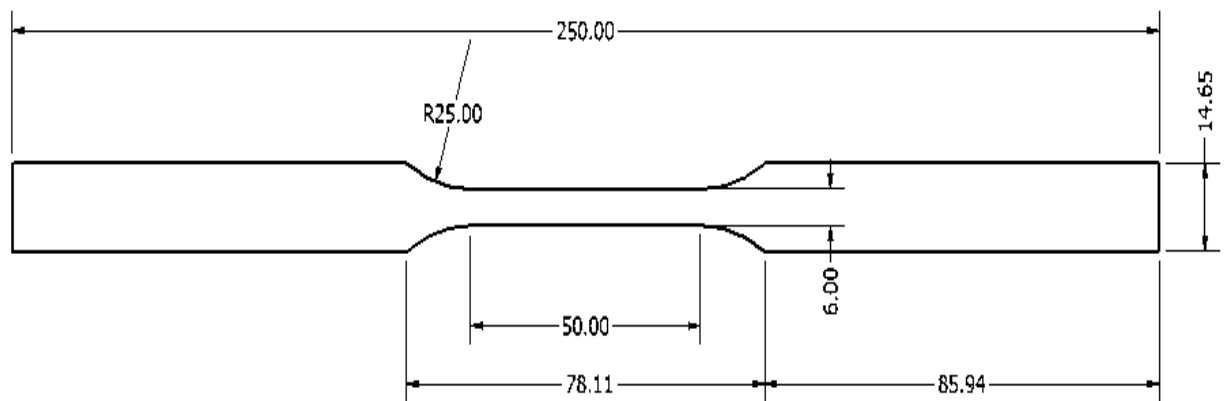


Figura 2.10 Propuesta IV

- E) S.R. Hallett and C. Ruiz, Material Characterization Tests and Modelling of Carbon Fibre T3001914 at Impact Rates of Strain, 1997 [10].

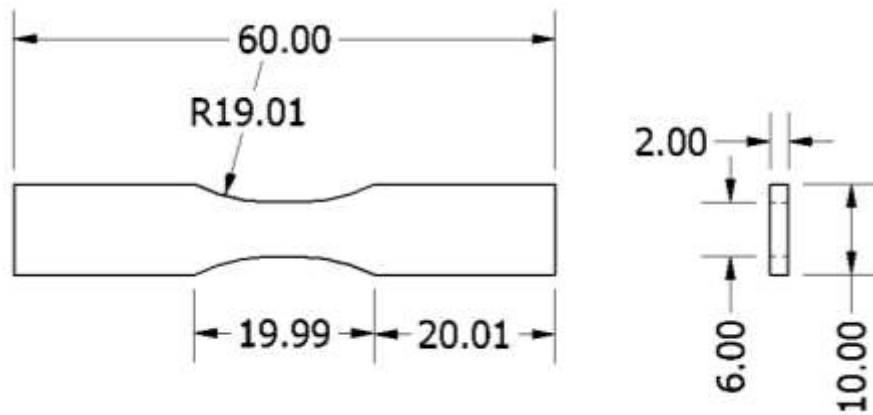


Figura 2.11 Propuesta V

- F) S.R. Hallett and C. Ruiz, Material Characterization Tests and Modelling of Carbon Fibre T3001914 at Impact Rates of Strain, 1997 [10].

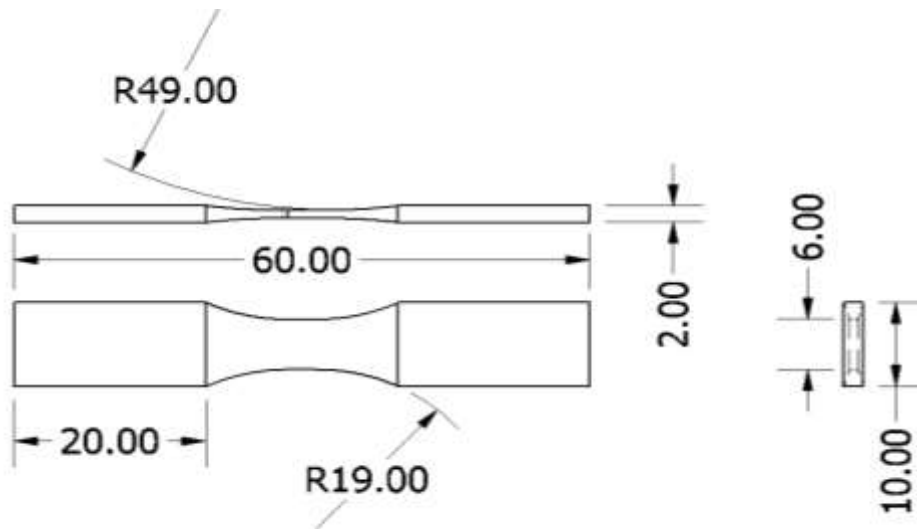


Figura 2.12 Propuesta VI

Con base en los resultados obtenidos en la simulación, se seleccionaron 3 diseños de probeta que fueron manufacturados en el laboratorio del IMT. Es necesario mencionar que la geometría se conservó, pero las medidas del espesor y longitud difirieron de las establecidas por la bibliografía debido a que las fibras de carbono disponibles para manufacturar cuentan con un espesor definido (1,36 mm). Para este caso, se utilizaron 3 diseños de laminillas de acero al carbono mostradas en la Figura 2.13 que fueron acorde a la geometría de los diseños de probeta seleccionados.



Figura 2.13 Laminillas de acero al carbono

En la figura 2.14 se presentan las probetas manufacturadas.

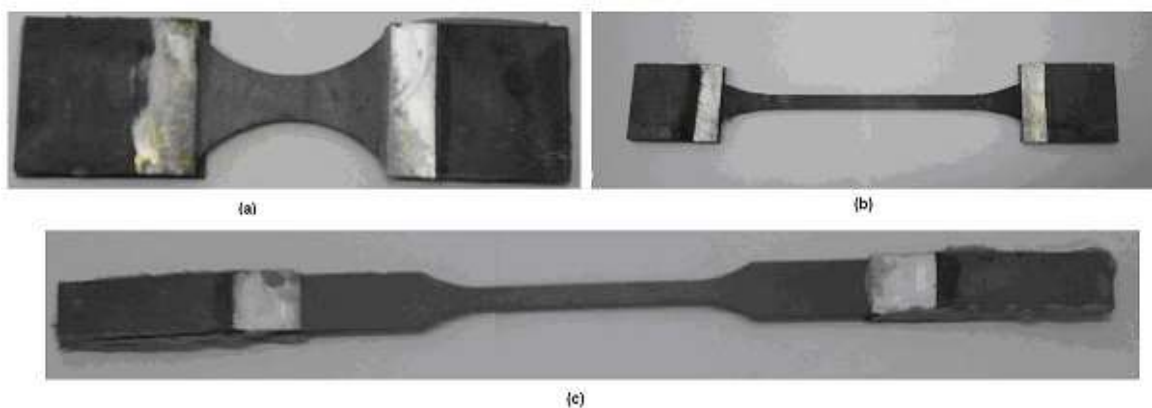


Figura 2.14 a) Propuesta I [7], b) propuesta II [8] y c) propuesta IV [9]

Hasta esta parte experimental se seguía obteniendo un valor del esfuerzo último menor al indicado en la ficha técnica de la fibra de carbono, imputando tal comportamiento a la manufactura del radio de curvatura de las probetas y falta de adherencia de la laminilla con la fibra de carbono.

2.1.4 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039/D-3039 M-08 y laminillas recomendadas por Clifton

El diseño de probeta fue de acuerdo con la Norma ASTM D-3039 pero el diseño de las laminillas fue de acuerdo con lo reportado por Clifton [11] y de acero galvanizado. Clifton recomienda que las plaquitas de sujeción posean un redondeado en un extremo para disminuir la concentración de tensiones, con lo cual se reduce la posibilidad de que inicie una fisura y, por lo tanto, se fracture en ese lugar. Ver figuras 2.15 y 2.16.

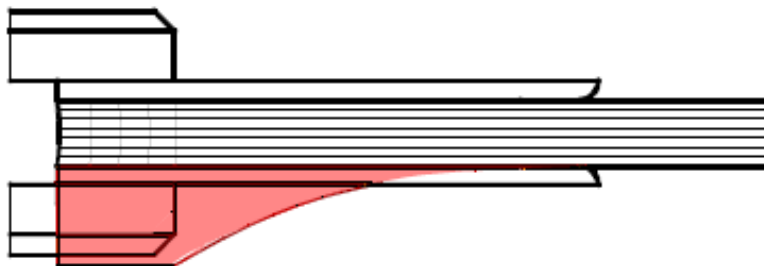


Figura 2.15 Vista transversal de la probeta sujeta con las plaquitas propuestas por Clifton [11]

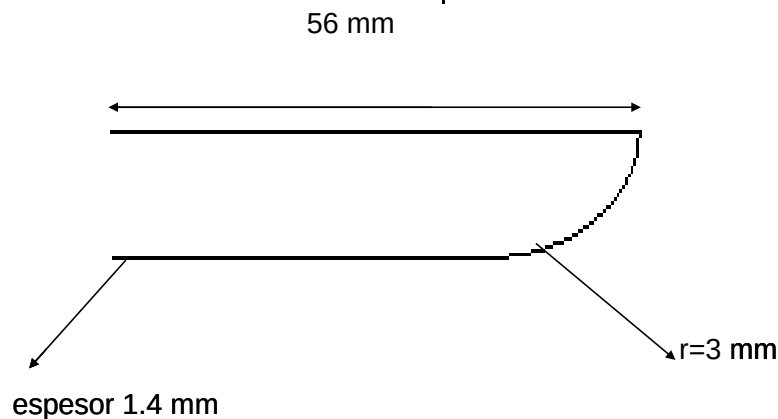


Figura 2.16 Vista transversal de la plaquita fabricada de acero galvanizado [11]

Los pegamentos elegidos fueron Sika 330 [12] y Sika 35 [13] por su alto esfuerzo cortante. Se fabricaron 14 probetas con el diseño bajo Norma, pero sólo 2 fueron pegadas con Sika 330 y 2 más con Sika 35. Se utilizaron solo 4 porque fueron

ensayadas como “blancos” con la finalidad de determinar el adhesivo con mejores resultados. El procedimiento de pegado que se siguió fue el siguiente:

- 1) Las laminillas se lijaron perpendicular a la aplicación de la fuerza con lija #80.
- 2) De acuerdo con las especificaciones de la ficha técnica de cada adhesivo se prepararon las mezclas
- 3) La mezcla se aplicó con una brochita y se trató de obtener un espesor homogéneo
- 4) El tiempo de secado fue de 12 días a temperatura ambiente, para ambos casos.

A continuación, se muestra la comparación de apariencia superficial de las laminillas:



Figura 2.17 Laminillas de acero galvanizado de acuerdo a lo propuesto por Clifton [11] antes de lijar



Figura 2.18 Laminillas de acero galvanizado de acuerdo con lo propuesto por Clifton [11] después de lijar con lija #80

A la par se evaluó el diseño de probeta propuesto por Jones [14] debido a que en el hombro el cambio de sección no era muy abrupto y el ángulo muy grande, se esperaba que los resultados fueran comparables a la estandarizada.

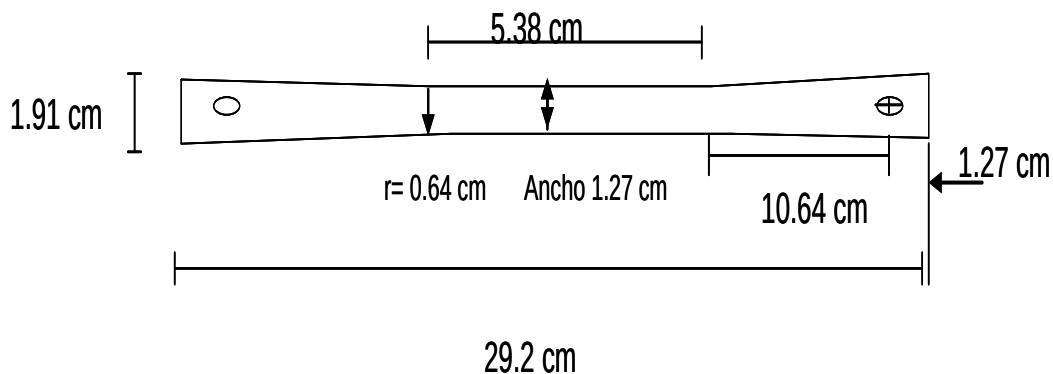


Figura 2.19 Diseño de la probeta propuesto por Jones [14]



Figura 2.20 Diseño de la probeta propuesto por Jones [14]

El procedimiento de pegado fue igual que las probetas estandarizadas: las laminillas fueron también de acero galvanizado ajustadas a la geometría de la probeta, la diferencia con la anterior fue el redondeado en el extremo, ésta no la conservó. El pegado se realizó con el adhesivo Sika 330 [12] y el tiempo de secado fue de 12 días a temperatura ambiente.

***Nota:** Todas las pruebas de tensión se realizaron en la máquina servo hidráulica INSTRON a una velocidad de prueba de 2 mm/min., excepto en la primera parte que se manejaron 2 velocidades 0.25 y 2,5 mm/min. En todas las probetas se realizaron cinco mediciones de espesor, ancho, largo y longitud inicial calibrada para posteriormente hacer un promedio de estas y calcular su área.*

2.2 Análisis materialográfico de probeta de fibra de carbono

Se realizó un análisis materialográfico cuantitativo utilizando un microscopio óptico de platina invertida con la finalidad de medir el diámetro de las fibras y determinar la relación fibra/resina de las láminas de fibras de carbono marca Sika® CarboDur®. El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

- 1) Se utilizó un pedazo de fibra de carbono de una lámina (Figura 2.21).

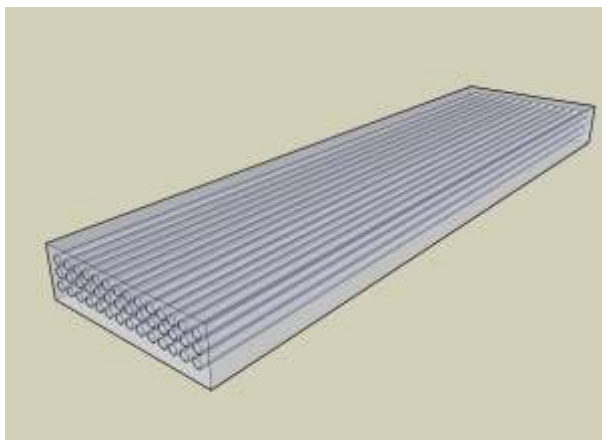


Figura 2.21 Lámina de carbono

2) Se cortó aproximadamente 1 cm² del segmento de fibra carbono con una cortadora de disco sumergible (Figura 2.22).

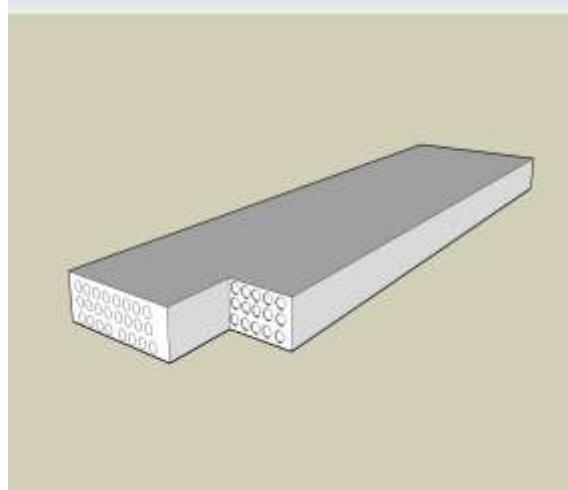


Figura 2.22 Corte de la sección de fibra de carbono utilizada para el análisis metalográfico

3) Posteriormente, la sección de fibra de carbono se colocó dentro de una resina para facilitar su manipulación durante el proceso de desbaste y pulido. El montaje o encapsulamiento de la pieza se realizó en una montadora Hydropress marca Jean Wirtz a una temperatura de 220° C por un tiempo de 25 minutos y una presión de 1250 Psi. La muestra se colocó con las fibras en dirección perpendicular a la superficie, como se muestra en la Figura 2.23

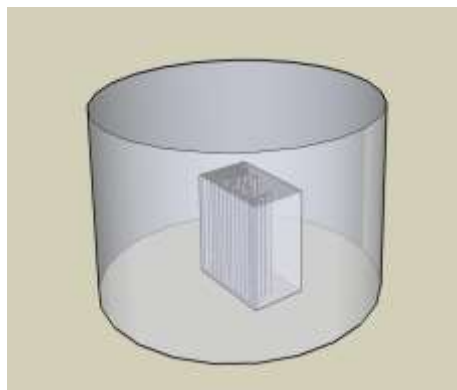


Figura 2.23 Fibra de carbono encapsulada en resina para realizar el análisis metalográfico

4) Una vez montada la pieza en la resina se comenzó a desbastar la parte inferior de la pastilla con lijas de diferente granulometría, de la lija más áspera a la lija más fina disponible, pasando por las diferentes lijas intermedias. Las lijas utilizadas fueron: 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2400, 4000.

5) Después del desbaste, la muestra fue pulida con alúmina de 1 micrómetro durante un tiempo aproximado de 15 minutos.

6) Finalmente, la muestra fue observada en el microscopio. Se tomaron tres micrografías en tres diferentes puntos de la muestra para calcular la fracción de área de fibra de carbono/resina y una micrografía más en diferentes puntos de la misma muestra para medir los diámetros de la fibra de carbono.

3 Resultados

3.1 Resultados de las pruebas mecánicas

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante las 4 etapas del procedimiento experimental en las Tablas 3.1 a la Tabla 3.4.

Tabla 3.1 Resultados de probetas con diseño de acuerdo con la Norma ASTM D-3039

ENSAYO (IDENTIFICACIÓN)	Velocidad de Prueba (mm/min)	Módulo de Elasticidad E (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{\max}$ (MPa)	Elongación (%)
L0201	2 mm/min	160 699	1 612,77	0,61
L0202	2 mm/min	154 008	1 159,92	-
L0203	2 mm/min	165 837	1 511,48	-
L0204	2 mm/min	179 191	1 537,51	0,84

Tabla 3.2 Resultados de probetas con diseño de acuerdo con la Norma ASTM D-3039 y utilizando “molde” de pegado

ENSAYO (IDENTIFICACIÓN)	Velocidad de Prueba (mm/min)	Módulo de Elasticidad E (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{\max}$ (MPa)
L0201	2 mm/min	154 557	858, 85
L0202	2 mm/min	174 525	1 178, 50
L0203	2 mm/min	144 968	607, 54
L0301	2 mm/min	159 152	506, 60
L0302	2 mm/min	161 881	696, 43

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con los diseños de probeta evaluados con la técnica numérica de elementos finitos:

Propuesta 1

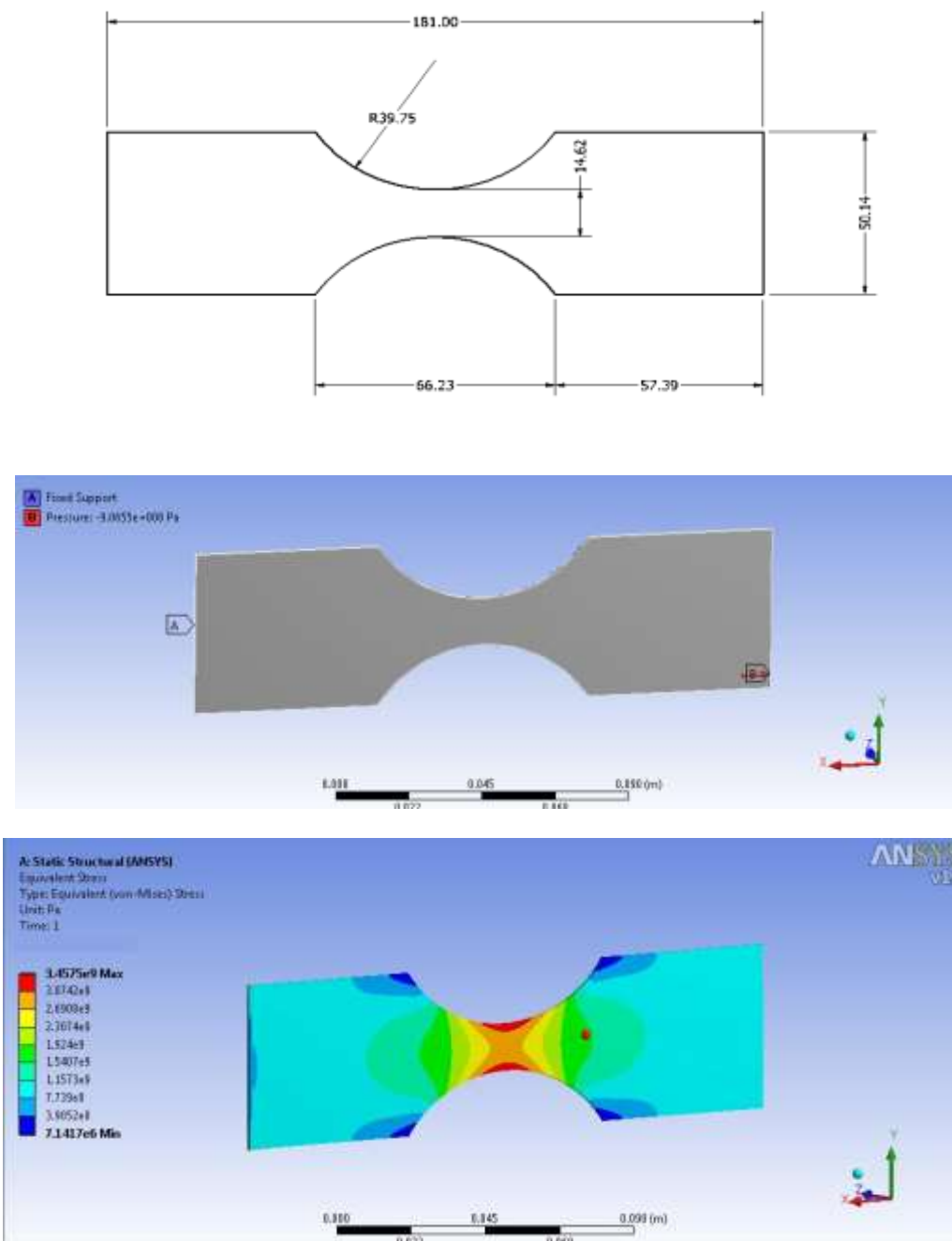
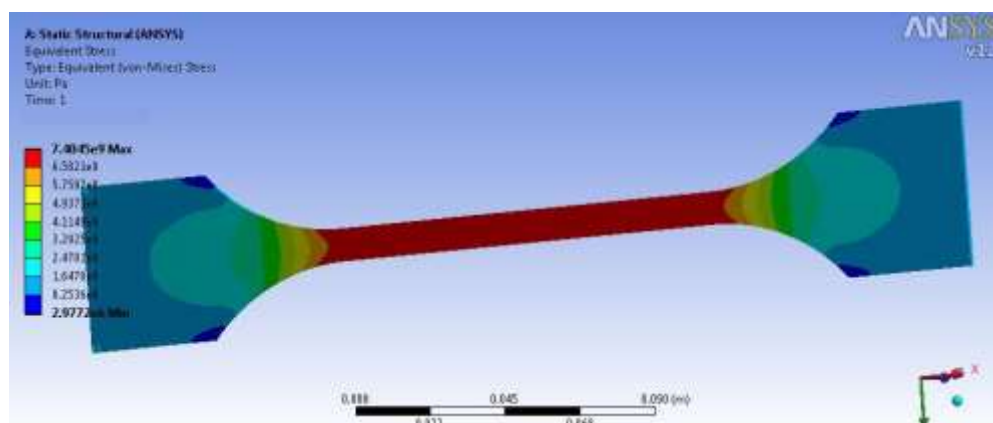
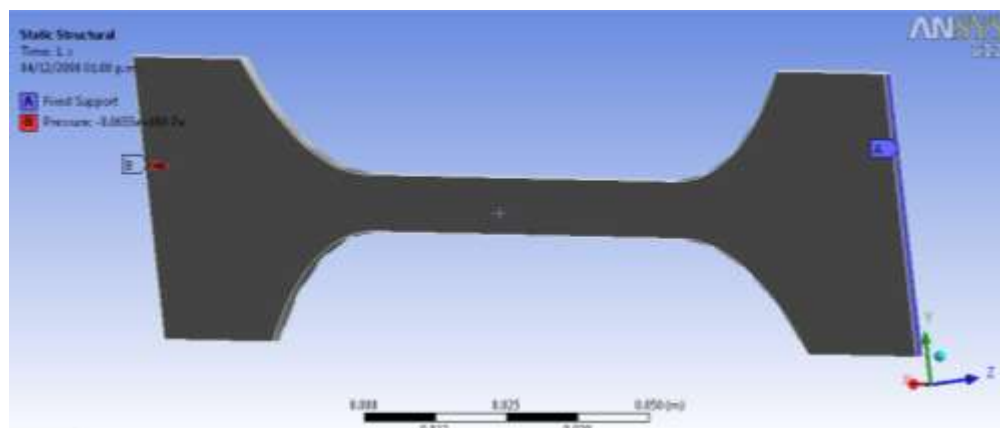
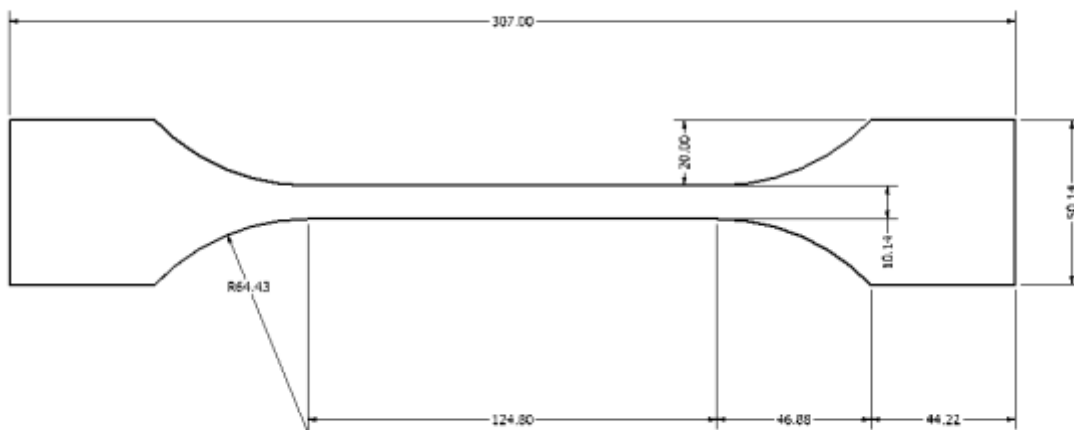


Figura 3.1 Propuesta 1

Propuesta 2**Figura 3.2 Propuesta 2**

Propuesta 3

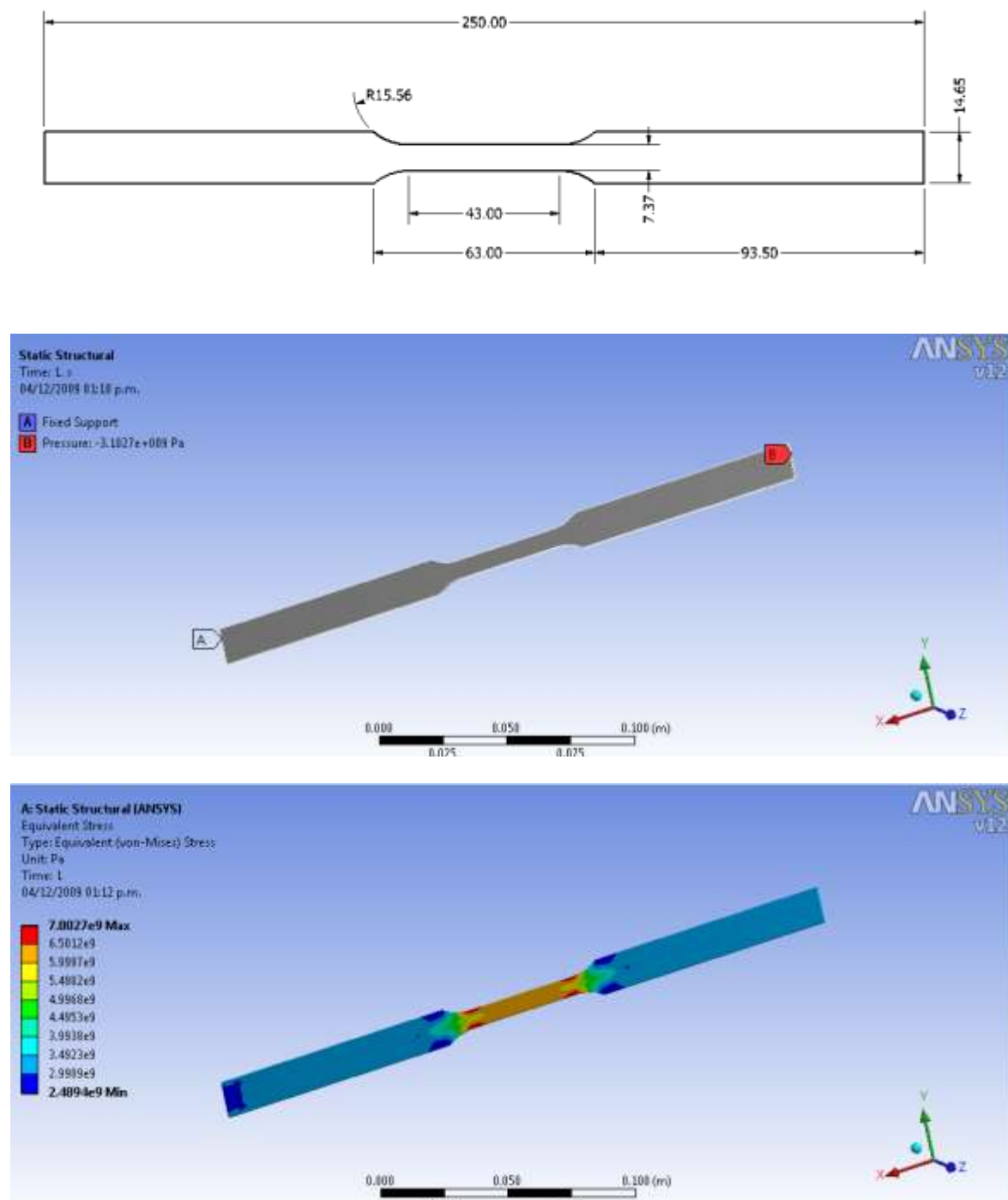


Figura 3.3 Propuesta 3

Propuesta 4

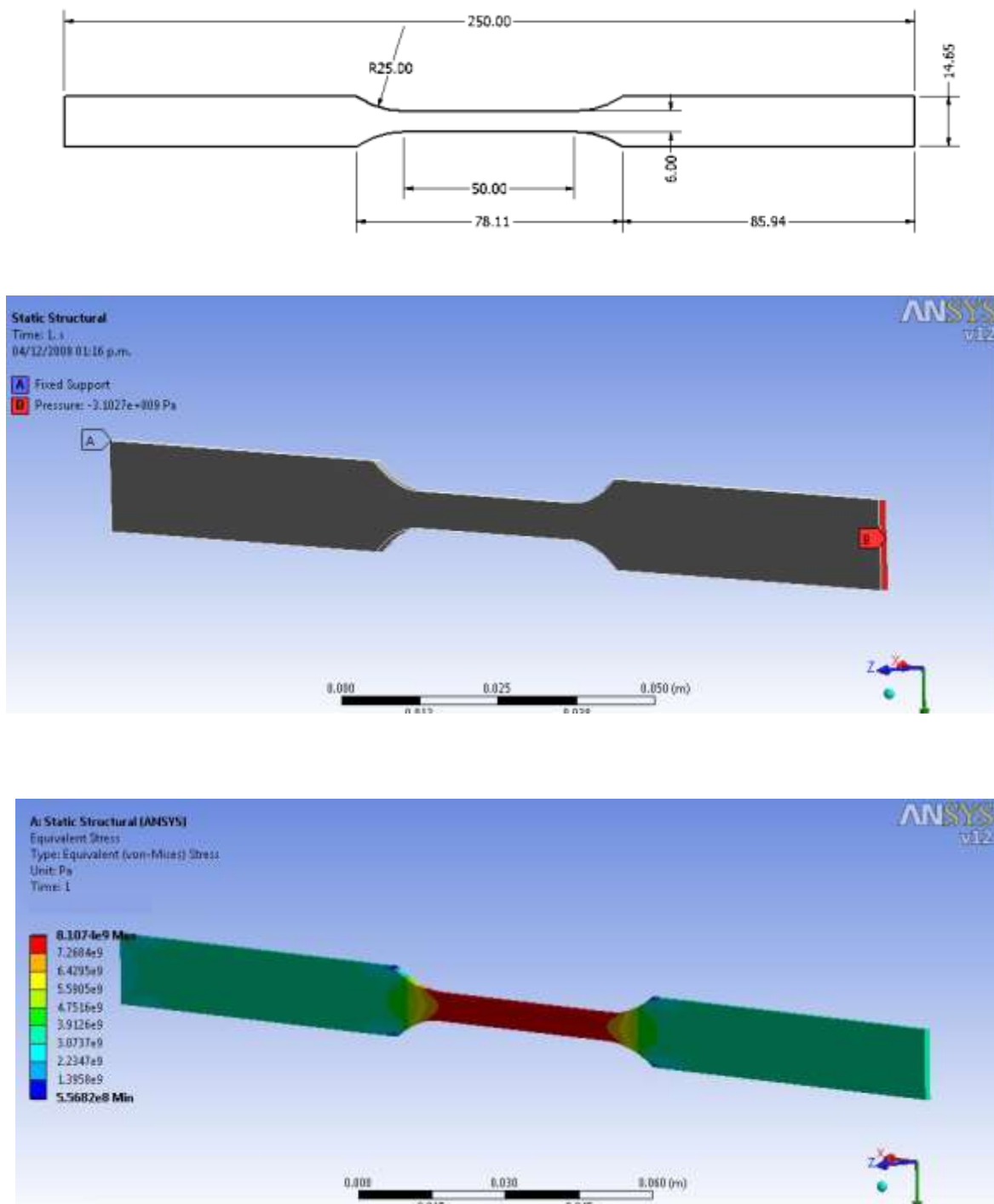


Figura 3.4 Propuesta 4

Propuesta 5

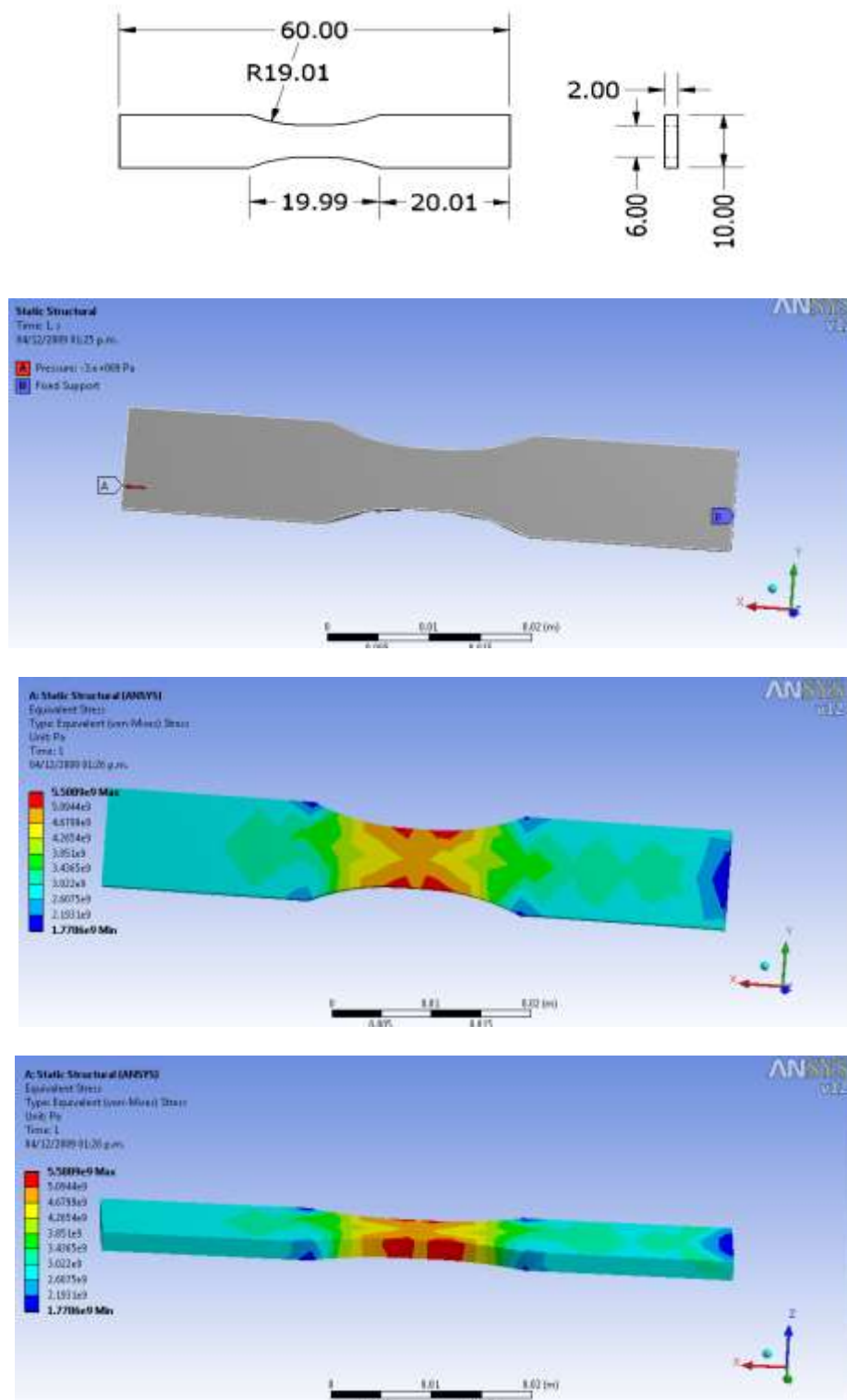


Figura 3.5 Propuesta 5

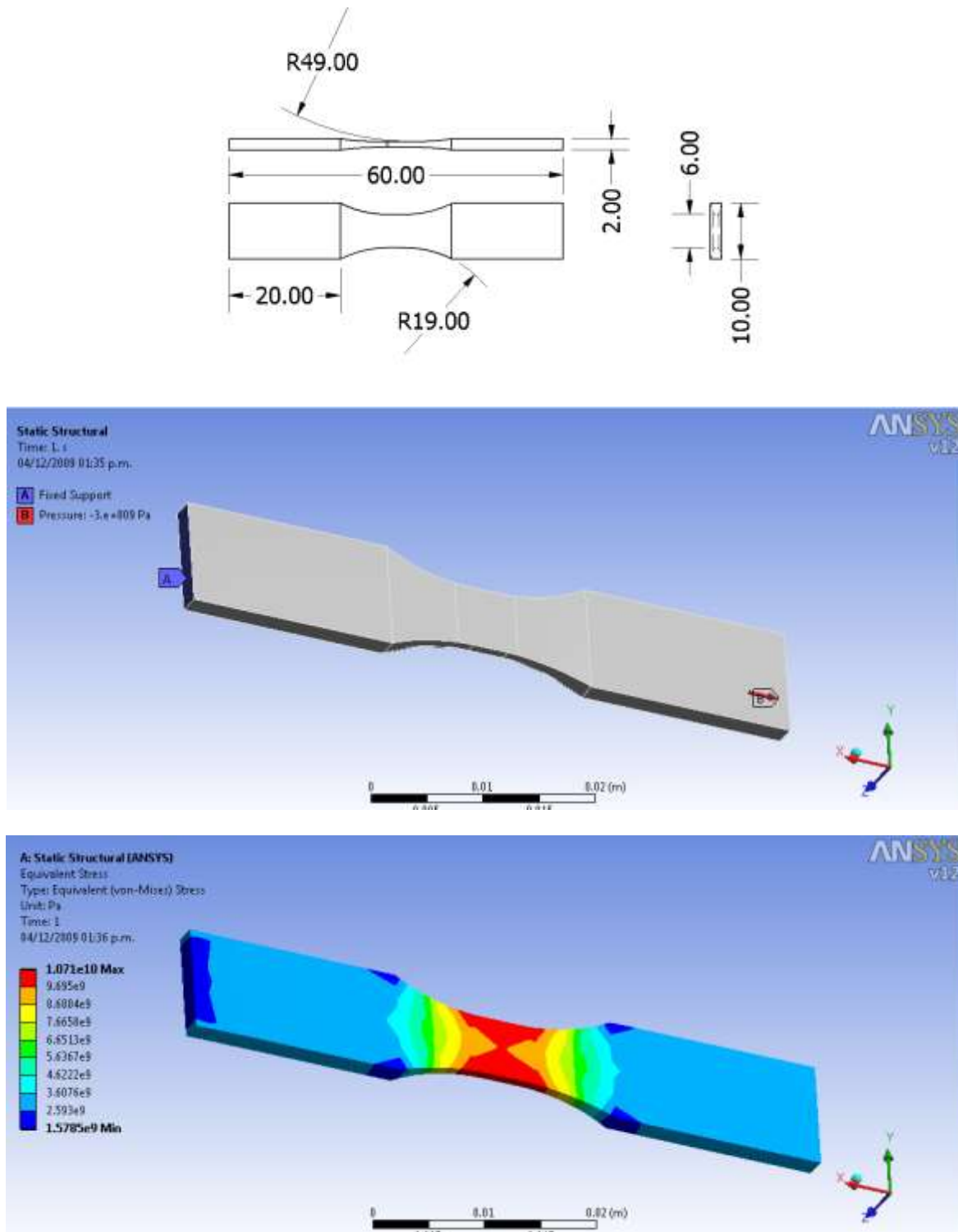
Propuesta 6

Figura 3.6 Propuesta 6

Tabla 3.3 Resultados de los 3 diseños de probeta fabricadas y seleccionadas con base en resultados obtenidos con la técnica numérica de elementos finitos

ENSAYO (IDENTIFICACIÓN)	Velocidad de Prueba (mm/min)	Módulo de Elasticidad E (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{\max}$ (MPa)
Ensayo 1 de propuesta 1	2 mm/min	13 347	1 833,9
Ensayo 2 de propuesta 1	2 mm/min	163 337	836,12
Ensayo de propuesta 2	2 mm/min	147 937	1 505,7
Ensayo de propuesta 4	2 mm/min	145 905	1 099,74

Tabla 3.4 Resultados de probetas con geometría con base en la Norma ASTM D-3039 y diseño de Jones, utilizando diseño de laminillas de sujeción recomendadas por Clifton

ENSAYO (IDENTIFICACIÓN)	Velocidad de Prueba (mm/min)	Resistencia última, σ_u (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Probeta 1 : Norma + Sika 35	2 mm/min	1 025, 45	140 493
Probeta 2: Norma + Sika 35	2 mm/min	1 793,22	167 825
Probeta 3: Norma + Sika 330	2 mm/min	2 953	177 854
Probeta 4: Norma + Sika 330	2 mm/min	2 829	162 987
Probeta 5: Norma + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3091	166 883
Probeta 6: Norma + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3084	166 550
Probeta 7: Norma + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3171	168 930
Probeta 8: Norma + Sika 330 lote 3	2 mm/min	2944	161 529
Probeta 9: Norma + Sika 330 lote 3	2 mm/min	2865	161 494
Probeta 10: Norma + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2753	160 314
Probeta 11: Norma + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2552	162 427
Probeta 12: Norma + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2725	161 960
Probeta 13: Norma + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2949	160 531
Probeta 14: Norma + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2877	166 090
Probeta 15: Jones + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3 337	176 814
Probeta 16: Jones + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3171	168 056
Probeta 17: Jones + Sika 330 lote 3	2 mm/min	3279	160 942
Probeta 18: Jones + Sika 330 lote 4	2 mm/min	2984	160 963
Probeta 19: Jones + Sika 330 lote 4	2 mm/min	3011	162 575
Probeta 20: Jones + Sika 330 lote 4	2 mm/min	3221	165 859
Probeta 21: Jones + Sika 330 lote 4	2 mm/min	3183	160 936

3.2 Resultados de Análisis micrográfico

Para calcular el porcentaje de fibras de carbono y resina de las láminas de fibras de carbono marca Sika® CarboDur®, se tomó una micrografía de la lámina a 100X como muestra la Figura 3.7, posteriormente con el analizador de imágenes se calculó el área total presente en la micrografía.

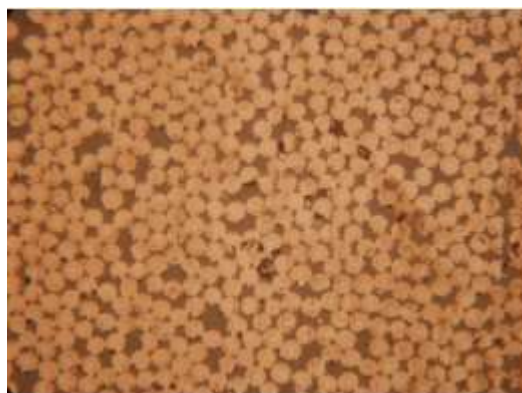


Figura 3.7 Micrografía a 100X de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®, área total que abarca la micrografía = 0,02443121 mm²

Con el mismo programa se calcularon los porcentajes de resina en tres diferentes micrografías, como muestra la Figura 3.8 y, posteriormente, se determinó el área para cada micrografía.

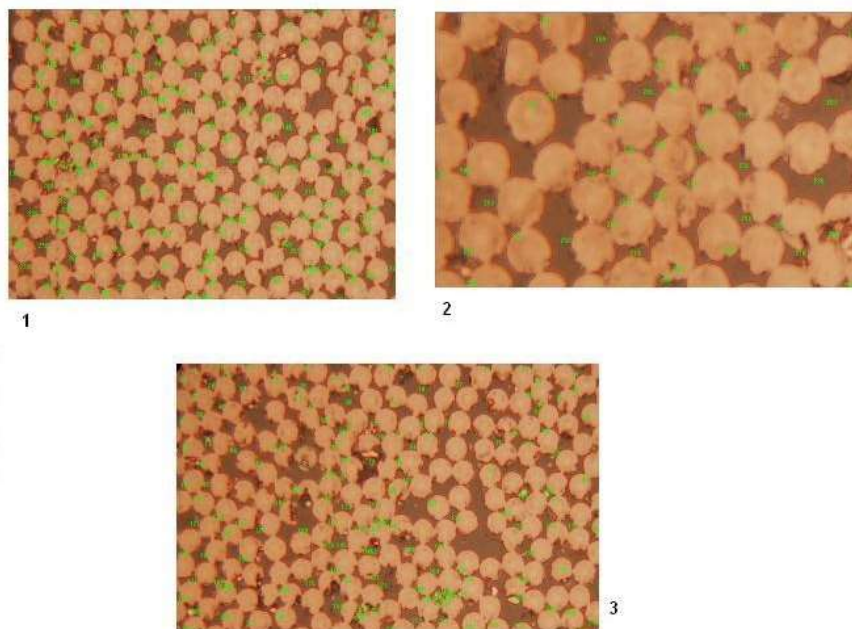


Figura 3.8 Micrografías de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®

a) Micrografía No.1:

Área ocupada por la resina = 0,006524043 mm²

$$\% \text{ Resin } a = \frac{A_{\text{resina}}}{A_{\text{total}}} * 100$$

$$\% \text{ Resin } a = \frac{0,00652404 \text{ mm}^2}{0,02443121 \text{ mm}^2} * 100$$

$$\% \text{ Resin } a = 26,7037257$$

b) Micrografía No. 2:

Área ocupada por la resina = 0,00685728 mm²

$$\% \text{ Resin } a = \frac{0,00685728 \text{ mm}^2}{0,02443121 \text{ mm}^2} * 100$$

$$\% \text{ Resin } a = 28,0677158$$

c) Micrografía No.3:

Área ocupada por la resina = 0,00721 mm²

$$\% \text{ Resin } a = \frac{0,00721 \text{ mm}^2}{0,02443121 \text{ mm}^2} * 100$$

$$\% \text{ Resin } a = 29,4991$$

∴ El promedio contenido de resina = 28,090 %

Posteriormente se hicieron mediciones del diámetro de las fibras de carbono. Por medio de una micrografía a 100X, como muestra la Figura 3.9 y con ayuda del analizador de imágenes, se calculó el diámetro en 30 fibras de carbono seleccionadas aleatoriamente reportadas en la Tabla 3.5.

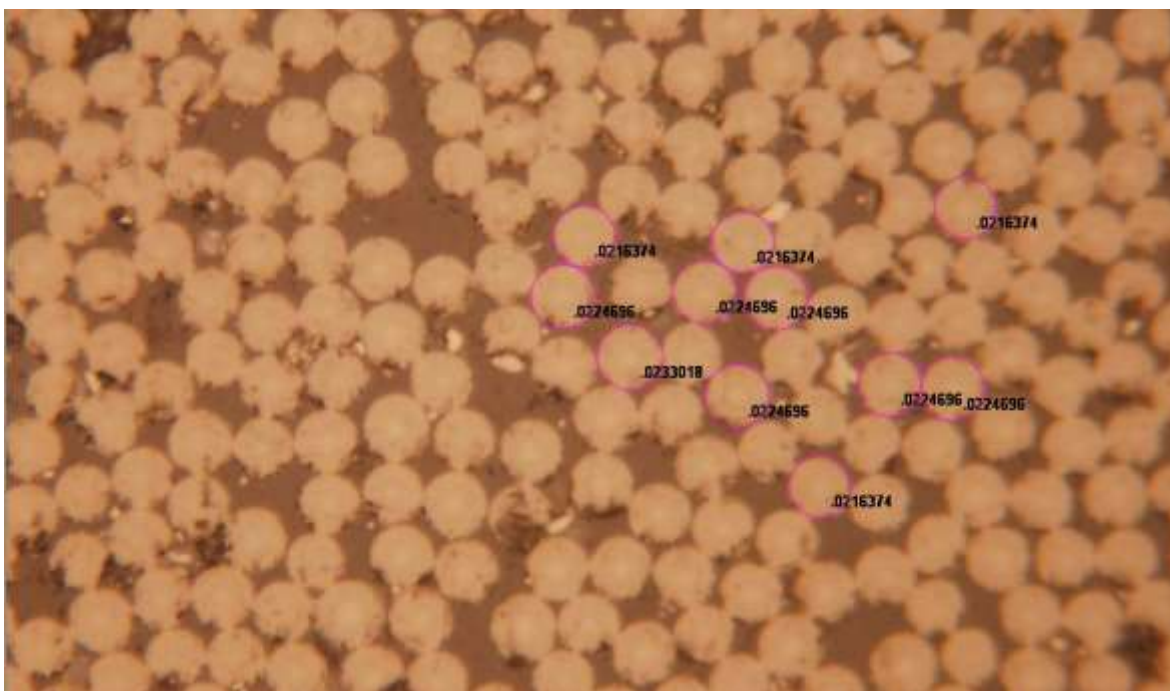


Figura 3.9 Micrografía de lámina de fibra de carbono marca Sika® CarboDur®

Tabla 3.5. Radios y diámetros correspondientes a cada fibra de carbono

Fibra	Radio (μm)	Diámetro (μm)
1	3,841	7,682
2	3,5761	7,1522
3	3,841	7,682
4	3,7086	7,4172
5	3,5761	7,1522
6	3,4437	6,8874
7	3,4437	6,8874
8	3,7086	7,4172
9	3,7086	7,4172
10	3,3112	6,6224
11	3,7086	7,4172
12	3,5761	7,1522
13	3,7086	7,4172
14	3,4437	6,8874
15	3,5761	7,1522
16	3,3112	6,6224
17	3,4437	6,8874
18	3,3112	6,6224
19	3,5761	7,1522
20	3,4437	6,8874
21	3,5761	7,1522
22	3,4437	6,8874
23	3,5761	7,1522
24	3,5761	7,1522
25	3,4437	6,8874
26	3,3112	6,6224
27	3,4437	6,8874
28	3,7086	7,4172
29	3,7086	7,4172
30	3,841	7,682
PROMEDIO	3,56288	7,12576

4 Análisis de los resultados

4.1 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039

Observando los resultados del módulo de elasticidad mostrados en la Tabla 4, el promedio obtenido a partir de estos, igual a 159 016 MPa/mm/mm con una desviación estándar de 10 793, es aproximadamente 0,6% menor al reportado por el proveedor de las láminas de fibras de carbono. Además, de acuerdo con el análisis de los valores de resistencia última y el valor promedio obtenido en los ensayos fue de 769, 584 MPa que es aproximadamente 72,5 % menor al reportado en la ficha técnica del producto.

La discrepancia de los valores obtenidos y los reportados por el proveedor fue atribuida a la falta de fraguado de la resina observada durante los ensayos, a pesar del tiempo y condiciones de secado a las que se sometieron. Tal situación, llevó a hacer las siguientes especulaciones; 1) la cantidad de cemento agregada a la resina no era la adecuada y deberían explorarse otras relaciones para así observar la consistencia de cada relación propuesta; 2) quizá el espesor de resina era muy grueso y debería reducirse a la mitad; y 3) probablemente no existe una unión química entre el cemento y la resina y si existía era muy débil, impidiendo su secado total.

4.2 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039 y utilizando “molde” de pegado

El valor promedio del Módulo de elasticidad cumple con el valor especificado en la ficha técnica del proveedor. No obstante, el valor promedio mayor de resistencia última no cumple con el valor especificado en la ficha técnica de la fibra de carbono.

4.3 Uso de la técnica numérica de elementos finitos para selección de 3 diseños de probeta fabricadas

Los resultados muestran diferencias en la distribución de los esfuerzos máximos en la longitud de las secciones reducidas de las geometrías propuestas, donde en algunas se favorece la distribución de esfuerzos en la zona de interés (sección

reducida) caso de las propuestas 2 y 4. Para el caso de la propuesta 1, se observa mayor factibilidad de ruptura en su centro, criterio considerado para su evaluación.

De acuerdo con los valores del módulo de elasticidad mostrados en la Tabla 3.6 de los 3 diseños de probeta fabricadas y seleccionadas con base en los resultados obtenidos con la técnica numérica de elementos finitos, se observa que el valor máximo obtenido corresponde al diseño de la propuesta 1 ensayo 2. Se observa una discrepancia en los resultados entre los ensayos 1 y 2 de la misma geometría, situación atribuida a que durante el ensayo 1 se notó un desprendimiento de la laminilla de acero con la fibra de carbono, esto se interpretó como una falta de adherencia entre las partes, lamina de acero-epóxico-fibra de carbono.

Por otra parte, si se observan los valores del módulo de elasticidad obtenidos con la propuesta 2 y 4, son valores muy cercanos entre ellos y respecto a la propuesta 1 hay una diferencia de un 10% en promedio, lo que hace un valor aceptable respecto a lo especificado por el proveedor.

Sin embargo, los valores obtenidos del esfuerzo máximo con las 3 propuestas están por debajo del valor mínimo reportado por el proveedor (> 2800 MPa), aunque el valor más próximo fue el obtenido con el ensayo 1 de la propuesta 1, sin olvidar que en éste se observó el deslizamiento de la laminilla de la fibra de carbono. Cabe mencionar que durante los ensayos de las propuestas 1 y 2 se observó la ruptura de la probeta en los hombros, ocasionando fisuras a lo largo de la probeta. Si se retoman los resultados obtenidos con la simulación en elemento finito realizada previamente y se comparan con los obtenidos experimentalmente, se nota que ninguna probeta presentó ruptura en la zona céntrica, como se esperaba de acuerdo con la simulación.

4.4 Diseño de probeta con base en Norma ASTM D-3039 y laminillas recomendadas por Clifton

Después de comparar los resultados obtenidos de resistencia última entre las probetas estandarizadas y pegadas con Sika 35 (probetas 1 y 2) y las 2 probetas estandarizadas y pegadas con Sika 330 (probetas 3 y 4) utilizadas como “blancos o referencia” para seleccionar el adhesivo, se decidió utilizar Sika 330 para el pegado del resto de las probetas, incluyendo las estandarizadas y las propuestas por Jones ^[14], debido a que cumplen con el valor reportado en la ficha técnica ^[15] donde se reporta un valor de resistencia última mayor de 2800 MPa y considerando que durante el ensayo no se observó deslizamiento de las laminillas, lo que significa que la adherencia entre la fibra de carbono y la laminilla es suficiente para llegar a la resistencia última; situación inversa a la observada con el adhesivo Sika 35, donde se observó deslizamiento de las laminillas de sujeción, situaciones que evitaron alcanzar la resistencia última. En las Figuras 4.1 y 4.2, se observa la apariencia de las probetas de fibra de carbono pegadas con Sika 330 y en la Figura 4.3 una probeta pegada con Sika 35, donde se observa el desprendimiento de la laminilla.

Por otro lado, los valores de esfuerzo máximo que se obtuvieron con el diseño estandarizado y con el propuesto por Jones, cumplen con la ficha técnica del material, excepto 3 valores que corresponden a las probetas 10, 11 y 12 (estandarizadas), dicha situación es atribuida a que, durante el pegado, se observó un cambio de consistencia del adhesivo con el transcurso del tiempo. Previo al pegado de las laminillas, la idea fue mantener una repetibilidad de pegado, razón por la que se preparó una cantidad de mezcla considerando el número total de probetas pero, desafortunadamente, durante el pegado se observó que conforme el tiempo transcurría la consistencia del adhesivo cambiaba, es decir, inicialmente era aceitosa y conforme el paso de tiempo se solidificaba hasta una consistencia “chiclosa” lo que dificultó su aplicación sobre las laminillas de acero de las probetas 10, 11 y 12, que fueron las últimas en pegar.

Considerando el promedio de los resultados de las probetas estandarizadas y las propuestas por Jones, existe una diferencia del 6% entre ellos, favoreciendo levemente el diseño de Jones. Esta diferencia se considera mínima puesto que los valores en ambos casos son del mismo orden.

Otro punto importante, es que estos ensayos se realizaron utilizando mordazas más grandes respecto a las usadas en ensayos anteriores (reportes anteriores) que cubrieron toda la superficie de sujeción garantizando que la fuerza de sujeción fuera en toda la superficie de la laminilla y así evitar deslizamientos.

4.5 Selección adhesivo epóxico

Los valores esfuerzo-deformación unitaria de las pruebas de tensión directa para seleccionar el adhesivo epóxico más adecuado para las pruebas del material compuesto se muestran en el Anexo de este reporte como Figuras A.1 a la A.4.

Después de comparar los resultados obtenidos de resistencia última entre las probetas estandarizadas y pegadas con el epóxico llamado 35 (probetas 1 y 2) y las 2 probetas estandarizadas y pegadas con el epóxico 330 (probetas 3 y 4) utilizadas como “blancos o referencia” para seleccionar el adhesivo, se decidió utilizar el epóxico 330 para el adherir las laminillas de sujeción al resto de las probetas, incluyendo las estandarizadas y las propuestas en la referencia [11].

Esta selección se debió a que las probetas 1 y 2, en las cuales el epóxico 35 fue el usado para pegar las laminillas de sujeción, mostraron desplazamientos en sus extremos antes de llegar el compuesto de fibras de carbón a su resistencia máxima. Esto implica que la resistencia al cortante del epóxico no fue lo suficiente para tomar los esfuerzos producidos en el ensayo.

Situación inversa se observó con las probetas control en donde se utilizó el adhesivo epóxico 330, en donde no existió deslizamiento de las laminillas de sujeción durante la prueba, permitiendo así alcanzar la resistencia última del compuesto durante la prueba de tensión directa efectuada.

En las Figuras 4.1 y 4.2, se observa la apariencia de las probetas de fibra de carbono pegadas con el epóxico 330 y en la Figura 4.3 una probeta pegada con el 35, donde se observa el desprendimiento de la laminilla.



Figura 4.1 Probeta con diseño de acuerdo con la Norma y pegada con el epóxico 330 [8] durante el ensayo de tensión



Figura 4.2 Probetas pegadas con el epóxico 330 [8] después de ensayar

Es por ello que se seleccionó el epóxico 330 para continuar con las pruebas del resto de las probetas fabricadas de los Lotes 3 y 4.

4.6 Resistencia última

Sin tomar en cuenta los valores de resistencia última reportados en la Tabla 3.4 de las probetas 1 y 2 (epóxico 35), los valores de esfuerzo máximo que se obtuvieron con el diseño estandarizado y con el propuesto en la referencia [11], cumplen con la ficha técnica del material,^[12] excepto en tres probetas (10, 11 y 12 estandarizadas). Dicha situación se atribuye a que durante el pegado de las laminillas de sujeción se observó un cambio de consistencia del adhesivo con el transcurso del tiempo.



Figura 4.3 Probeta con diseño de acuerdo con la Norma y pegada con el epóxico 35 [9] después de fallar

Previo al pegado de las laminillas, la idea fue mantener una repetitividad de pegado, razón por la que se preparó una cantidad de mezcla considerando el número total de probetas. Pero, desafortunadamente durante el pegado, se observó que conforme el tiempo transcurría, la consistencia del adhesivo cambiaba; es decir, inicialmente era aceitosa y conforme el paso de tiempo se solidificaba hasta una consistencia “chiclosa” lo que dificultó su aplicación sobre las laminillas de acero en las probetas 10, 11 y 12, que fueron las últimas en colocarles las laminillas de sujeción.

Considerando el promedio de los resultados de las probetas estandarizadas y las probetas propuestas por la referencia [11], existe una diferencia del 6% entre ellos, favoreciendo levemente el diseño de la referencia [11]. Esta diferencia se considera mínima puesto que los valores en ambos casos son del mismo orden.

Si ahora se analizan los resultados según geometría de probeta (Norma ASTM vs. referencia [11]) se podrían verificar diferencias entre los resultados de cada lote de prueba (3 y 4 en este reporte). Las Figuras 4.4 y 4.5 muestran los comparativos entre Lote de material (3 y 4) y la geometría de la probeta (ASTM vs. referencia [11]).

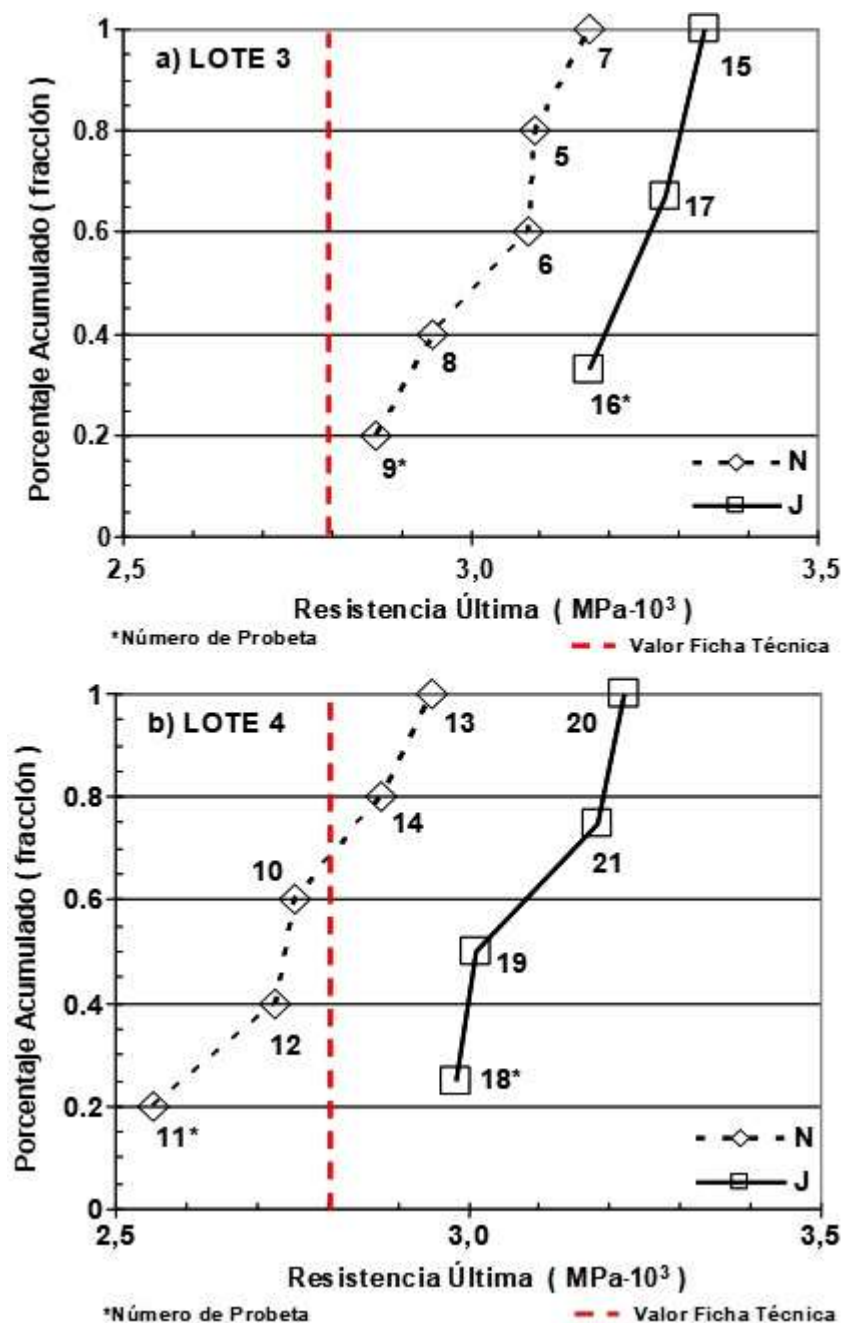


Figura 4.4 Resultados de la Resistencia Última a la Tensión (en MPa·10³) de las probetas de (a) Lote 3 y (b) Lote 4, por tipo de geometría de probeta N=ASTM ^[10] y J= Ref. [11]

Como puede observarse, los valores de resistencia última a la tensión (fuerza máxima dividida entre el área nominal del compuesto a base de fibra de carbón) del Lote 3 (Figura 12a), obtenidos con ambas geometrías de probeta (Norma ASTM y referencia [11]) poseen diferencias muy pequeñas entre sí. Los valores de resistencia última entre las dos geometrías (ASTM y referencia [11]) están separados un factor de casi 1,06 indicando que están solo un 6% arriba los valores de la geometría de probeta de la referencia [11] (serie J) que el propuesto por la ASTM (serie N). En comparación con los valores obtenidos con el material del Lote 4, se observa diferencia entre métodos de prueba, al haber un factor de 1,09, o sea un 9% mayores la geometría de probeta de la referencia [11] con los obtenidos utilizando la geometría de probeta de ASTM.

Con los resultados obtenidos de resistencia última se puede recomendar el uso de ambos métodos, por la poca diferencia que existe entre sus resultados (menores al 10%), se recomienda el uso del método de la ASTM (N) por ser el más conservador.

El valor especificado en la ficha técnica del fabricante [12] estipula una resistencia última nominal mayor a $2,8 \cdot 10^3$ MPa (línea vertical punteada color rojo en la Figura 12). Los resultados de la Tabla 1 y la Figura 12 indican que únicamente tres probetas no alcanzaron dicha resistencia, las cuales corresponden a las probetas 10, 11 y 12. Pero éstas, como se explicó anteriormente, tuvieron el problema de la colocación de las laminillas de sujeción con el epóxico un tanto seco, por lo que se cree que el resultado está enmascarado por un problema de fabricación de la probeta.

4.7 Módulo de Young

Los valores del Módulo de Young fueron obtenidos de los datos de Esfuerzo/Deformación Unitaria de cada una de las pruebas (ver gráficas en Anexo). La pendiente de los puntos en la zona elástica de estas pruebas es el valor estimado del Módulo de Young, como puede observarse en las gráficas inferiores de las Figuras A.1 a la A.21 del Anexo. Los valores de este Módulo para cada probeta se presentan en la Tabla 1.

Como resumen de los resultados, se graficaron los valores de la Tabla 1 a manera de probabilidad acumulada en las Figura 13 para el material de los Lotes 3 (Figura 13a) y 4 (Figura 13b). En las mismas gráficas se colocó el valor de referencia de la ficha técnica del fabricante (línea punteada color roja), el cual corresponde a $160 \cdot 10^3$ MPa. [12]

Es claro observar que todos los valores del Módulo de Young obtenidos, con los dos lotes (Lotes 3 y 4) y las dos geometrías de probetas (ASTM y referencia [11]),

cumplieron los requisitos de la ficha técnica del fabricante, al estar estos a la derecha de la línea punteada color rojo que representa el valor que se quería alcanzar, por lo que todos los ensayos cumplen con lo especificado por el proveedor de la fibra de carbono estudiada.

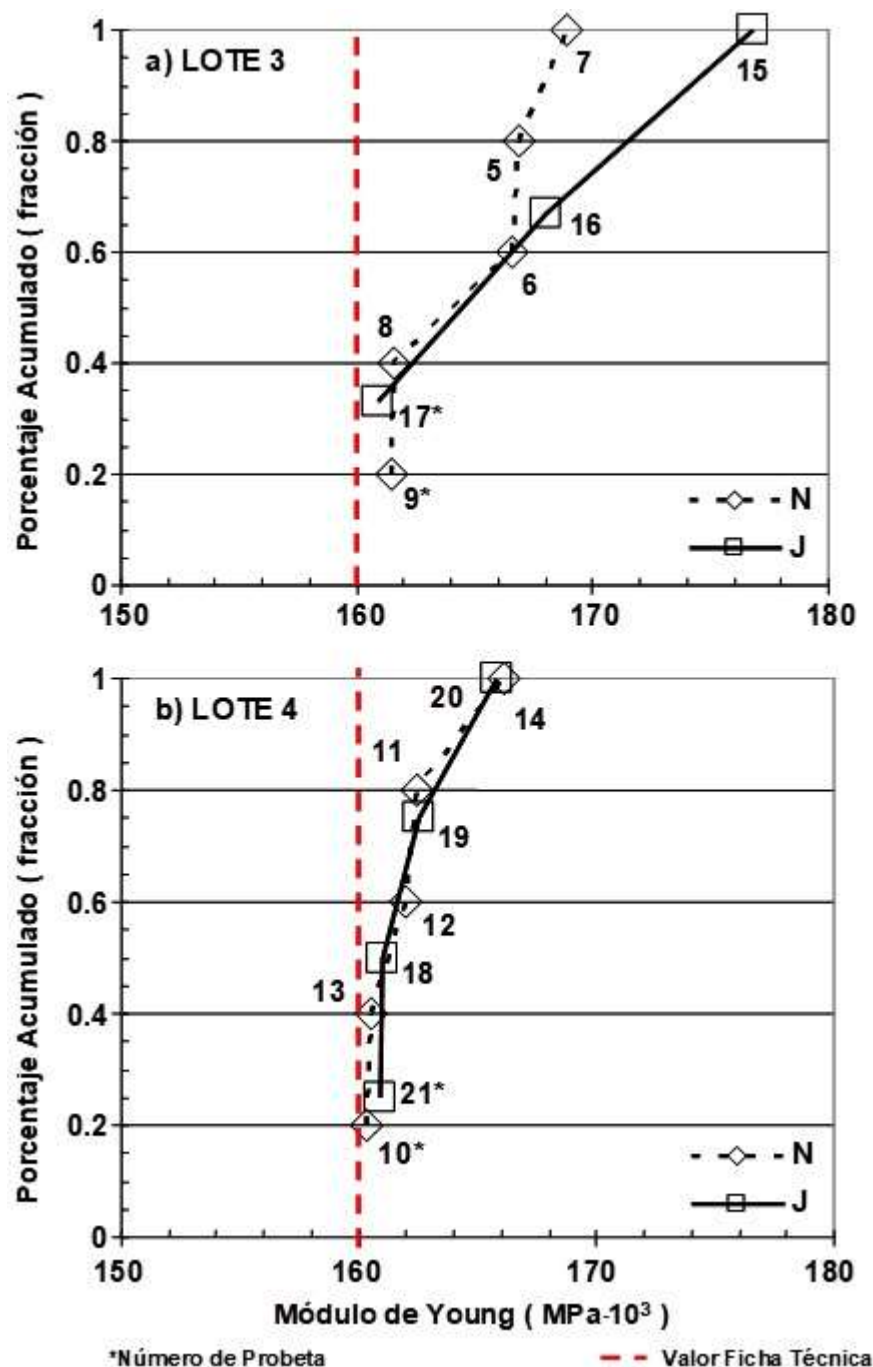


Figura 4.5 Resultados del Módulo de Elasticidad (o de Young) (en MPa·10³) de las probetas de (a) Lote 3 y (b) Lote 4, por tipo de geometría de probeta N=ASTM ^[10] y J= Ref. [11]

4.8 Resultados de Análisis materialográfico

De acuerdo con la materialografía de las probetas analizadas, se determinó que existe un 28,090 % de resina y un 71,91 % de fibras de carbono.

Para determinar el efecto de cada micro constituyente en las propiedades mecánicas debe aplicarse la regla de mezclas que se define [4]:

$$p_{total} = f_1 p_1 + f_2 p_2$$

Donde:

P= propiedad independiente

f= fracción volumen

A partir de los resultados obtenidos del módulo elástico y considerando el porcentaje de cada micro constituyente [15], se puede obtener la contribución de la resina y la fibra de carbono al módulo elástico.

$$1114,09 MPa = 0,28 * 12,8 \frac{N}{mm^2} + 0,72 * p_2$$

$$1114,09 MPa = 3,584 \times 10^{-6} MPa + 0,72 * p_2$$

$$p_2 = 1542,36 MPa$$

De acuerdo con el valor obtenido, la contribución de la fibra de carbono al módulo elástico es mayor que la contribución de la resina y que el conjunto (resina + epóxico).

Considerando el porcentaje del contenido de fibras de carbono en la lámina reportado por el proveedor de las láminas de fibra de carbono igual a >68% [15] y considerando el valor obtenido por medio del análisis metalográfico 72%, este valor cumple con lo reportado.

5 Conclusiones

- ❖ De todos los adhesivos evaluados, el adhesivo elegido para el pegado de las laminillas a la fibra de carbono es el Sika 330 por poseer un alto esfuerzo cortante.
- ❖ Los valores de Módulo de Young y resistencia última obtenidos con los dos diseños; tanto estandarizado como el propuesto por Jones [11], cumplen con los especificado por el proveedor ($> 2800 \text{ MPa}$) [6].
- ❖ El uso de mordazas que cubran toda la superficie de sujeción asegura que no se presente un deslizamiento de las laminillas por falta de sujeción.
- ❖ Las laminillas metálicas o “tabs”, deben tener un ángulo y un redondeado en un extremo para disminuir la concentración de tensiones y mejorar la distribución de esfuerzos.
- ❖ Los valores de resistencia última obtenidos con ambos procedimientos experimentales (ASTM y referencia [11]) y lotes de material cumplen con el valor especificado por el proveedor del material ($> 2,8 \cdot 10^3 \text{ MPa}$).
- ❖ Los valores de Módulo de Young obtenidos con ambos procedimientos experimentales y lotes del material evaluado cumplen con el valor especificado por el proveedor de material ($> 160 \cdot 10^3 \text{ MPa}$).
- ❖ De acuerdo con la metalografía de las láminas de fibras de carbono, se corroboró que el porcentaje de fibras se encuentra en el rango mencionado por la ficha técnica del fabricante (72% vs. ficha técnica: $>68\%$). Además, se obtuvo la contribución de cada micro constituyente, por lo que los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas es la suma de la contribución de cada componente que constituye la lámina de carbono.

5.1 Recomendaciones

- ❖ Fabricar probetas con diseño estandarizado o con el propuesto por Jones Clifton [11].
- ❖ Utilizar mordazas que cubran la superficie de sujeción para evitar deslizamientos.
- ❖ Utilizar adhesivos con alto esfuerzo cortante ($>35 \text{ MPa}$).

- ❖ Utilizar laminillas con ángulo en un extremo para distribuir los esfuerzos y evitar concentración de los mismos.

La fuerza de sujeción de la probeta debe ser muy alta (3000 Psi) para evitar deslizamiento.

Bibliografía

[1] J. T. Pérez Quiroz. “Seguimiento por medio de impedancia electroquímica de la protección catódica el acero de refuerzo en concreto modificado por un agente humectante”. Tesis de Maestría en Metalurgia, Facultad de Química UNAM. México D.F. 2001

[2] U.S. Secretary of Transportation. 1995 Status of the Nation's Surface Transportation System: Condition and Performance: Report to the United States Congress. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1996.

[3] Fracture Toughness of Through-Thickness Reinforced Composites. John M. Rice, Yong K. Kim. University Korea.

[4] Jorge Luis González V. “Apuntes de metalúrgica mecánica”. 1998

[5] ASTM Designation: D 3039/D 3039M – 08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

[6] Sikadur®-32 Gel Puente de Adherencia epóxico

[7] George C. Sih, “Multiscale Fatigue Crack Initiation and Propagation of Engineering Materials: Structural Integrity and Microstructural Worthiness”, Springer USA, 2008

[8] B. Täljsten, K. Orosz and G. Fischer, Crack Development in CFRP Reinforced Mortar – An Experimental Study, 2007

[9] ASTM Standard E 8M-04 “Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]”, ASTM Standards on Disc, Vol.03.01. 2005. West Conshohocken, Philadelphia

[10] S.R. Hallett and C. Ruiz, “Material Characterization Tests and Modelling of Carbon Fibre T3001914 at Impact Rates of Strain”, 1997.

[11] J. Clifton Goldney, Ensayo de propiedades mecánicas de un laminado unidireccional de fibra de carbono de alta resistencia (hsc t300) y resina de se 84 LV. Monografías de mecánica de laminados compuestos.

[12] Sikadur®-330 US Resina epóxica de alto módulo y alta resistencia para impregnación

[13] Sikadur® 35, Hi-Mod LV Adhesivo epóxico multipropósito de baja viscosidad y alta resistencia

- [14] Robert M. Jones Mechanics of composite materials, 2ª Edición.
- [15] Hoja Técnica Edición 1, 2008 Identificación no. 5714 Sika® CarboDur®
- [16] Sikadur®-30 Adhesivo estructural de alto módulo y alta resistencia para usarse con el Sistema de reforzamiento Sika CarboDur.
- [17] Bickford B. William, A First Course in the Finite Element Method, Ed. Irwin Burr Ridge, Illinois, USA, 1999.
- [18] Moaveni Saeed, Finite Element Analysis, Theory and Application with Ansys, Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1998.

Anexo 1.

APÉNDICE A: GRÁFICAS DE PRUEBAS DE TENSIÓN

Ensayo 1:

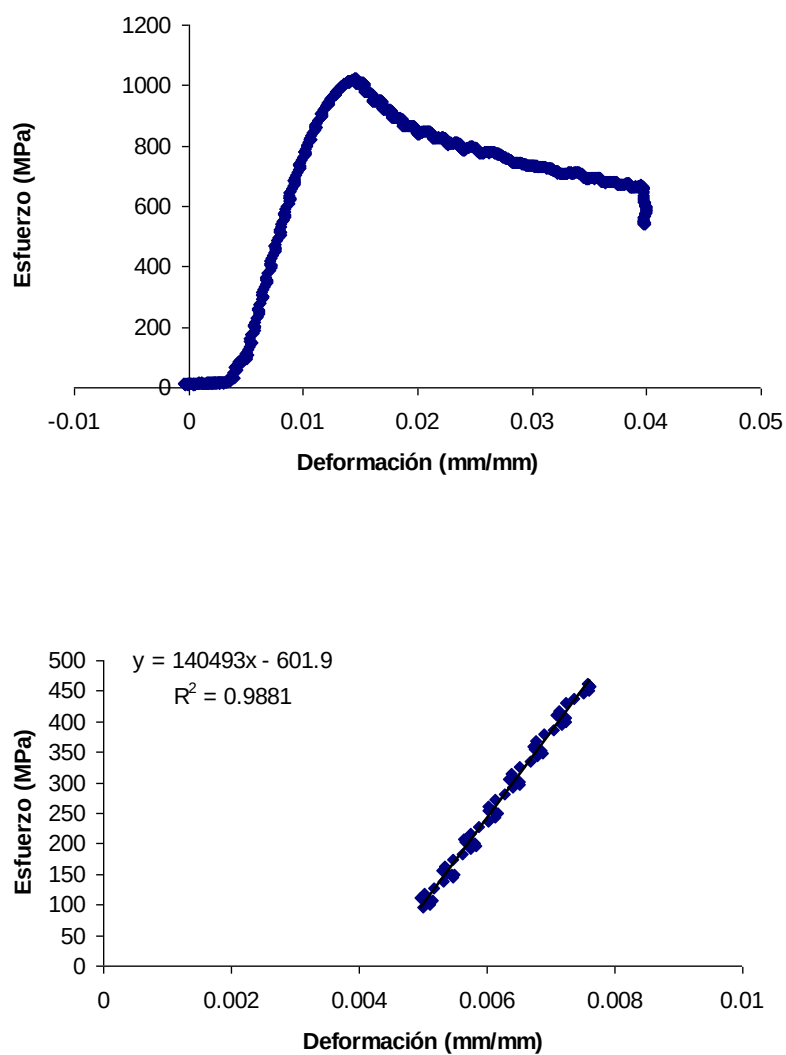


Figura A.1 Información de la prueba para la Probeta 1: Método Norma + epóx.

Ensayo 2:

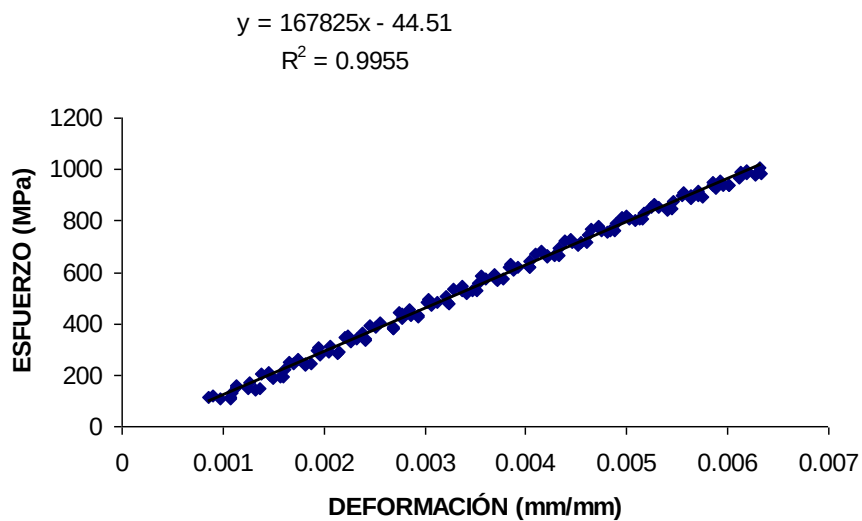
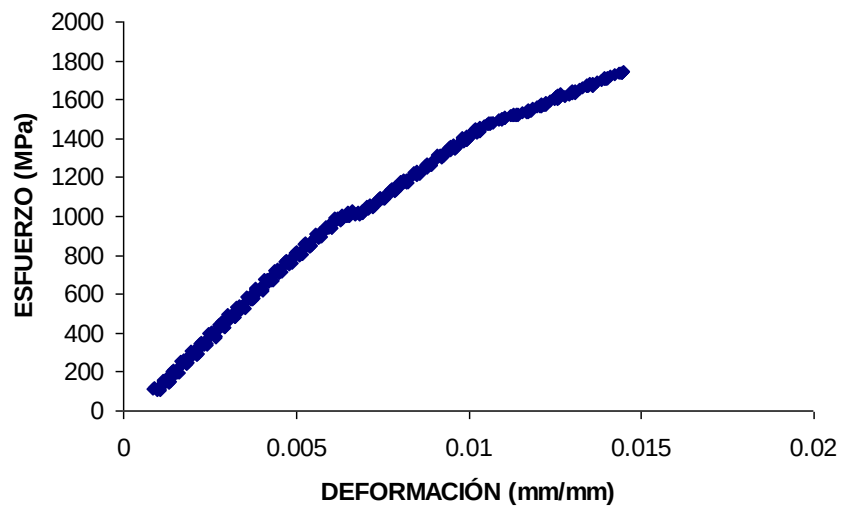
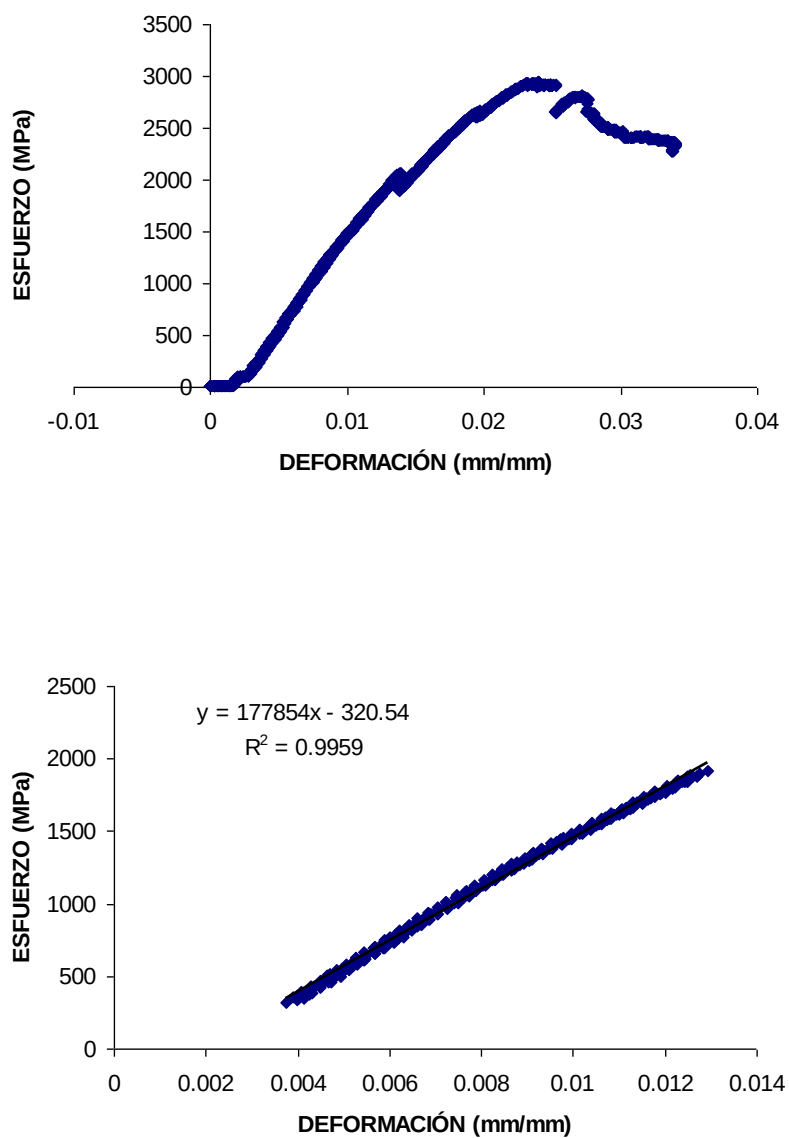


Figura A.2 Información de la prueba para la Probeta 2: Método Norma + epóx.
35

Ensayo 3:

**Figura A.3 Información de la prueba para la Probeta 3: Método Norma + epóx.
330**

Ensayo 4:

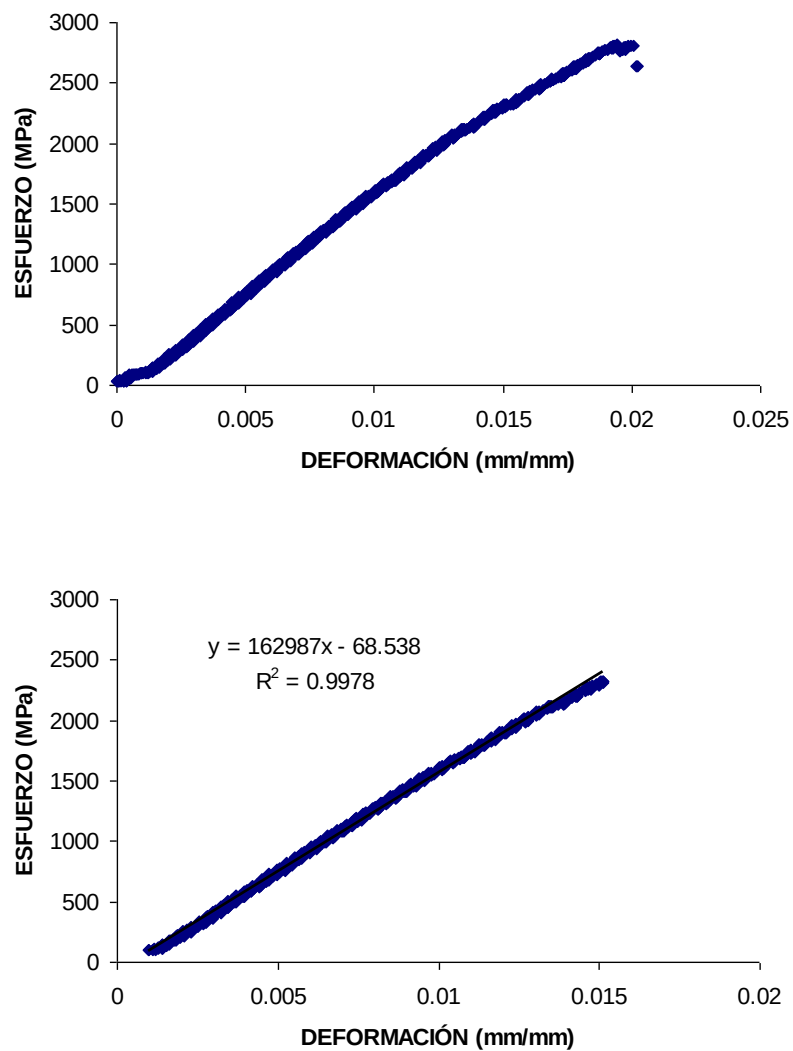


Figura A.4 Información de la prueba para la Probeta 4: Método Norma + epóx.
330

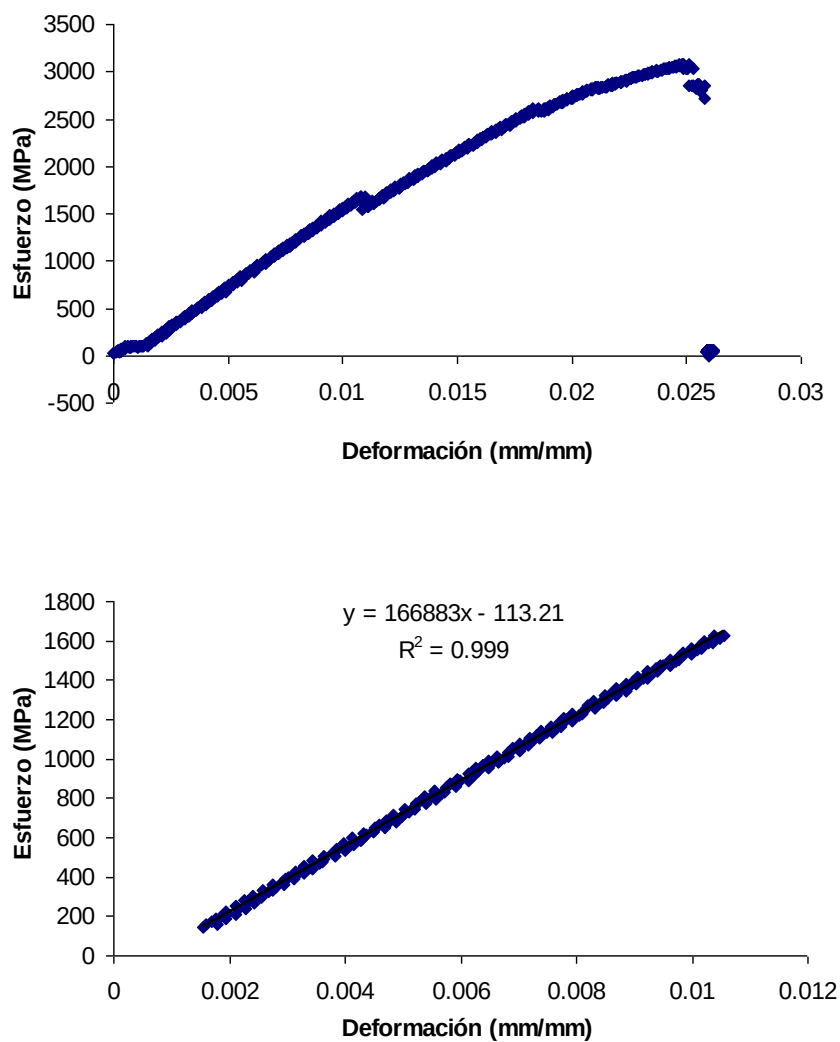
Ensayo 5 (Lote 3):

Figura A.5 Información de la prueba para la Probeta 5: Método Norma + epóx.
330

Ensayo 6 (Lote 3):

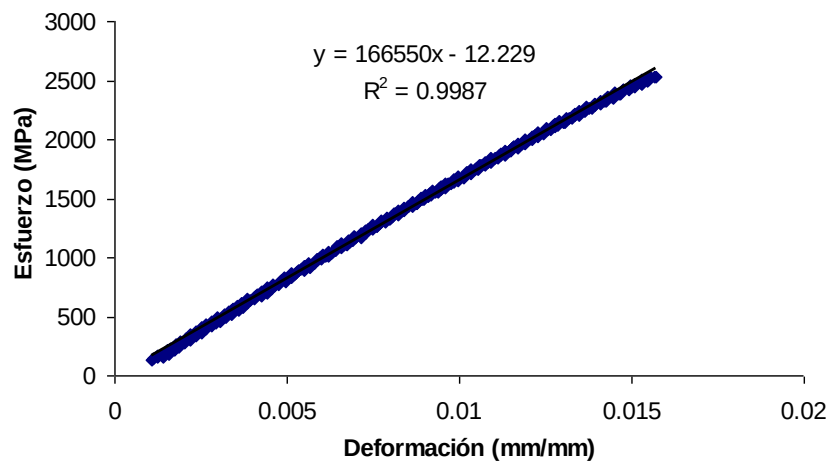
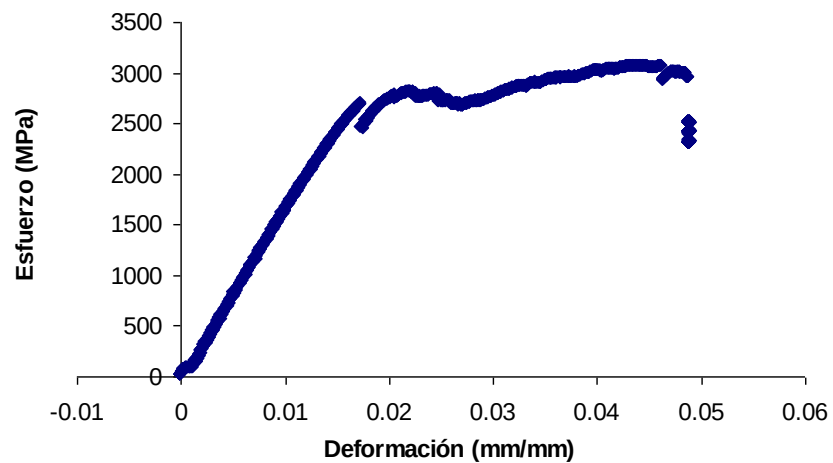


Figura A.6 Información de la prueba para la Probeta 6: Método Norma + epóx.
330

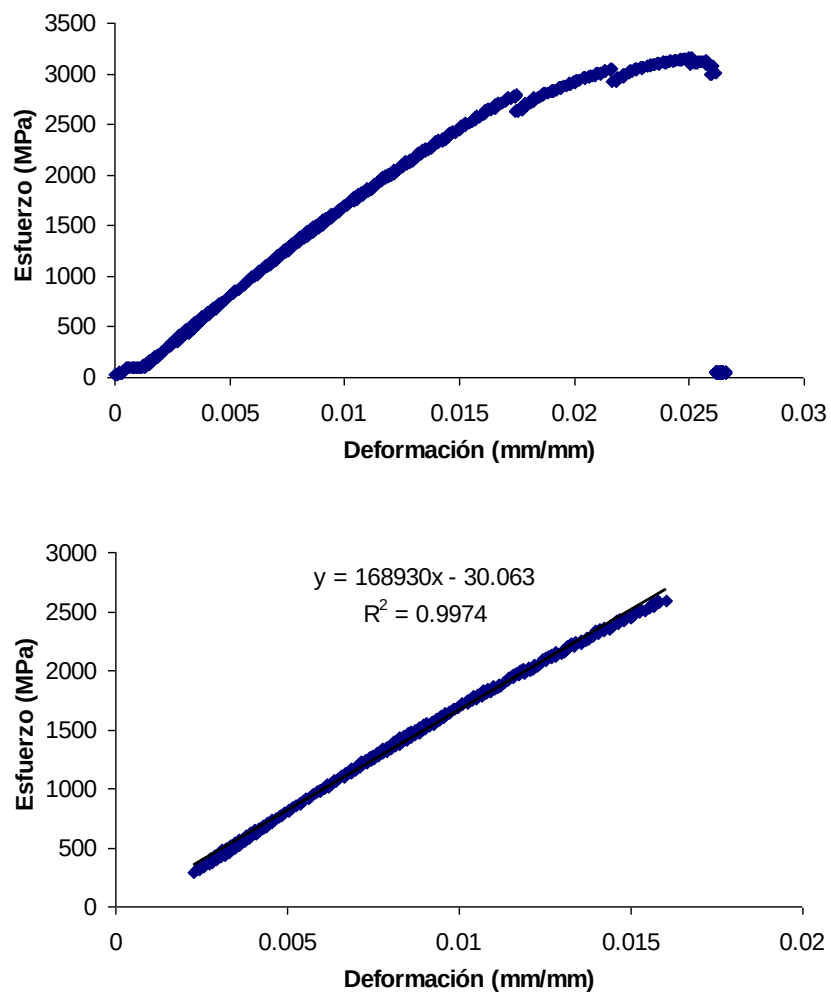
Ensayo 7 (Lote 3):

Figura A.7 Información de la prueba para la Probeta 7: Método Norma + epóx.
330

Ensayo 8 (Lote 3):

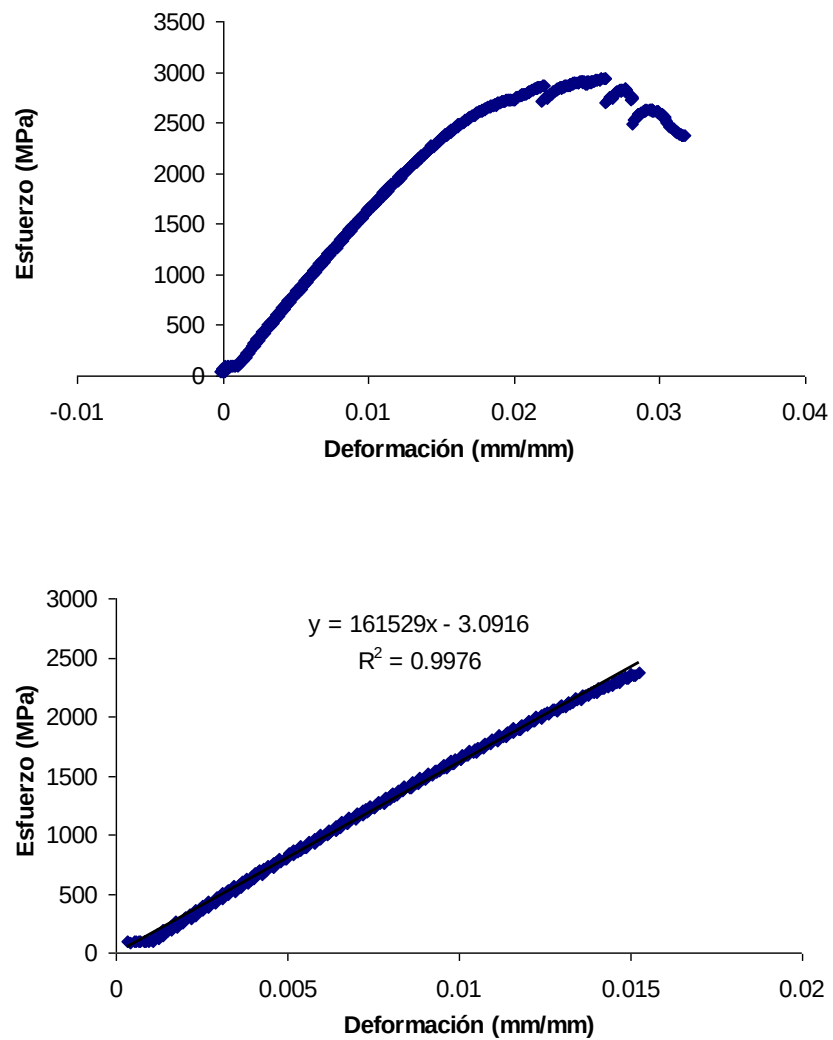


Figura A.8 Información de la prueba para la Probeta 8: Método Norma + epóx.
330

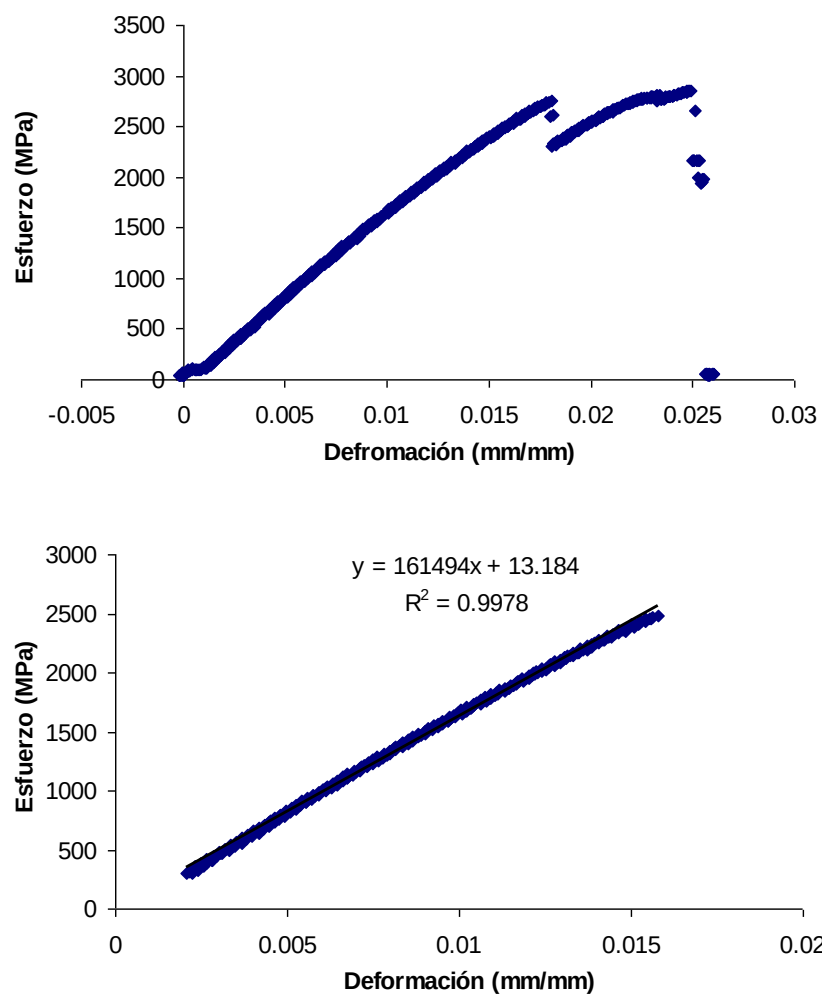
Ensayo 9 (Lote 3):

Figura A.9 Información de la prueba para la Probeta 9: Método Norma + epóx.
330

Ensayo 10 (Lote 4):

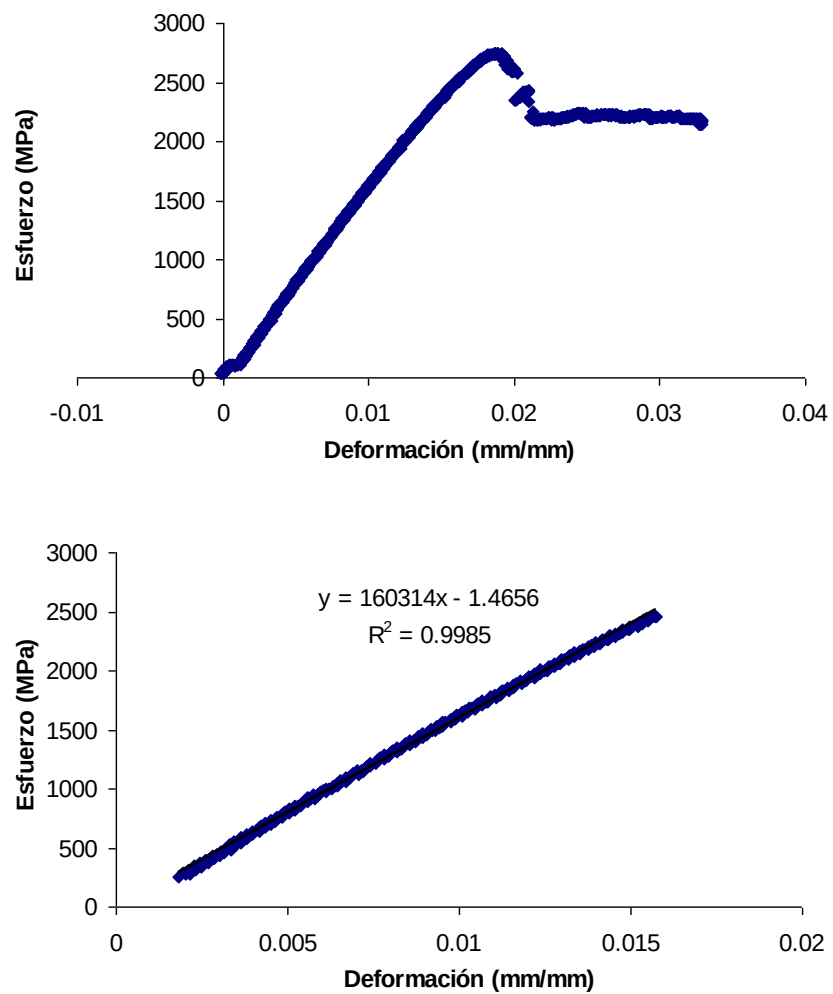


Figura A.10 Información de la prueba para la Probeta 10: Método Norma + epóx. 330

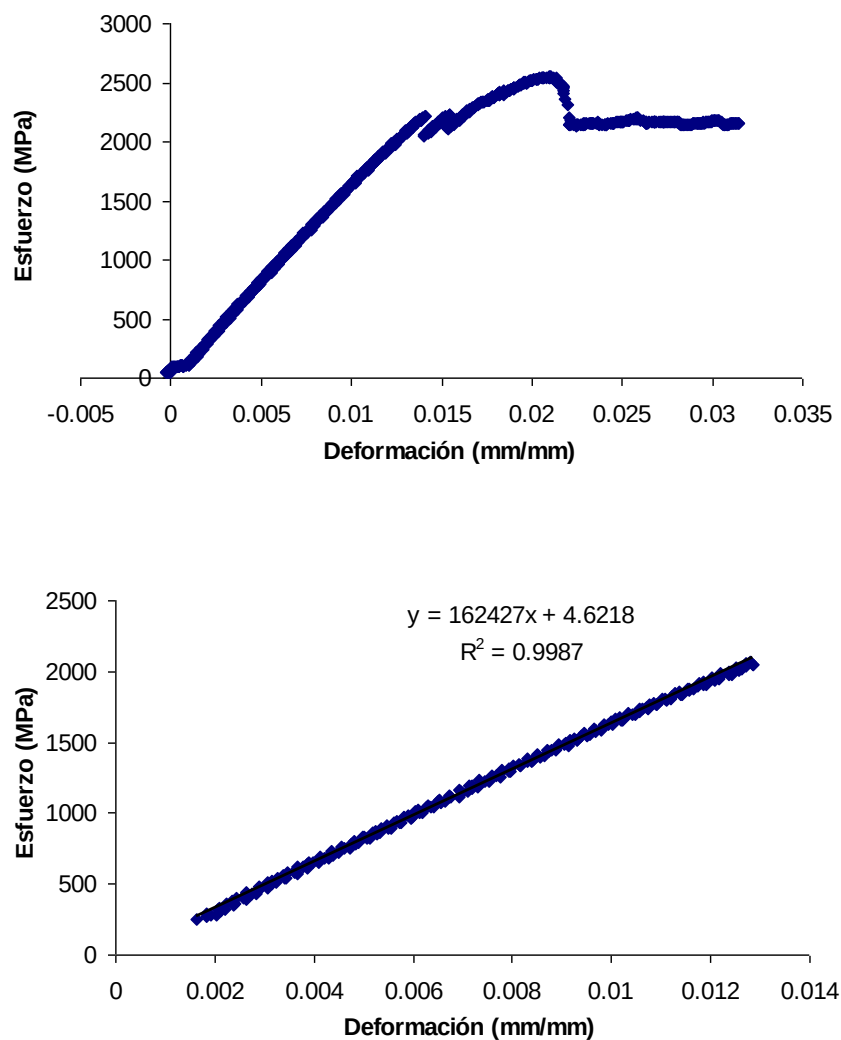
Ensayo 11 (Lote 4):

Figura A.11 Información de la prueba para la Probeta 11: Método Norma + epóx. 330

Ensayo 12 (Lote 4):

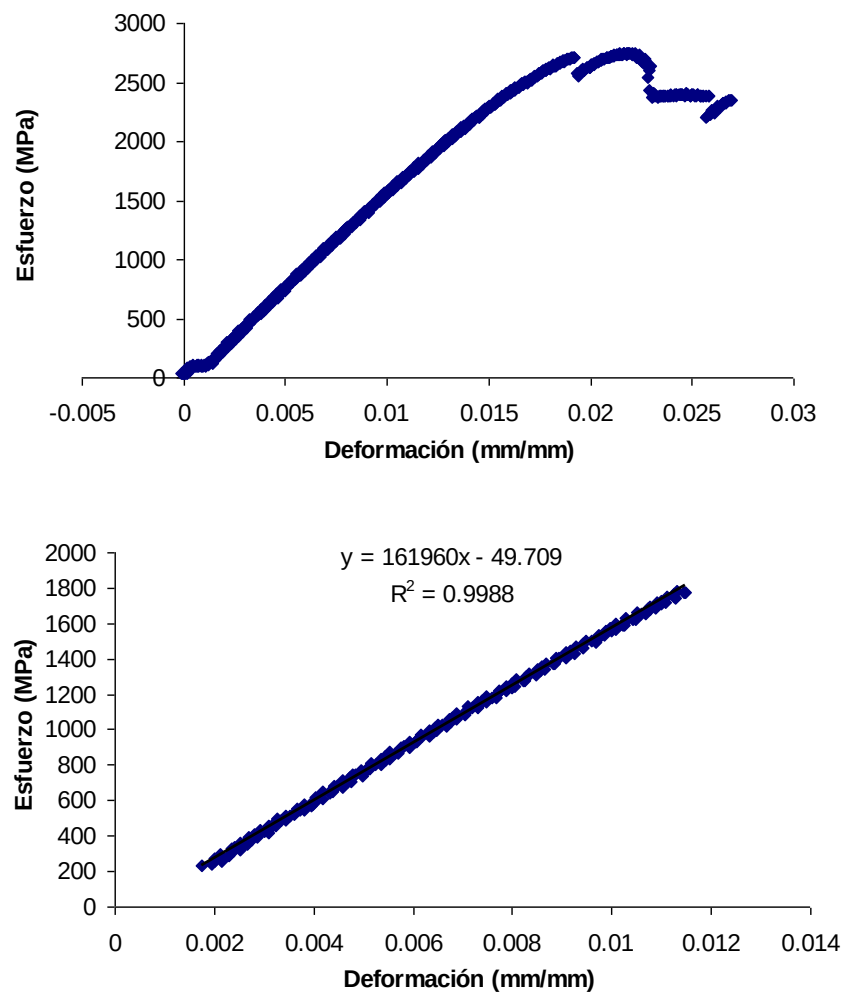


Figura A.12 Información de la prueba para la Probeta 12: Método Norma + epóx. 330

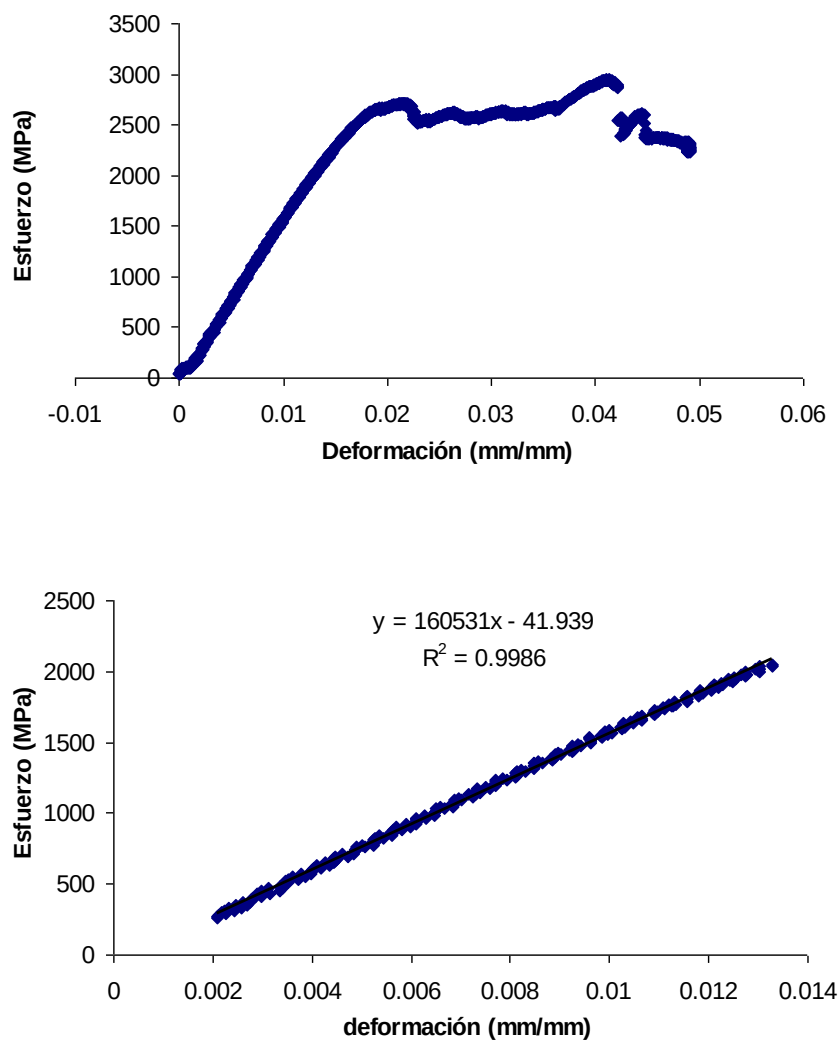
Ensayo 13 (Lote 4):

Figura A.13 Información de la prueba para la Probeta 13: Método Norma + epóx. 330

Ensayo 14 (Lote 4):

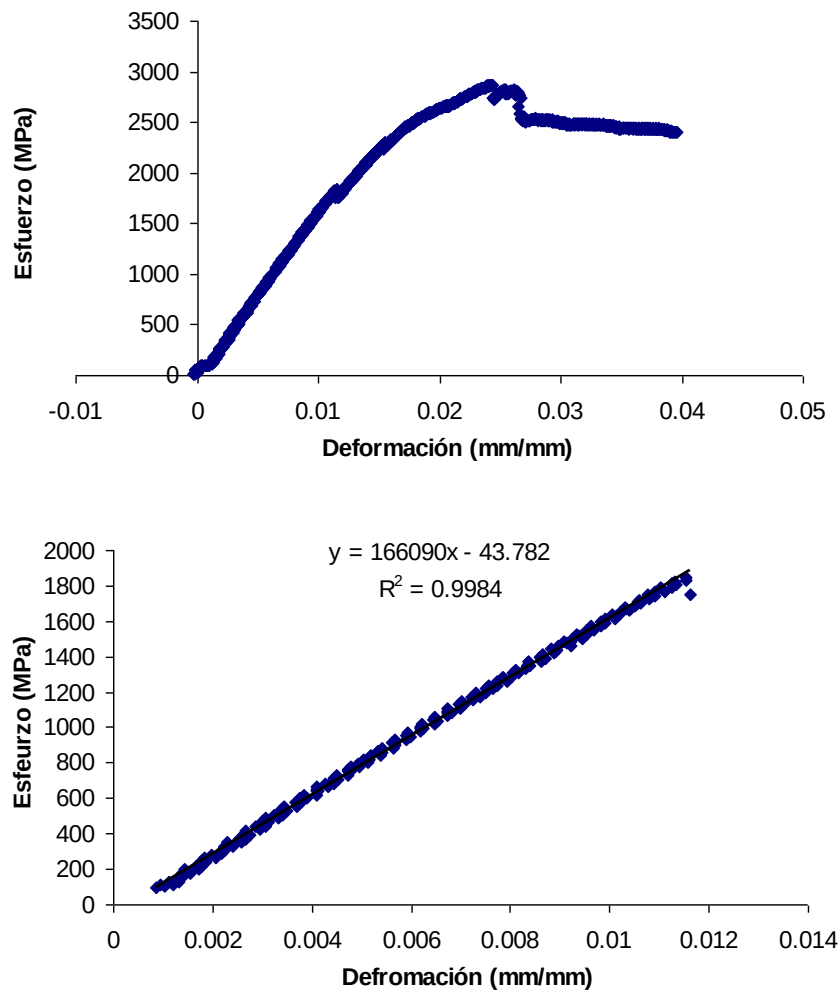


Figura A.14 Información de la prueba para la Probeta 14: Método Norma + epóx. 330

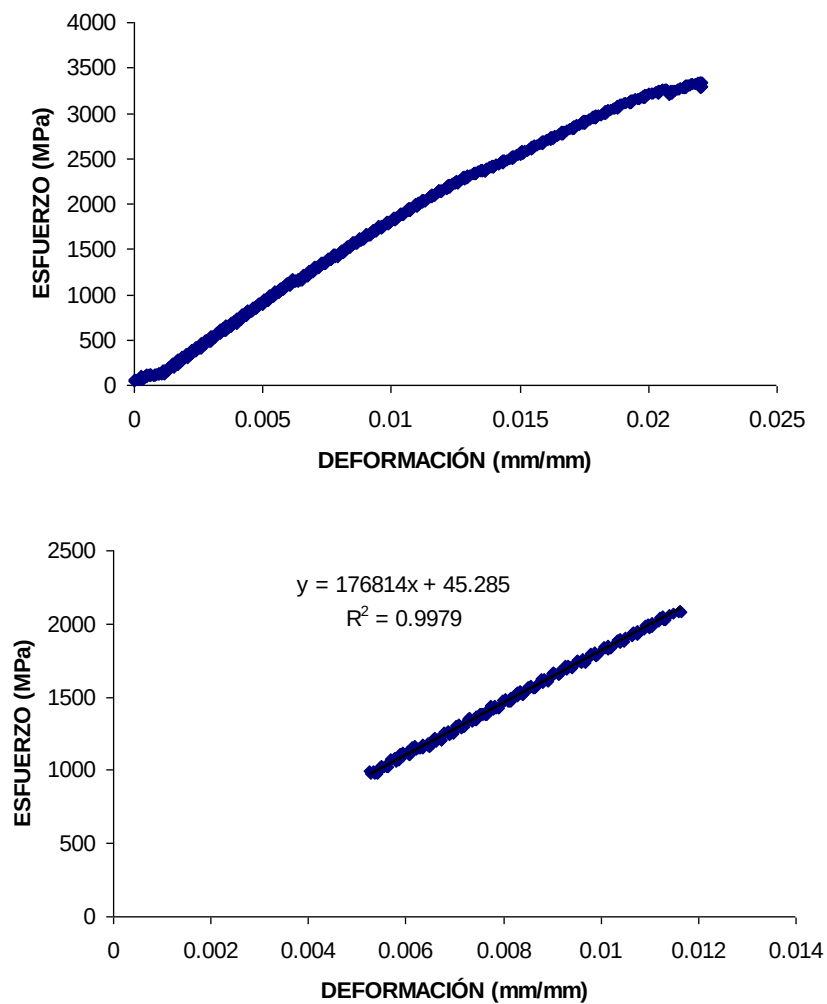
Ensayo 15 (Lote 3):

Figura A.15 Información de la prueba para la Probeta 15: Método Jones + epóx. 330

Ensayo 16 (Lote 3):

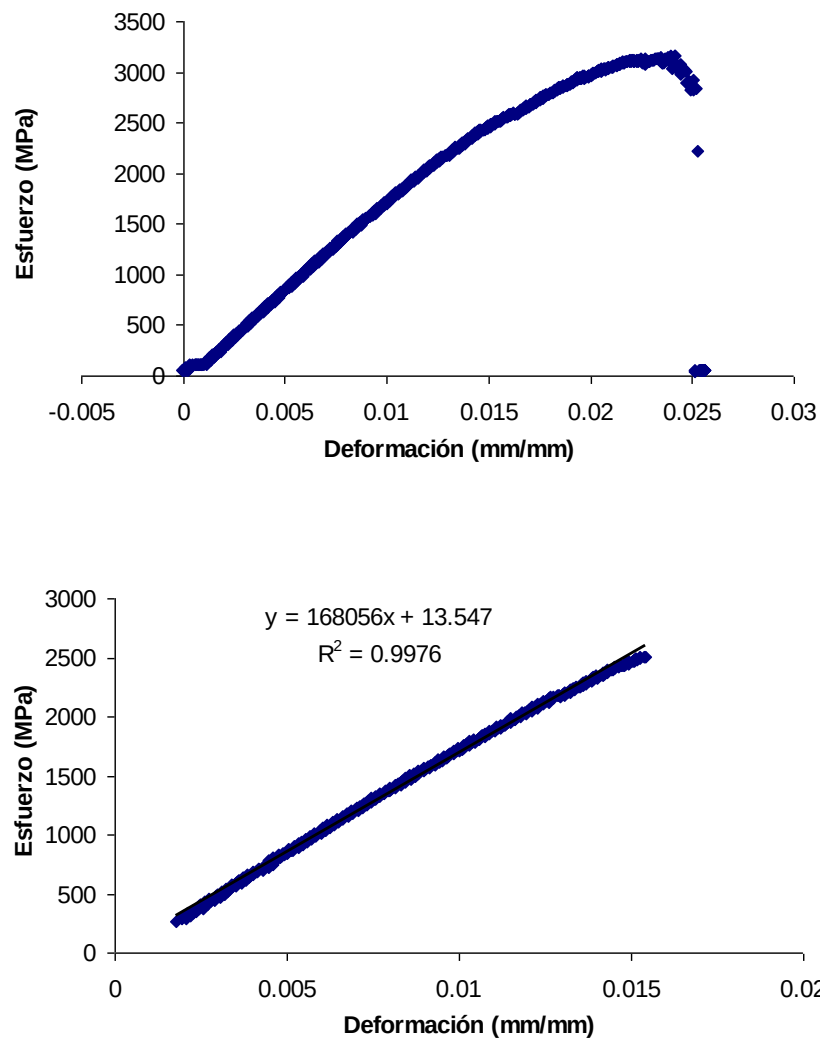


Figura A.16 Información de la prueba para la Probeta 16: Método Jones + epóx. 330

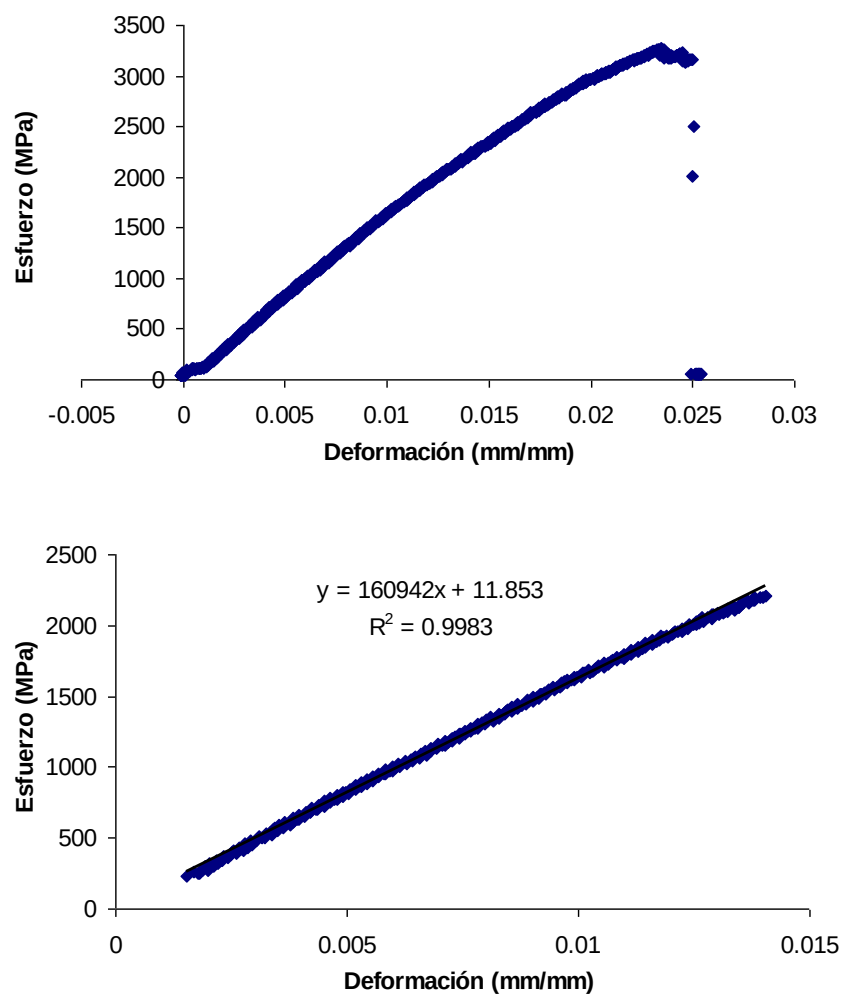
Ensayo 17 (Lote 3):

Figura A.17 Información de la prueba para la Probeta 17: Método Jones + epóx. 330

Ensayo 18 (Lote 4):

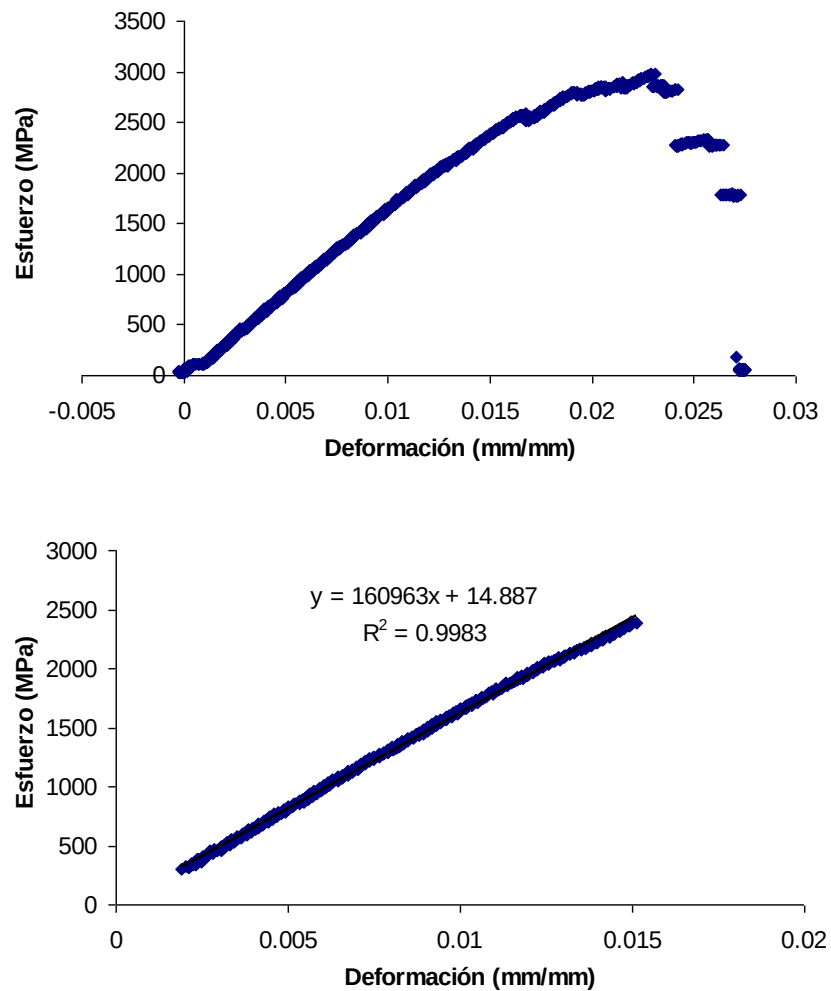


Figura A.18 Información de la prueba para la Probeta 18: Método Jones + epóx. 330

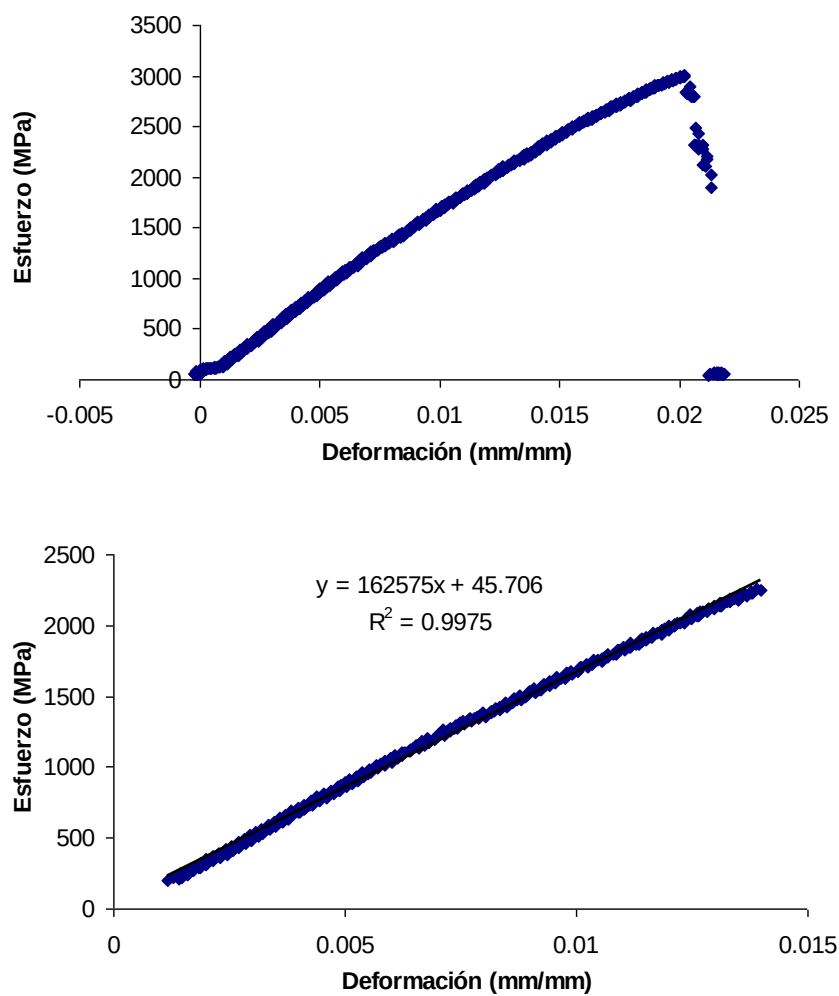
Ensayo 19 (Lote 4):

Figura A.19 Información de la prueba para la Probeta 19: Método Jones + epóx. 330

Ensayo 20 (Lote 4):

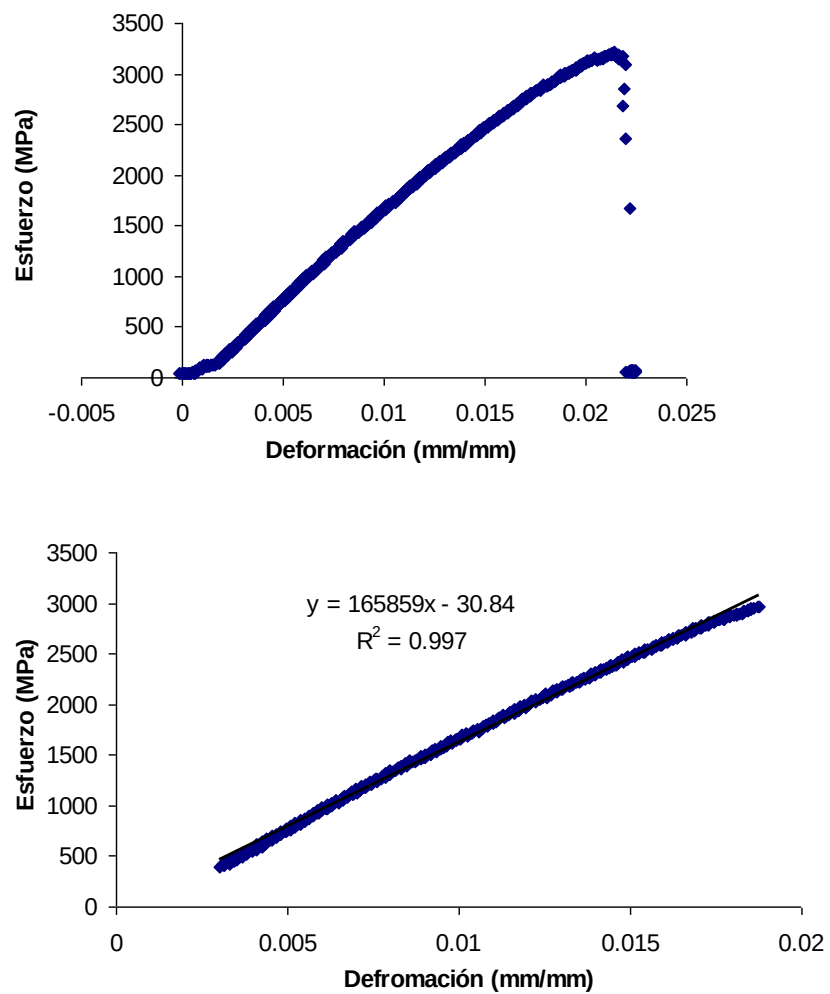


Figura A.20 Información de la prueba para la Probeta 20: Método Jones + epóx. 330

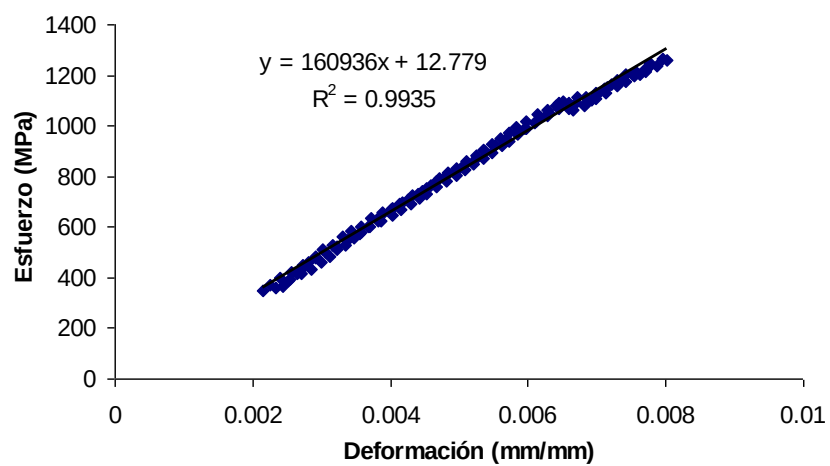
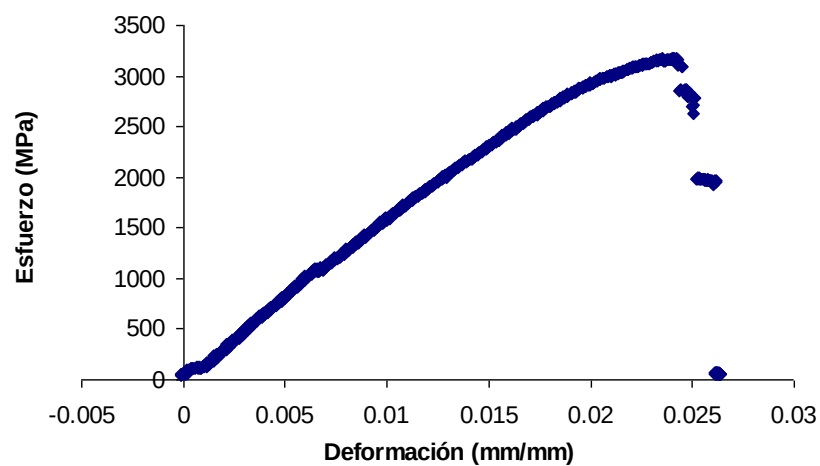
Ensayo 21 (Lote 4):

Figura A.21 Información de la prueba para la Probeta 21: Método Jones + epóx. 330



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México
CP 76703
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad
certificada bajo la norma ISO 9001:2015