



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MORDAZA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN OBLICUA PARA MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS CON FUNCIONALIDAD DE ACOUPLE A MÁQUINA DEL LABORATORIO DE ESFUERZOS DE LA FIM DE LA EPN”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**JAIRO JEFFERSON RODRIGUEZ PICHUCHO**  
jairo.rodriguez@epn.edu.ec

**DANNY ALEXIS VERA ARMAS**  
danny.vera@epn.edu.ec

**DIRECTOR:**  
**ING. SUNTAXI GUALLICHICO SEGUNDO CARLOS, M.Sc**  
segundo.suntaxi@epn.edu.ec

Quito, Diciembre 2017

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JAIRO JEFFERSON RODRÍGUEZ PICHUCHO** y **DANNY ALEXIS VERA ARMAS**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Suntaxi Guallichico Segundo Carlos

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

Ing. Monar Monar Willian Leopoldo

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **JAIRO JEFFERSON RODRÍGUEZ PICHUCHO** y **DANNY ALEXIS VERA ARMAS**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Jairo Jefferson Rodríguez Pichucho

---

Danny Alexis Vera Armas

## DEDICATORIA

Este proyecto final se lo dedico a Dios, a mis padres Ilda y Elías, mis hermanos Dyana y David, a mi hija Kim, a mi abuelo José, por su incondicionalidad y me han apoyado siempre en las situaciones más adversas, difíciles y ser los pilares de mi vida, a mis amigos por ser parte de ella.

Danny

Este trabajo se lo dedico a Dios, a mis padres Thomas y Rosa, a mis hermanos, a mi esposa Daniela, a mi amado hijo Benjamín, a todos ellos por ser parte de mi vida y por su apoyo incondicional en todo momento.

Jairo

## AGRADECIMIENTOS

A mi madre Ilda Armas por su comprensión, por su gran ejemplo de lucha que demostró vencer adversidades en las peores situaciones, por su gran cariño durante todos estos años, a quien quiero con mi vida

A mi padre Elías Vera por su apoyo, por ser un gran hombre mi ejemplo a seguir, por guiarme en un camino de sabiduría, honestidad donde podemos cada día ser mejores personas, por sus consejos, quien tiene mi cariño y completa admiración.

A mis hermanos, por ser una razón más de seguir adelante, por sonrisas compartidas y momentos de alegría

A mi abuelo José por su cariño, afecto por ser un hombre honesto y dejar grandes enseñanzas que irán creciendo en cada generación

A mi tía Grace por su preocupación, cariño, comprensión y por esas palabras de aliento en momentos difíciles

A mi tía Cidie por su ayuda y preocupación en la situación más difícil de mi vida

A mis amigos que verdaderamente demostraron serlo con su compañía y apoyo en buenas y malas situaciones

A todos mis profesores durante toda esta etapa de aprendizaje, por compartir conocimientos y experiencias

A los Ingenieros Carlos Sntaxi y Willan Monar, por ser guías y apoyo durante la culminación de este proyecto.

A la Politécnica Nacional por ser la mejor escuela de aprendizaje y permitirme ser un estudiante más de esta prestigiosa Universidad

A la Metalmecánica San Bartolo de la EPN por una de las mejores del país y ser un gran apoyo en la construcción de este proyecto

Danny

Agradezco a mi padre Thomas por guiarme por el camino del bien, por estar conmigo en los momentos difíciles dándome un buen consejo, por darme esas palabras de motivación para seguir adelante.

A mi madre Rosa por su amor incondicional por todo su apoyo para poder culminar mis estudios hasta este punto, por sus cuidados y la confianza que me ha brindado en todo momento.

A mis hermanos por ser mis mejores amigos en los buenos y malos momentos que hemos atravesado.

A mi esposa Daniela por ser un ejemplo de perseverancia, por su cariño y comprensión, por darme palabras de aliento para terminar este proyecto.

A mi hijo Benjamín por ser mi motivación de querer ser mejor cada día y nunca rendirme ante las adversidades.

Al ingeniero Carlos Suntaxi por haber depositado su confianza en la elaboración de este proyecto y ser un excelente guía para poder culminarlo.

Jairo

# ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| CERTIFICACIÓN .....   | i    |
| DECLARACIÓN .....   | ii   |
| DEDICATORIA.....  | iii  |
| AGRADECIMIENTOS .....   | iv   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | viii |
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | xi   |
| RESUMEN .....   | xii  |
| ABSTRACT .....  | xiii |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1    |
| Pregunta de investigación .....   | 1    |
| Objetivo general .....  | 2    |
| Objetivos específicos .....   | 2    |
| Alcance .....   | 2    |
| 1. MARCO TEÓRICO .....  | 3    |
| 1.1. Materiales compuestos.....   | 3    |
| 1.1.1. Definición .....   | 3    |
| 1.1.2. Clasificación.....   | 3    |
| 1.1.3. Fibras y matrices.....   | 5    |
| 1.1.4. Aplicaciones.....  | 7    |
| 1.2. Caracterización de cizalladura intralaminar de materiales compuestos ..... | 9    |
| 1.2.1. Métodos directos.....  | 10   |
| 1.2.1. Indirectos.....  | 13   |
| 1.3. Ensayo de tracción oblicua (off-axis).....                                 | 13   |
| 1.3.1. Descripción .....  | 13   |
| 1.3.2. Medida de deformación usando ARDUINO UNO.....                            | 15   |
| 1.3.3. Problemas con el ensayo.....   | 19   |
| 1.3.4. Estudios relacionados.....   | 19   |
| 1.4. Equipos .....  | 35   |
| 1.4.1. Máquina universal de ensayos.....  | 35   |

|  |    |
|--|----|
| 1.4.2. Mordazas .....                                      | 36 |
| 2. METODOLOGÍA .....                                       | 38 |
| 2.1. Desarrollo de la función de calidad.....              | 38 |
| 2.1.1. Voz del usuario .....                               | 38 |
| 2.1.2. Voz del ingeniero .....                             | 38 |
| 2.1.3. Resultados .....                                    | 38 |
| 2.2. Especificaciones técnicas.....                        | 39 |
| 2.3. Análisis funcional.....                               | 39 |
| 2.4. Soluciones para cada módulo .....                     | 41 |
| 2.4.1. Módulo 1 - sujetar probeta. ....                    | 41 |
| 2.4.2. Módulo 2 - traccionar la probeta.....               | 42 |
| 2.5. Alternativas a los módulos.....                       | 44 |
| 2.6. Evaluación de alternativas.....                       | 45 |
| 2.7. Cálculo y selección de componentes .....              | 47 |
| 2.8. Simulación del funcionamiento de las mordazas.....    | 59 |
| 2.9. Análisis de costos.....                               | 60 |
| 2.10. Protocolo de pruebas .....                           | 62 |
| 2.11. Construcción de las mordazas .....                   | 66 |
| 2.11.1. Operaciones de construcción.....                   | 67 |
| 2.11.2. Cursograma de construcción .....                   | 67 |
| 2.12. Operaciones de montaje .....                         | 68 |
| 2.12.1. Cursograma de montaje .....                        | 69 |
| 2.13. Fabricación de probetas.....                         | 71 |
| 2.13.1. Consideraciones iniciales .....                    | 71 |
| 2.13.2. Elaboración de las probetas .....                  | 73 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                             | 81 |
| 3.1. Resultados obtenidos de las pruebas de tracción ..... | 81 |
| 3.2. Discusión de resultados .....                         | 90 |
| 4. CONCLUSIONES.....                                       | 92 |
| BIBLIOGRAFÍA .....   | 94 |
| ANEXOS .....   | 96 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1. Clasificación de los materiales compuestos.....                        | 4  |
| Figura 1.2. Diagrama tensión-deformación de varias fibras.....                     | 6  |
| Figura 1.3. Aplicaciones de fibra de carbono en AIRBUS.....                        | 8  |
| Figura 1.4. Mercado global fibra de carbono.....                                   | 9  |
| Figura 1.5. Esquema de probetas laminadas.....                                     | 9  |
| Figura 1.6. Sistema mordazas y probeta ensayo rail shear.....                      | 11 |
| Figura 1.7. Mordazas para ensayo losipescu.....                                    | 12 |
| Figura 1.8. Probeta ensayo losipescu norma ASTM D-4225.....                        | 12 |
| Figura 1.9. Espécimen ensayo de tracción oblicua (off-axis).....                   | 13 |
| Figura 1.10. Roseta a 45°. .....   | 15 |
| Figura 1.11. Puente de Wheatstone.....   | 16 |
| Figura 1.12. Puente de Wheatstone configuración cuarto de puente.....              | 16 |
| Figura 1.13. Celda de carga.....   | 17 |
| Figura 1.14 Módulo HX711.....  | 18 |
| Figura 1.15. Circuito celda de carga con arduino.....                              | 18 |
| Figura 1.16. Problema de deformación de la probeta en ensayo off axis.....         | 19 |
| Figura 1.17. Geometría de la probeta de tracción fuera de eje para 10°.....        | 20 |
| Figura 1.18. Posición de las rosetas (galgas extensométricas).....                 | 22 |
| Figura 1.19. Configuración de sujeción para Mordazas ensayo Off axis 10°. .....    | 22 |
| Figura 1.20. Error en el coeficiente de Poisson vs ángulo del ensayo Off-axis..... | 23 |
| Figura 1.21. Módulo de cizalladura G12 vs ángulo de orientación de las fibras....  | 24 |
| Figura 1.22.Mordazas utilizadas por Pindera y Herakovich.....                      | 24 |
| Figura 1.23. Probeta utilizada en los ensayos de Sun y Berreth.....                | 26 |
| Figura 1.24. Resultados con tacones convencionales vidrio/epoxi.....               | 27 |
| Figura 1.25. Esfuerzos con nuevos refuerzos fibra de vidrio.....                   | 28 |
| Figura 1.26. Sistemas de referencia utilizados en el estudio de Tsai Hill.....     | 29 |
| Figura 1.27. Esfuerzos presentes en un elemento infinitesimal.....                 | 30 |
| Figura 1.28. Deformación de la probeta debido a restricciones en los extremos. .   | 32 |
| Figura 1.29. Solución analítica propuesta por Pagano y Halpin.....                 | 33 |
| Figura 1.30. Deformación con fibras a 30° con mordazas fijas sin rotación.....     | 34 |
| Figura 1.31.Configuración de la probeta con extremos uniformes.....                | 35 |
| Figura 1.32. Maquina universal de ensayos Tinius Olsen.....                        | 36 |
| Figura 1.33. Mordazas de tornillo.....   | 37 |
| Figura 1.34. Mordaza tipo cuña.....  | 37 |
| Figura 2.1 Diagrama funcional nivel 0.....   | 40 |
| Figura 2.2. Diagrama funcional nivel 1.....  | 40 |
| Figura 2.3. Diagrama funcional nivel 2.....  | 41 |
| Figura 2.4. Mordaza tipo cuña.....   | 41 |
| Figura 2.5. Mordaza con tornillo.....  | 42 |
| Figura 2.6. Mordaza rectangular sin rotación.....                                  | 43 |
| Figura 2.7. Mordaza oblicua sin rotación.....                                      | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.8. Mordaza rectangular con rotación.....                                   | 44 |
| Figura 2.9. Esquema de la solución final.....                                       | 47 |
| Figura 2.10. Fuerzas presentes durante ensayo de tracción. ....                     | 48 |
| Figura 2.11. Diagrama de cuerpo libre de mordaza. ....                              | 48 |
| Figura 2.12. Dimensiones de la mordaza existente en laboratorio.....                | 50 |
| Figura 2.13. Modelo del eje de sujeción de la probeta.....                          | 51 |
| Figura 2.14. Diagrama de cuerpo libre eje de sujeción.....                          | 51 |
| Figura 2.15. Esfuerzo cortante y momento flector para eje de sujeción.....          | 52 |
| Figura 2.16. Restricciones y cargas aplicadas al eje de sujeción.....               | 53 |
| Figura 2.17. Esfuerzos de Von Mises en el eje de sujeción. ....                     | 54 |
| Figura 2.18. Deformación y factor de seguridad para eje de sujeción.....            | 54 |
| Figura 2.19. Fuerzas que actúan en el rodamiento axial.....                         | 55 |
| Figura 2.20. Esquema y dimensiones del cuerpo de la mordaza.....                    | 56 |
| Figura 2.21. Restricción asignada a cuerpo de la mordaza. ....                      | 57 |
| Figura 2.22. Cargas asignadas a cuerpo de la mordaza.....                           | 57 |
| Figura 2.23. Distribución de esfuerzos de Von-Mises para cuerpo de mordaza. ..      | 58 |
| Figura 2.24. Deformaciones en cuerpo de la mordaza.....                             | 58 |
| Figura 2.25. Factor de seguridad para el cuerpo de la mordaza. ....                 | 59 |
| Figura 2.26. Resultados de esfuerzo utilizando mordazas off axis. ....              | 59 |
| Figura 2.27. Deformación en eje normal utilizando mordazas off axis. ....           | 60 |
| Figura 2.28. Deformación en eje y utilizando mordazas off axis. ....                | 60 |
| Figura 2.29. Cursograma de construcción para mordazas off-axis. ....                | 68 |
| Figura 2.30. Cursograma de montaje de las mordazas.....                             | 70 |
| Figura 2.31. Mordazas terminadas.....   | 71 |
| Figura 2.32. Esquema de la orientación de las fibras en la probeta.....             | 72 |
| Figura 2.33. Esquema de la probeta para ensayo de tracción. ....                    | 73 |
| Figura 2.34. Colocación de la fibra dentro del molde. ....                          | 73 |
| Figura 2.35. Colocación del molde dentro de la prensa y aplicación de presión... 74 |    |
| Figura 2.36. Proceso de corte laser de las probetas. ....                           | 75 |
| Figura 2.37. Probetas obtenidas. ....   | 75 |
| Figura 2.38. Probetas con galgas tipo roseta para ensayos de tracción.....          | 76 |
| Figura 2.39. Sistema de conexiones con microcontrolador arduino uno.....            | 77 |
| Figura 2.40. Calibración con probeta de acero y peso de 0,5 kg. ....                | 78 |
| Figura 2.41. Mediciones de deformación con arduino y medidor OMEGA.....             | 78 |
| Figura 2.42. Probeta de material compuesto deformada con peso de 0,5 kg. ....       | 79 |
| Figura 2.43. Mediciones con arduino y medidor OMEGA para probeta 2. ....            | 79 |
| Figura 3.1. Probeta de material plástico.....                                       | 81 |
| Figura 3.2. Probetas de acetato ensayadas con mordazas convencionales.....          | 83 |
| Figura 3.3. Probetas de acetato ensayadas con mordazas off-axis. ....               | 83 |
| Figura 3.4. Deformación de probeta de acetato con mordazas convencionales. ..       | 84 |
| Figura 3.5. Deformación de probetas de acetato con mordazas off axis.....           | 84 |
| Figura 3.6. Diagrama esfuerzo - deformación para probetas de acetato. ....          | 85 |
| Figura 3.7. Gráfica esfuerzo-deformación en primer ensayo de tracción. ....         | 88 |

Figura 3.8. Gráfica esfuerzo-deformación para segundo ensayo de tracción. .... 88  
Figura 3.9. Gráfica esfuerzo- deformación para tercer ensayo de tracción..... 89

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.1. Propiedades de resina epoxy y poliéster en materiales compuestos. .... | 7  |
| Tabla 1.2. Conexión entre módulo HX711 y arduino.....                             | 18 |
| Tabla 1.3. Datos obtenidos por Pindera y Herakovich en el ensayo off-axis.....    | 25 |
| Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.....   | 39 |
| Tabla 2.2. Alternativas a los módulos.....  | 45 |
| Tabla 2.3. Evaluación de criterios. ....  | 46 |
| Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio sujeción.....              | 46 |
| Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio construcción.....          | 46 |
| Tabla 2.6. Evaluación del peso específico del criterio resistencia.....           | 46 |
| Tabla 2.7. Evaluación del peso específico del criterio funcionamiento.....        | 47 |
| Tabla 2.8. Conclusiones de la evaluación de alternativas.....                     | 47 |
| Tabla 2.9. Costos de elementos normalizados. ....                                 | 61 |
| Tabla 2.10. Costos de mano de obra. ....  | 61 |
| Tabla 2.11. Costos de materiales.....   | 62 |
| Tabla 2.12. Costos totales de fabricación. ....                                   | 62 |
| Tabla 2.13. Formato de protocolo de pruebas. ....                                 | 65 |
| Tabla 2.14. Herramientas usadas para construcción de mordazas. ....               | 66 |
| Tabla 2.15. Máquinas usadas para construcción de mordazas. ....                   | 66 |
| Tabla 2.16 Instrumentos de medición usadas en construcción de mordazas. ....      | 67 |
| Tabla 2.17. Operaciones realizadas para construcción de mordazas.....             | 67 |
| Tabla 2.18. Definición de símbolos a usarse en cursograma de construcción.....    | 68 |
| Tabla 2.19. Operaciones de montaje para las mordazas. ....                        | 69 |
| Tabla 2.20. Configuración de la matriz de resina poliéster.....                   | 72 |
| Tabla 2.21. Proporciones utilizadas para fabricación de probetas.....             | 74 |
| Tabla 2.22. Datos de mediciones con tarjeta arduino para la probeta 1. ....       | 78 |
| Tabla 2.23. Datos medidos para la probeta 2 por el equipo OMEGA.....              | 80 |
| Tabla 2.24 Datos medidos para la probeta 2 por el equipo OMEGA.....               | 80 |
| Tabla 3.1. Ensayo de tracción a probetas de acetato con mordazas comunes. ....    | 82 |
| Tabla 3.2. Ensayo de tracción a probetas de acetato con mordazas off-axis. ....   | 82 |
| Tabla 3.3. Resultados del primer ensayo con mordazas convencionales. ....         | 85 |
| Tabla 3.4. Resultados del segundo ensayo con mordazas convencionales. ....        | 86 |
| Tabla 3.5. Resultados del tercer ensayo con mordazas convencionales. ....         | 86 |
| Tabla 3.6. Resultados del primer ensayo con mordazas off-axis. ....               | 87 |
| Tabla 3.7. Resultados del segundo ensayo con mordazas off-axis. ....              | 87 |
| Tabla 3.8. Resultados del tercer ensayo con mordazas off-axis. ....               | 87 |
| Tabla 3.9. Resultados módulo de cizalladura.....                                  | 89 |
| Tabla 3.10. Comparación entre simulación y ensayo con mordazas off axis. ....     | 89 |

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño y construcción de un juego de mordazas para realizar ensayos de tracción oblicua (off-axis) en materiales compuestos laminados, las mismas que se acoplaron a la máquina universal de ensayos existente en el laboratorio de nuevos materiales de la FIM. Se realizó un estudio de las alternativas existentes, las imitaciones y problemas a la hora de realizar este tipo de ensayo. Se aplicó la metodología del diseño concurrente para establecer las especificaciones de diseño y definir alternativas. Para el diseño de los elementos se realizó cálculos y una simulación que permitió evaluar tanto su resistencia como la funcionalidad para eliminar el efecto indeseado de la flexión por las superficies giratorias adaptadas a las mordazas convencionales en los extremos de la probeta. Se construyeron probetas de material compuesto con las fibras orientadas a diez grados respecto a la línea de acción de la fuerza. Posteriormente se dedujo la deformación unitaria cortante en la dirección de la fibra de refuerzo a través de las mediciones realizadas con una roseta de deformación a 45°. Esta capacidad permitió que la muestra alcanzara un campo de deformación uniforme y, por lo tanto, es adecuada para la caracterización de propiedades mecánicas de compuestos especialmente para obtener el módulo de cizalladura en materiales ortotrópicos de manera experimental.

**Palabras clave:** ensayo off axis, módulo de cizalladura, roseta de deformación, material compuesto, mordaza, diseño concurrente.

## ABSTRACT

The present investigation has the objective of design and constructs four grips to develop off-axis tests on laminated composite materials, which were coupled to the existing universal testing machine in new materials laboratory at FIM of EPN. A study was made of the existing alternatives, the limitations and problems when carrying out this type of test. The concurrent design methodology was applied to establish the design specifications and define alternatives. For the design of the elements, calculations and a simulation were carried out to evaluate both its resistance and functionality to eliminate the undesired effect of bending at the ends of the specimen. Composite specimens were fabricated with the fibers oriented ten degrees respect to the line of action of force. Subsequently, the shear unit deformation in the direction of the reinforcing fiber was deduced through the measurements made with a 45 grades deformation rosette. This capacity allowed the sample to reach a uniform deformation field and, therefore, is suitable for the characterization of mechanical properties of unidirectional composites specially to obtain the shear modulus in orthotropic materials in an experimental way.

**Keywords:** off axis test, shear modulus, deformation rosette, composite material, grip, concurrent design.

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MORDAZA PARA ENSAYO DE TRACCIÓN OBLICUA PARA MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS CON FUNCIONALIDAD DE ACOUPLE A MÁQUINA DEL LABORATORIO DE ESFUERZOS DE LA FIM DE LA EPN**

## **INTRODUCCIÓN**

El uso de materiales compuestos ha tenido un auge extraordinario en la actualidad, debido al avance tecnológico e investigaciones que buscan elementos con propiedades mecánicas determinadas dependiendo de la aplicación, existiendo materiales muy resistentes y livianos a la vez, por lo tanto los ensayos realizados a estos materiales compuestos son importantes para determinar sus propiedades mecánicas. El ensayo que se analizará en este proyecto será el de tracción oblicua (off axis) para posteriormente construir las mordazas que permitan realizarlo e implementarlo en el laboratorio de análisis de esfuerzos y vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN el cual no cuenta con un mecanismo para materiales compuestos laminados que permita analizar las propiedades mecánicas, los cuales se consideran en la actualidad los componentes de fabricación del futuro, el estudio del ensayo de tracción oblicua permitirá determinar el módulo de cizalladura, este método es el más usado que determina mejores resultados que cualquier otro ensayo de tracción en materiales compuestos.

La situación actual del laboratorio de la facultad permitirá incorporar, con el diseño de las mordazas, un nuevo procedimiento de análisis de materiales, con esto se resuelve un estudio pendiente que puede incorporarse a las prácticas de los estudiantes previamente validado el método mediante un protocolo de pruebas posteriormente realizado en el laboratorio y brindar apoyo de investigación en nuevos materiales que se desarrollen en el país.

## **Pregunta de investigación**

¿Se puede diseñar y construir mordazas para ensayos de tracción oblicua, probarla en materiales compuestos con la fibra de su matriz en diferentes orientaciones, acoplarlas a la máquina universal de ensayos existente en el laboratorio de nuevos materiales de la FIM y garantizar su correcta funcionalidad?

## **Objetivo general**

Diseñar y construir una mordaza para ensayo de tracción oblicua (off-axis) para materiales compuestos laminados con funcionalidad de acople a máquina del laboratorio de esfuerzos de la FIM de la EPN.

## **Objetivos específicos**

- Determinar los requerimientos establecidos por el ensayo off-axis para el análisis de materiales compuestos.
- Analizar el modelo de ensayo actual de cómo se llevan a cabo los procesos para el diseño del mecanismo.
- Estudiar varias alternativas de diseño para obtener los mejores resultados del mecanismo
- Analizar los materiales así como sus propiedades para la construcción del mecanismo y su facilidad de acople a la máquina de ensayos del laboratorio.

## **Alcance**

Se diseñará y construirá cuatro mordazas para realización de ensayos de tracción oblicua (off-axis) en materiales compuestos, se realizaran las pruebas correspondientes en un material compuesto y se evaluará su correcto funcionamiento.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Materiales compuestos**

### **1.1.1. Definición**

Un material compuesto es aquel que está formado por dos, o más materiales distintos en sus características por separado, que presenta varias propiedades físicas las cuales son superiores a las de los materiales que lo constituyen

Un material compuesto tiene mejores características físicas o químicas que las que tienen sus materiales constituyentes por separado. En estas se encuentran las propiedades más importantes y con un alto impacto ingenieril, las cuales tienen una mejora con estos materiales (Hull, 1987), entre estas se pueden mencionar:

Resistencia al desgaste, resistencia mecánica, resistencia a corrosión, resistencia a la fatiga, aislamiento térmico, aislamiento acústico y rigidez.

Según Derek Hull un material compuesto es aquel que cumple las siguientes condiciones:

- a) Consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente.
- b) Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas
- c) Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los componentes por separado

### **1.1.2. Clasificación**

Son muchos los tipos de materiales compuestos que existe tal variedad con la que muchos investigadores y autores de libros que les resulta un tanto complicado realizar una clasificación acertada y con un índice de aceptación adecuada debido a que si se tiene cierta clasificación en términos correctos con un alto porcentaje de acierto que detallan de igual manera muchas de las propiedades comunes, en ella puede haber materiales que están por investigar u otros simplemente se encuentran ocultos.

El primer paso es determinar una referencia dependiendo del factor al cual se hará hincapié dicha clasificación. Casi todos los materiales compuestos fabricados, se los han llevado a

cabo para mejorar propiedades mecánicas de tenacidad, resistencia, rigidez, y resistencia a altas temperaturas, se podría clasificar dependiendo de la forma y el tipo de refuerzo que interno del material como base, más conocido como matriz. Llegando así finalmente a la clasificación que se indica en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Clasificación de los materiales compuestos.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

De los dos grandes grupos, los de refuerzo con partículas se los usa principalmente para mejorar algunas de las propiedades de los materiales que son base, es decir las matrices, como son mejorar la conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas, mejorar la resistencia a la abrasión, dureza entre otros y en algunos casos también se los utiliza para reducir costos de fabricación. Algunos de los materiales se los fabrica con partículas inorgánicas que son utilizadas con el fin de mejorar propiedades en polímeros como por ejemplo la dureza superficial del material.

La otra clasificación de los materiales compuestos son los reforzados con fibra, los cuales presentan una gama alta en su uso debido a sus buenas propiedades mecánicas. Se ha determinado mediante experimentos que la resistencia verdadera de casi todos los materiales varía por debajo de lo normal a la que en teoría debería tener, debido al tipo de configuración que presenta el material. Según estas investigaciones se ha concluido que

esto se debe a la existencia de imperfecciones o discontinuidades en el material. (Paris, Cañas, & Marín, 2006)

### **1.1.3. Fibras y matrices.**

#### **1.1.3.1. Fibras**

El uso de fibras se ve reflejado en una necesidad de refuerzo para el material compuesto. Algunas de las fibras más usadas en la industria son las orgánicas como el kevlar que comúnmente es usada para fabricar chalecos antibalas; existen las fibras de vidrio y carbono.

Las fibras de carbono presentan ciertas propiedades que se determinan mediante la correcta orientación en los distintos planos de las capas de grafito las cuales deben estar orientadas de forma paralela al eje principal o de acción de la fibra. Para la fabricación de estas fibras de carbono se trabajan a cierta temperatura de la cual depende la resistencia y la rigidez de estas fibras.

Las fibras de vidrio están constituidas en base a sílice con porcentajes de boro, sodio, óxido de calcio en su composición, de este tipo la fibra más usada es la fibra de tipo E por sus altas propiedades de resistencia mecánica y desgaste.

Los gráficos de tensión vs deformación de algunos tipos de fibras se pueden observar en la Figura 1.2. El kevlar como fibra tiene determinada ductilidad cuando se presenta fractura debido al ensanchamiento puntual en la zona de falla. Analizando con un punto de vista desde las propiedades absolutas se puede determinar que esta fibra llega a ser la más resistente pero que la de carbono llega a ser la más rígida, así mismo la fibra de vidrio se caracteriza por ser la que menos resiste y la que menos rigidez tiene, con cierta ventaja de que llega a ser la más barata. (Paris, Cañas, & Marín, 2006)

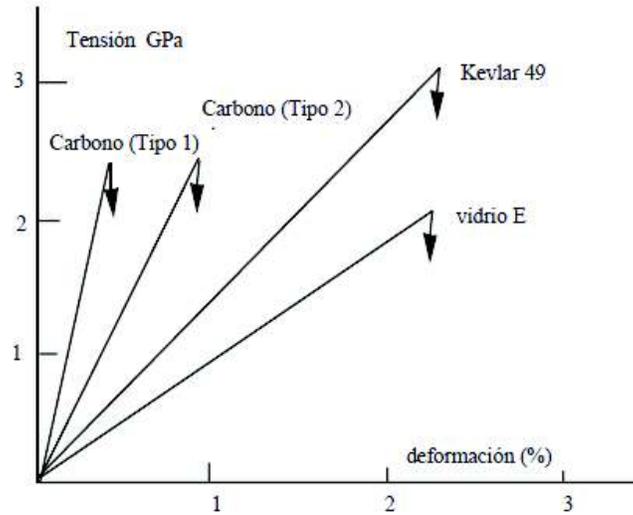


Figura 1.2. Diagrama tensión-deformación de varias fibras.

(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

### 1.1.3.2. Matrices

La mayor constitución física en porcentaje de los materiales compuestos es la matriz las cuales son fabricadas en base a resinas epoxi y poliéster con gran variedad en sus propiedades tanto mecánicas como químicas. Lo interesante de esta estructura es su propiedad termoestable que a diferencia de cualquier plástico convencional, estas matrices resisten el calor evitando su fundición a someterse a ciertas temperaturas, sin embargo también pueden perder rigidez si pasa por encima de los 300°C para resinas tipo epoxi y 110°C para las poliéster lo cual sería una limitación para ciertas aplicaciones.

Según Hull la tabla 1.1 presenta algunas de las propiedades más importantes de los dos tipos de resinas: epoxi y poliéster.

Tabla 1.1. Propiedades de resina epoxy y poliéster en materiales compuestos.

| <i>Propiedad</i>                 | <i>Unidades</i>                   | <i>Resina epoxy</i> | <i>Reina poliéster</i> |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|
| Densidad                         | g/cm <sup>3</sup>                 | 1,1-1,4             | 1,2-1,5                |
| Módulo de Young                  | GPa                               | 3-6                 | 2-4,5                  |
| Coeficiente Poisson              |                                   | 0,38-0,4            | 0,37-0,39              |
| Resistencia a la tracción        | MPa                               | 35-100              | 40-90                  |
| Resistencia a la compresión      | MPa                               | 100-200             | 90-250                 |
| Alargamiento rotura (tracción)   | %                                 | 1-6                 | 2                      |
| Conductividad térmica            | W/(m°C)                           | 0,1                 | 0,2                    |
| Coeficiente dilatación           | 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> | 60                  | 100-200                |
| Temperatura distorsión           | °C                                | 50-300              | 50-110                 |
| Contracción curado               | %                                 | 1-2                 | 4-8                    |
| Absorción de agua (24 h a 20° C) | %                                 | 0,1-0,4             | 0,1-0,3                |

(Hull, 1987)

#### 1.1.4. Aplicaciones

El desarrollo, los estudios realizados y la investigación sobre la fibra de carbono especialmente que presenta más interés en la actualidad o los materiales compuestos generalmente se lleva a cabo dentro de la industria militar o aeroespacial, naval, se empieza a usar en diversas aplicaciones industriales en las que es difícil sobrellevar el problema del coste económico, aplicaciones deportivas, generadores de tipo eólicos, marítimas.

En la industria aeronáutica, como se observa en la figura 1.3, ha sido el principal sector donde se ha dado mayor uso de estos nuevos materiales, la implementación ha determinado un avance de largo alcance, reduciendo en cambio a gran escala las aleaciones de metales más pesados ya existentes. Con esto se ha logrado analizar varias comparaciones de la evolución sobretodo del porcentaje en peso de un avión, lo que conlleva a un posterior análisis del coste estimado que la industria aeronáutica realizará en sus diferentes facetas. Además se tiene en la fabricación de alas, fuselajes y tren de aterrizaje. Para el Airbus 300 del año 1974 se tiene que el peso estructural referente a materiales compuestos con respecto al peso estructural total llegó a ser del 6%, para el caso del Airbus, 310-200 del año 1982 llegó a ser del 8% y dentro del Airbus 320 del año 1988, llegó casi al 20%. (Paris, Cañas, & Marín, 2006)

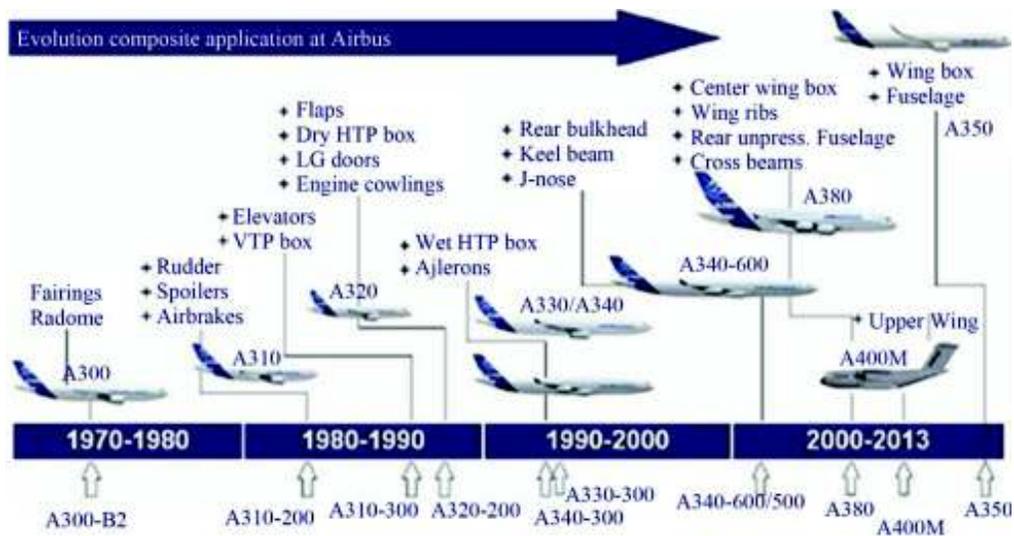


Figura 1.3. Aplicaciones de fibra de carbono en AIRBUS.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

En la ingeniería naval se utilizan para la construcción de cascos cubiertas y mástiles, y con un gran nivel en embarcaciones de tipo deportivas cuyos requerimientos son altas prestaciones de bajo peso y resistencia en el material.

En la industria automovilística, en modelos de accesorios como parrillas, parachoques, ballestas y bastidores de asiento. En muy pocas ocasiones también se han utilizado en partes del motor.

En la industria química se está utilizando comúnmente la fibra de vidrio con resina de poliéster la cual es usada en los revestimientos de tanques y recipientes a presión, consiguiendo varias capas en la parte interior de las paredes cuyas propiedades específicas del compuesto trabajan con gran versatilidad y resistencia sobre todo a la corrosión.

En la industria deportiva se utilizan para fabricación de raquetas de tenis, esquís, cañas de pescar, jabalinas, arcos de tiro, palos de golf, canoas, pértigas, obteniendo alta resistencia con un bajo peso lo cual ayuda a la maniobrabilidad.

En la ingeniería eléctrica, últimamente se están fabricando paneles, cajas de interruptores, soportes, donde estos compuestos brindan buenas propiedades aislantes.

El crecimiento del uso de estos materiales se observa en la figura 1.4 a continuación.



Figura 1.4. Mercado global fibra de carbono.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

## 1.2. Caracterización de cizalladura intralaminar de materiales compuestos

La caracterización en términos planos para la rigidez de los materiales compuestos laminados se basa en determinar las 4 constantes, valores que determinan el comportamiento de un material ortótropo, en otras palabras, determinar el módulo de elasticidad cuya dirección es la misma de la fibra ( $E_{11}$ ) y perpendicular a éstas ( $E_{22}$ ), el coeficiente de Poisson ( $\nu_{12}$ ) y el módulo a cizalladura intralaminar ( $G_{12}$ ).

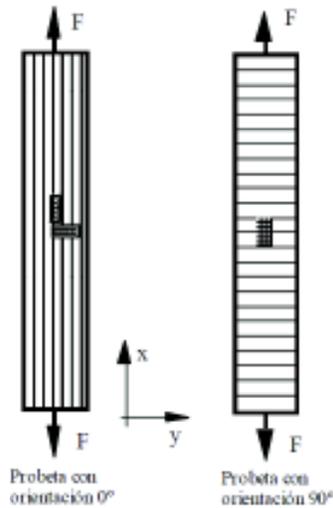


Figura 1.5. Esquema de probetas laminadas.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

Las constantes  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  y  $\nu_{12}$  se pueden determinar mediante ensayos de tracción de dos formas, el primero con fibra orientada en la misma dirección de carga donde se determinaría  $E_{11}$ ,  $\nu_{12}$  y la segunda con la fibra en dirección perpendicular a la carga para determinar la  $E_{22}$ , esto con ayuda de galgas orientadas como se muestra en figura 1.5.

Para determinar de una manera adecuada la rigidez ( $G_{12}$ ) y la resistencia a cizalladura intralaminar ( $S$ ), se debe tener en las probetas un estado tensional tangencial netamente puro. Sin embargo, existen investigaciones los cuales han determinado métodos analíticos para calcular estas constantes sin necesidad de que se logre este estado tensional, con esto se logra mayor facilidad en la geometría así como en las características de agarre de las probetas para someterlas al ensayo.

### **1.2.1. Métodos directos**

Presenta tres tipos de ensayos: ensayo de cortadura con railes, ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca losipescu, ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca compact.

#### **1.2.1.1 Ensayos de cortadura con railes (rail shear test)**

En este ensayo, se trabaja con probetas unidireccionales, cuyo método consiste en someter laminados con fibras orientadas a  $90^\circ$  respecto del eje X para deformarlos de una manera tangencialmente puro. Las probetas se introducen en dos mordazas con railes con lo que se intenta conseguir con un desplazamiento relativo entre estas al aplicar una fuerza de tracción como muestra la figura 1.6.

Para la toma de datos se utiliza dos galgas colocadas a  $\pm 45^\circ$  respecto a las fibras; al aplicar una fuerza de tracción o compresión sobre el espécimen, tratando de obtener un estado tangencial puro, evaluando así  $G_{12}$ .

Este estado de deformación tangencial puro mencionado teóricamente, no se produce. Varios resultados obtenidos mediante experimentos realizados por Whitney determinaron que a pesar de no llegar a tener uniformidad del estado tensional, pueden ser correctos para relaciones con las que cumplan  $L/b > 10$ , donde  $b$  es la distancia entre los railes, o el ancho de los especímenes.

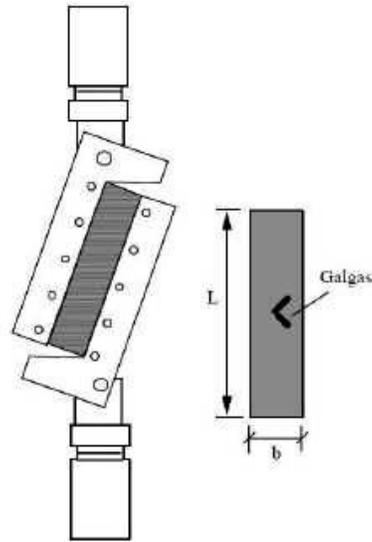


Figura 1.6. Sistema mordazas y probeta ensayo rail shear.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

El ensayo se rige por la norma ASTM D-4255 donde se detallan las dimensiones de las probetas así como de los raíles, en este tipo de ensayo las ecuaciones que gobiernan son las siguientes:

$$(\tau_{12})_{med} = \frac{P}{2Lh} \quad (1.1)$$

$$\gamma_{12} = |\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}| \quad (1.2)$$

$$G_{12} = \frac{(\tau_{12})_{med}}{\gamma_{12}} \quad (1.3)$$

Donde:

P= carga aplicada

L= longitud de la probeta a lo largo del carril

h = espesor

$\varepsilon$ = deformación unitaria de la galga extensiométrica

$G_{12}$  = módulo de cizalladura

### 1.2.1.2 Ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca (Iosipescu y compact)

El ensayo Iosipescu tiene como objetivo conseguir que la probeta llegue a un estado tensional puro, este es uno de los ensayos más utilizados para calcular la resistencia a

cortadura. El procedimiento de análisis es similar al rail shear con ayuda de dos bandas extensométricas situadas en la mitad del espécimen con una orientación de  $\pm 45^\circ$  como se observa en la figura 1.7.

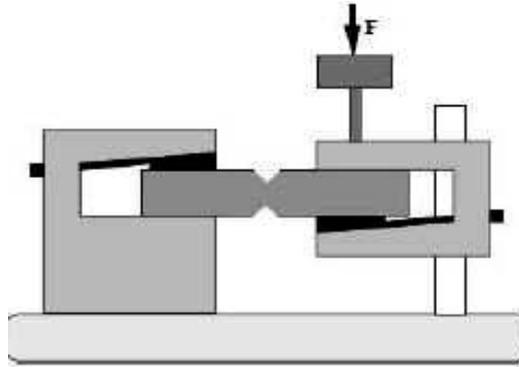


Figura 1.7. Mordazas para ensayo losipescu.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

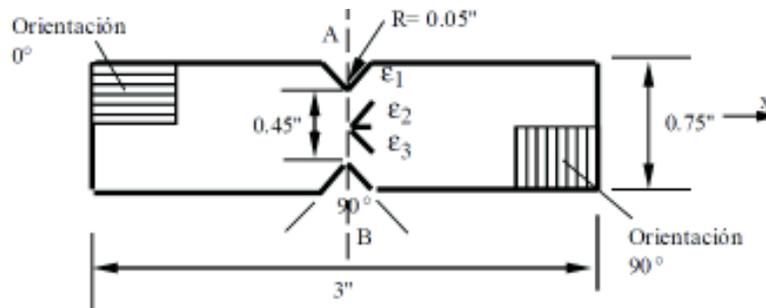


Figura 1.8. Probeta ensayo losipescu norma ASTM D-4225.  
(Paris, Cañas, & Marín, 2006)

La probeta losipescu es un espécimen de tipo doble muesca como se muestra en la figura 1.8, donde el vértice en la mitad de la probeta permite que la falla se de en ese punto. La rotura en dicha ubicación se produce de manera completa para el estado tangencial puro.

Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$(\tau_{12})_{max} = \frac{P}{wh} \quad (1.4)$$

$$(\gamma_{12})_{max} = (\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{-45^\circ}) \quad (1.5)$$

$$G_{12} = \frac{(\tau_{12})_{max}}{\gamma_{12max}} \quad (1.6)$$

Donde:

P= carga aplicada

h= ancho de la probeta

w = ancho de la sección del centro de la probeta

$\varepsilon$ = deformación unitaria de la galga extensométrica.

$G_{12}$  = módulo de cizalladura

### 1.2.1. Indirectos

Uno de los métodos indirectos es el ensayo de laminados equiangulares o laminados con una orientación de fibras de  $\pm 45^\circ$ .

Para este método se determina someter las probetas a una fuerza de tracción en el laminado de fibras a  $\pm 45^\circ$  con respecto al eje de tracción, logrando que el espécimen no se deforme de una manera angular y que se llegue a una simetría al momento de deformarse.

## 1.3. Ensayo de tracción oblicua (off-axis)

### 1.3.1. Descripción

El ensayo Off-axis es una opción viable para determinar el módulo de cizalladura ( $G_{12}$ ) y resistencia (S), en el cual se somete al material a tracción ubicando un espécimen con las fibras con cierto ángulo  $\theta$  respecto al eje x como muestra la figura 1.9.

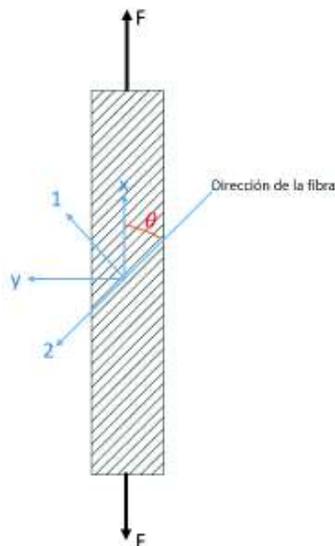


Figura 1.9. Especimen ensayo de tracción oblicua (off-axis).

(Fuente propia)

Las fibras del material están dispuestas en forma unidireccional y se espera un estado de tensión en la dirección del eje  $x$ , mientras la carga es soportada por las fibras en mayor medida que la matriz constituyente. La orientación de las fibras está definida por el ángulo  $\theta$ .

Siguiendo la norma ASTM D-3039, las constantes del material son obtenidas al situar una galga según la dirección del eje  $x$  con las fibras orientadas a  $90^\circ$ , lo cual permite obtener el valor de la deformación  $\varepsilon_x$  con cuyo valor se puede obtener la constante  $E_{11}$ .

$$E_{11} = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (1.7)$$

La constante  $E_{22}$  y  $\nu_{12}$  son obtenidas de manera similar al poner la galga en dirección del eje  $x$  y otra en el eje  $y$  pero con las fibras orientadas a  $0^\circ$  a partir de la ecuación 1.7 y ecuación 1.8

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (1.8)$$

Obtenido las 3 constantes anteriores se puede calcular el módulo de cizalladura mediante la ecuación 1.9.

$$G_{12} = \frac{\cos^2\theta \sin^2\theta}{\frac{1}{E_{11}}\cos^4\theta - \frac{1}{E_x} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}}\cos^2\theta \sin^2\theta + \frac{1}{E_{22}}\sin^4\theta} \quad (1.9)$$

Otra manera alterna de obtener la constante  $G_{12}$  es colocar una roseta en el centro de la probeta para determinar directamente  $\gamma_{12}$  mediante las siguientes ecuaciones.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \quad (1.10)$$

$$\sigma_{12} = \frac{F}{A} \sin\theta \cos\theta \quad (1.11)$$

Existen dos tipos comunes de galgas tipo roseta, las que están a  $45^\circ$  y a  $60^\circ$ .

Para las rosetas a  $45^\circ$  que se observan en la figura 1.10 se tiene que la deformación angular  $\gamma$  se calcula mediante las siguientes ecuaciones.

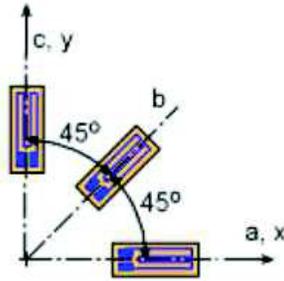


Figura 1.10. Roseta a 45°.

(Gramoll, 2008)

$$\epsilon_x = \epsilon_a \quad (1.12)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_c \quad (1.13)$$

$$\gamma_{xy} = 2 \epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c \quad (1.14)$$

$$\gamma_{12} = (\epsilon_y - \epsilon_x) \text{Sen}2\theta + \gamma_{xy} \text{Cos}2\theta \quad (1.15)$$

### 1.3.2. Medida de deformación usando ARDUINO UNO

Para el uso de las rosetas se necesita de un medidor de deformaciones unitarias. Una galga extensométrica en un sensor, en el cual varía la resistencia en función de la deformación que tenga esta.

- **Puente de Wheatstone**

Un puente de Wheatstone (figura 1.11) es un circuito formado por cuatro resistencias. Existe un voltaje de entrada y de salida, el voltaje de salida varía en función de la resistencia según la ecuación 1.16.

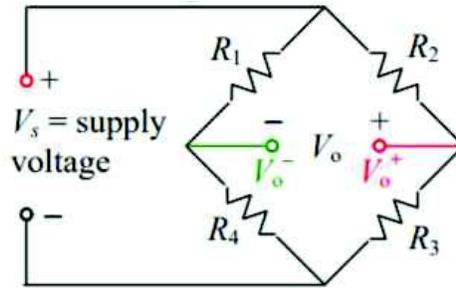


Figura 1.11. Puente de Wheatstone.

(Cimbala, 2013)

$$V_0 = V_S \frac{R_3 R_1 - R_4 R_2}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)} \quad (1.16)$$

Si se utilizan cuatro resistencias de igual medida, se dice que el puente está en equilibrio, por lo tanto el voltaje de salida  $V_0$  es cero.

Cuando se conecta una galga extensométrica en lugar de la resistencia  $R_3$  como se muestra en la figura 1.12, se dice que se tiene una configuración de tipo cuarto de puente.

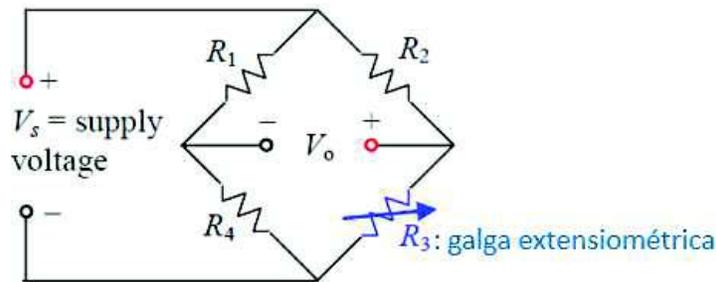


Figura 1.12. Puente de Wheatstone configuración cuarto de puente.

(Cimbala, 2013)

Una vez que se aplique una perturbación en la galga, esta sufrirá una variación en la resistencia igual a  $\delta R_3$  con lo cual la resistencia  $R_3$  aumentará a  $\delta R_3 + R_3$ , considerando que las variaciones  $R_{3,initial} R_1 - R_4 R_2 = 0$  para que el puente este en balance se obtiene que:

$$V_0 = V_S \frac{\delta R_3 R_1}{(R_2 + \delta R_3 + R_{3,initial})(R_1 + R_4)} \quad (1.17)$$

La galga extensométrica tiene un factor  $S$  que dependerá del fabricante con lo cual la variación es  $\delta R_3 = R_{3inicial} S \varepsilon_a$  donde  $\varepsilon_a$  es la deformación que se quiere medir.

Al desarrollar estas relaciones la deformación se establece mediante la ecuación 1.18.

$$\varepsilon_a \approx \frac{V_0}{S V_S} \frac{(R_2 + R_{3inicial})^2}{R_2 R_{3inicial}} \quad (1.18)$$

Si se utilizan galgas de  $120 \Omega$  de resistencia las resistencias del puente también serán de  $120 \Omega$  por lo tanto se tiene que la deformación es igual a:

$$\varepsilon_a \approx \frac{4V_0}{S V_S} \quad (1.19)$$

- **Medida de deformación con ARDUINO UNO**

La celda de carga (figura 1.13) es un elemento de tipo transductor conformado por varias galgas extensométricas formando un puente Wheatstone, que tienen como objetivo convertir una magnitud de fuerza en señal eléctrica.



Figura 1.13. Celda de carga.

(Naylamp, 2016)

- **Módulo HX711, transmisor de carga**

El módulo HX711 es un dispositivo de interfaz que permite la comunicación entre la celda de carga y arduino, además es capaz de leer las variaciones de fuerza así como del puente Wheatstone conformado por la celda de carga, este módulo convierte la señal analógica a digital mediante un conversor incorporado A/D de 24 bits.



Figura 1.14 Módulo HX711.

(Naylamp, 2016)

La tabla 1.2 muestra la conexión entre el módulo y el microcontrolador, en este caso arduino.

Tabla 1.2. Conexión entre módulo HX711 y arduino.

| Módulo HX711 | Arduino UNO, MEGA, NANO |
|--------------|-------------------------|
| Pin GND      | Pin GND                 |
| Pin DT       | Pin A1                  |
| Pin SCK      | Pin A0                  |
| Pin VCC      | Pin 5V                  |

(Naylamp, 2016)

El esquema de conexión de todo el circuito para la celda de carga se muestra en la figura 1.15.

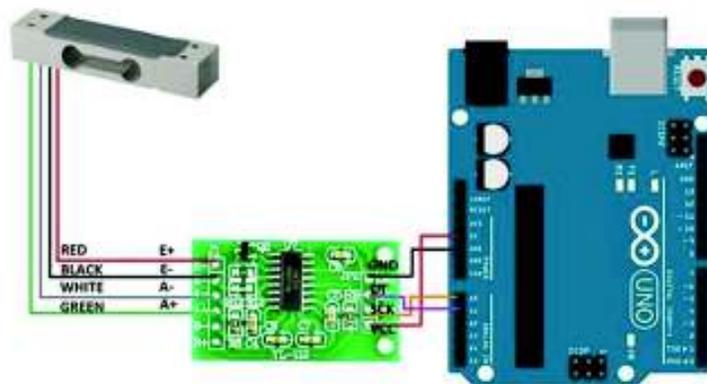


Figura 1.15. Circuito celda de carga con arduino.

(Naylamp, 2016)

### 1.3.3. Problemas con el ensayo

Al parecer el ensayo resulta sencillo, no obstante el problema radica en obtener en el material un estado tangencial puro y que la carga actúe en la dirección de ortotropía de manera uniforme. (García, 2016)

En un ensayo de tensión normal la probeta es fijada en sus extremos obteniéndose en uno de ellos un empotramiento mientras el otro se desplaza, al estar las fibras a cierta inclinación respecto a la dirección de la carga se produce un esfuerzo cortante y un momento flector en cada extremo de la probeta incurriendo así en un serio problema al no permitir que el espécimen no se deforme correctamente como se muestra en la siguiente figura 1.16.

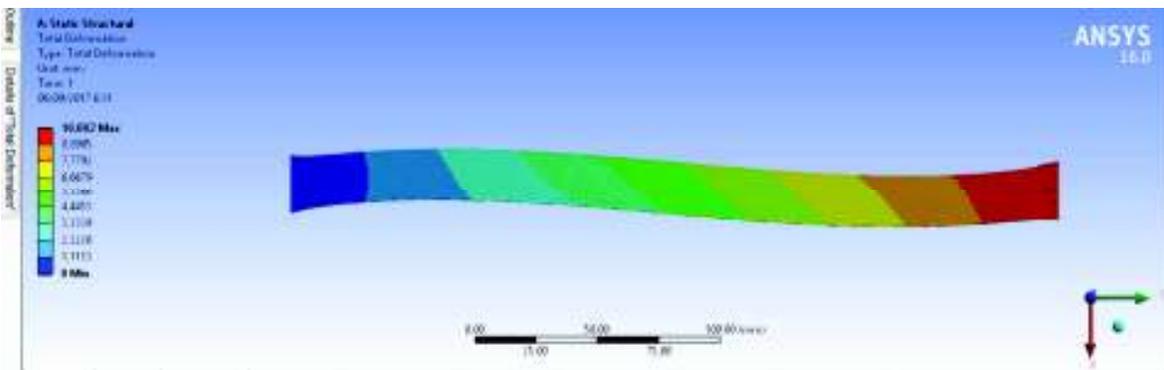


Figura 1.16. Problema de deformación de la probeta en ensayo off axis.

(Fuente propia)

### 1.3.4. Estudios relacionados.

- **Estudios realizados por Chamis & Sinclair**

Proponen una solución simple que consiste en utilizar probetas esbeltas cuya relación de dimensión está dado por  $L/2h > 14$ . Con esto los efectos de acción de las mordazas en los extremos, se ven disminuidos en el centro del espécimen, además de utilizar agarres en los extremos con un pin móvil y galgas extensométricas para medir las deformaciones

El estudio de Chamis y Sinclair describe magnitudes de tensión relativa en el plano de orientación de  $10^\circ$  evaluadas a partir del equilibrio de fuerza y un criterio de esfuerzo combinado como la resistencia al cizallamiento, la deformación por cizallamiento y la variación del módulo de cizallamiento con respecto al ángulo de orientación. Realizan un estudio analítico mediante las ecuaciones para predecir la curva de tensión-deformación

cortante y un análisis de elementos finitos de la variación de tensión a través del ancho en la longitud media de la muestra.

Las dimensiones de la probeta para esta investigación están dados por la figura 1.17:

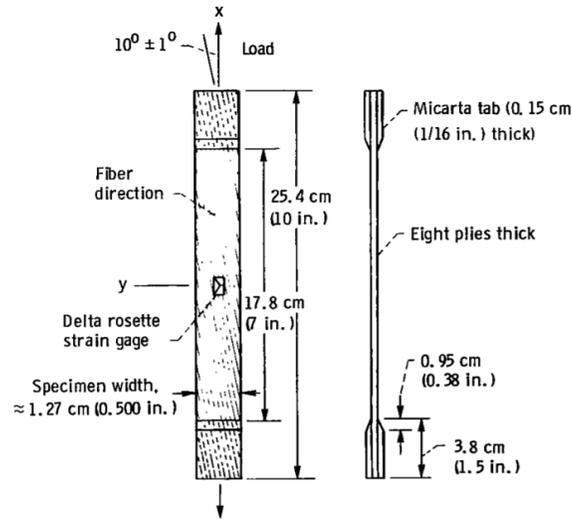


Figura 1.17. Geometría de la probeta de tracción fuera de eje para 10°.

(Chamis & Sinclair, 1976)

Para el análisis de las deformaciones de las 3 galgas utilizadas se plantean en una matriz que describe tal comportamiento según la orientación de las fibras

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{g1} \\ \epsilon_{g2} \\ \epsilon_{g3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_{g1} & \sin^2 \theta_{g1} & \frac{1}{2} \sin 2\theta_{g1} \\ \cos^2 \theta_{g2} & \sin^2 \theta_{g2} & \frac{1}{2} \sin 2\theta_{g2} \\ \cos^2 \theta_{g3} & \sin^2 \theta_{g3} & \frac{1}{2} \sin 2\theta_{g3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{cxx} \\ \epsilon_{cyy} \\ \epsilon_{cxy} \end{Bmatrix} \quad (1.20)$$

Donde:

$\epsilon_{g1}, \epsilon_{g2}, \epsilon_{g3}$ , son las deformaciones de las galgas extensométricas

$\theta_{g1}, \theta_{g2}, \theta_{g3}$ , son los ángulos de orientación medidos desde la dirección de la carga

$\epsilon_{cxx}, \epsilon_{cyy}, \epsilon_{cxy}$ , son los esfuerzos en los ejes de acción x e y

La ecuación que relaciona el esfuerzo de cizallamiento intralaminar de la capa con respecto a la deformación de los ejes para cualquier orientación es:

$$\epsilon_{l12} = (\epsilon_{cyy} - \epsilon_{cxx}) \sin 2\theta + \epsilon_{cxy} \cos 2\theta \quad (1.21)$$

El esfuerzo en los ejes se obtiene de la matriz anterior

$$\{\epsilon_c\} = [R]^{-1}\{\epsilon_g\} \quad (1.22)$$

Para rosetas de 60° los ángulos serían:

$$\theta_{g1} = 0^\circ; \theta_{g2} = 120^\circ; \theta_{g3} = 240^\circ \quad (1.23)$$

Las ecuaciones que gobiernan para las deformaciones para este tipo de rosetas o galgas son:

$$\epsilon_{cxx} = \epsilon g1 \quad (1.24)$$

$$\epsilon_{cyy} = \frac{2\epsilon g2 + 2\epsilon g3 - \epsilon g1}{3} \quad (1.25)$$

$$\epsilon_{cxy} = \frac{2*(\epsilon g3 - \epsilon g2)}{\sqrt{3}} \quad (1.26)$$

Para rosetas de 45° los ángulos serían:

$$\theta_{g1} = 0^\circ; \theta_{g2} = 45^\circ; \theta_{g3} = 90^\circ \quad (1.27)$$

Las ecuaciones que gobiernan para las deformaciones para este tipo de rosetas o galgas son:

$$\epsilon_{cxx} = \epsilon g1 \quad (1.28)$$

$$\epsilon_{cyy} = \epsilon g3 \quad (1.29)$$

$$\epsilon_{cxy} = -\epsilon g1 + 2 \epsilon g2 - \epsilon g3 \quad (1.30)$$

En cuanto a la probeta, la instrumentación y el ensayo; las probetas se instrumentaron con uno a cinco medidores de tensión, tipo EA-13-030YB-120, roseta delta 60° de tal forma como se muestra en la figura 1.18. Las probetas de prueba se colocaron en los agarres representados en la figura 1.19 y se cargaron para fracturar utilizando una máquina universal de prueba accionada hidráulicamente.

Las mordazas utilizadas por Chamis y Sinclair tienen una configuración peculiar, como la que se muestra en la figura 1.19.

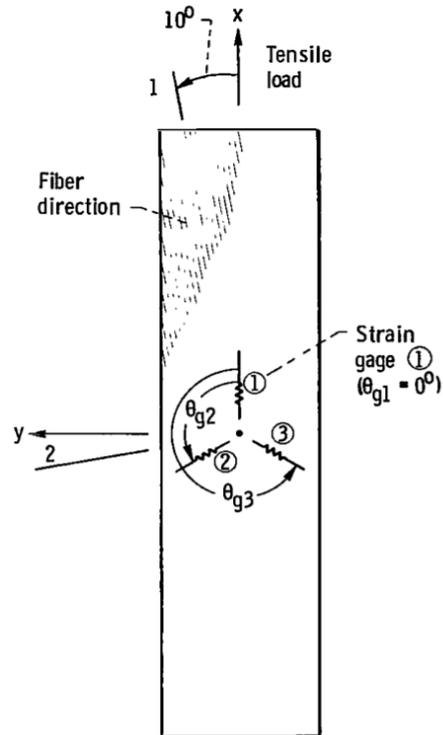


Figura 1.18. Posición de las rosetas (galgas extensométricas).  
(Chamis & Sinclair, 1976)



Figura 1.19. Configuración de sujeción para Mordazas ensayo Off axis 10°.  
(Chamis & Sinclair, 1976)

Los investigadores concluyeron que los resultados de la probeta para el ensayo off-axis a 10°, se puede considerar como una posible prueba estándar para la caracterización de cizallamiento intralaminar de compuestos de fibras unidireccionales.

- **Estudios realizados por Pindera & Herakovich**

Para esta investigación los autores llegan a determinar que es ventajoso formular la teoría en términos de tensiones como uno de los conjuntos de compuestos independientes. La

evaluación de las diversas constantes en el modelo debería ser más simple y la interpretación más fácil para el caso de las pruebas fuera del eje u off axis, ya que la carga a lo largo de las direcciones principales del material sigue siendo proporcional y solo tres componentes de tensión están presentes.

Se realizaron estudios para relacionar el error en la relación del radio de Poisson y el ángulo de las fibras, esto se muestra en la figura 1.20, también se llegó a determinar un factor de corrección para obtener el módulo de cizalladura  $G_{12}$ .

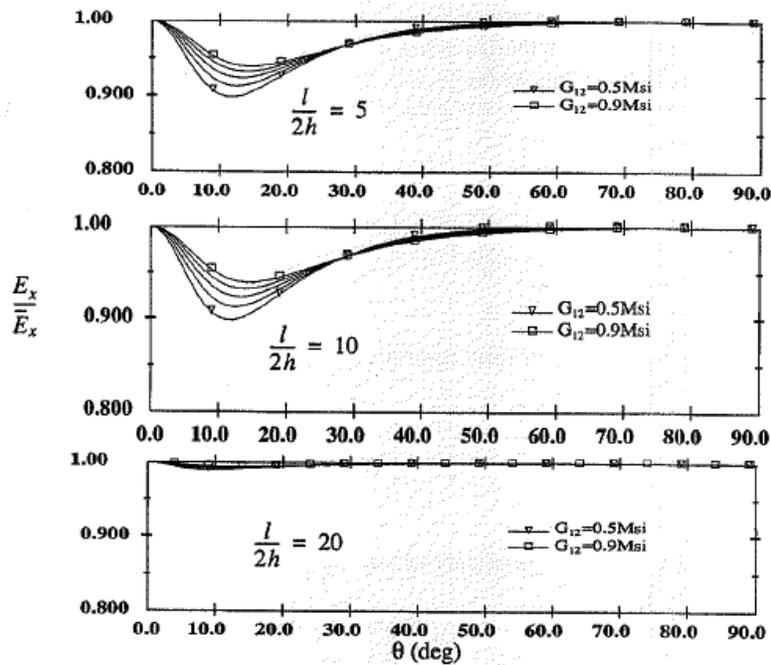


Figura 1.20. Error en el coeficiente de Poisson vs ángulo del ensayo Off-axis.  
( Pindera & Herakovich, 1981)

Además se comparó la relación del módulo  $G_{12}$  de cizalladura con respecto al ángulo de orientación de las fibras y el radio de las probetas fabricadas de carbón-poliamida, se analizan tres diferentes configuraciones de radio y se puede observar en la figura 1.21 que el error es cero conforme estos radios tienden a un ángulo de 45°. Basado en estos resultados con un radio de 10 o más y una orientación en el rango de 25° a 45°, es recomendable determinar el módulo de cizalladura  $G_{12}$  en compuestos de matriz polimérica.

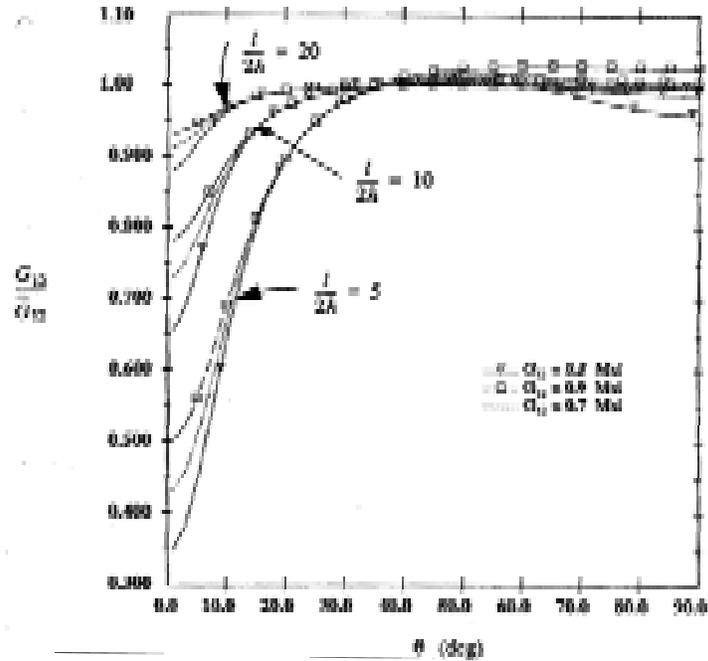


Figura 1.21. Módulo de cizalladura  $G_{12}$  vs ángulo de orientación de las fibras.  
( Pindera & Herakovich, 1981)

Para el estudio Pindera y Herakovich realizaron ensayos sobre compuestos grafito-poliámida fabricado por NASA-Langley, utilizando mordazas como las que se muestran en la figura 1.22.

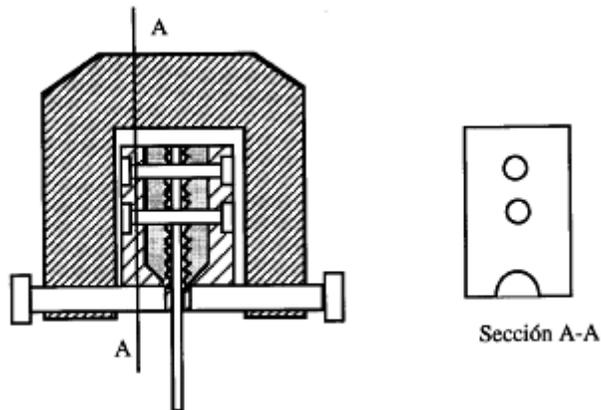


Figura 1.22. Mordazas utilizadas por Pindera y Herakovich.  
( Pindera & Herakovich, 1981)

La relación del radio  $L/2h$  fue de 10, con varios ángulos de la fibra de  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $75^\circ$ . Para lo cual dispusieron unas mordazas que permitían el giro en los extremos del espécimen.

Los datos obtenidos del ensayo fueron un punto importante para determinar si el ensayo tuvo una solución o no; los cuales fueron adquiridos como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 1.3. Datos obtenidos por Pindera y Herakovich en el ensayo off-axis.

| $\theta^\circ$ | $L/2h$ | $G_{12}^*$ (GPa) | Error % | $G_{12}/G_{12}$ | $G_{12}$ | Error % |
|----------------|--------|------------------|---------|-----------------|----------|---------|
| 5              | 10     | 7.36             | 47      | 0.791           | 5.82     | 16      |
| 10             | 10     | 6.37             | 27      | 0.881           | 5.61     | 12      |
| 15             | 10     | 5.91             | 18      | 0.939           | 5.55     | 11      |
| 30             | 10     | 5.41             | 8.4     | 0.994           | 5.37     | 7       |
| 45             | 10     | 5.0              | 0       | 1.000           | 5.0      | 0       |
| 60             | 10     | 4.89             | -2.2    | 1.004           | 4.9      | -2      |
| 75             | 10     | 4.91             | -1.8    | 1.002           | 4.9      | -2      |

( Pindera & Herakovich, 1981)

Los errores disminuyeron al aumentar el ángulo y la relación  $L/2h$ , sin embargo se optó por realizar ensayos sobre probetas de  $10^\circ$  con un porcentaje de error del 12%.

- **Estudios realizados por C. T. Sun & S.P Berreth.**

Las altas concentraciones de tensión y las no uniformes en todo el campo de tensión en los ensayos off axis, son causadas por la restricción de la deformación por cizallamiento. Para resolver el problema, estos investigadores se plantean ubicar un tacón o refuerzo entre el espécimen y el agarre que permite la deformación por cizallamiento. Para esto analizaron una serie de diferentes materiales compatibles que ofrecen una rigidez de cizallamiento muy baja.

Los compuestos unidireccionales, las capas adhesivas suaves y las lengüetas de goma se analizaron obteniendo así, no tan buenos resultados.

El espécimen utilizado para esta investigación es el indicado en la figura 1.23 en el cual se muestran 4 galgas extensométricas ubicadas en diferentes puntos de la probeta.

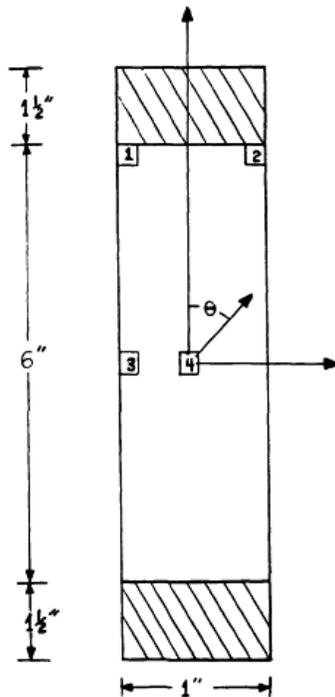


Figura 1.23. Probeta utilizada en los ensayos de Sun y Berreth.  
(Sun & Berreth, 1987)

Las pruebas con varios materiales de refuerzos suaves trajeron a la luz otro problema. El tacón debe ser muy rígido en la dirección transversal para evitar que las mordazas tiendan a dañar las capas unidireccionales. Un refuerzo de fibra de vidrio tejido ortogonalmente tiene una alta rigidez transversal y longitudinal con muy poca rigidez de corte. Con lo cual se desarrolló dos tipos diferentes de recubrimiento de fibra de vidrio moldeados en una matriz suave de silicona.

El primer tipo de recubrimiento es de fibra de vidrio de grado industrial estándar utilizado en la reparación de automóviles. El segundo material era un tipo de tejido que consiste en una capa de fibra de vidrio unidireccional colocada transversalmente sobre otra capa de fibra de vidrio unidireccional y tejida usando hilo de poliéster.

En cuanto a la fabricación todos los pegamentos utilizados no formaron una unión adecuada con la superficie lisa de la goma de silicona. Los refuerzos de fibra de vidrio deben colocarse en la probeta con la dirección transversal igual a la de la fibra de la probeta. Esto es necesario para minimizar el daño después de asegurar en las mordazas hidráulicas. El refuerzo compuesto de caucho de silicio y fibra de vidrio no era capaz de alcanzar cargas

extremadamente altas. Durante la prueba se descubrió que la capa de este material podía transmitir cargas de hasta 1.500 libras. Para cargas más altas el tejido de la fibra de vidrio falla y la muestra se sale de los agarres.

La comparación entre los datos experimentales y las soluciones de elementos finitos indica que el refuerzo de vidrio / epoxi convencional produce una condición de límite rígido esto se muestra en la figura 1.24.

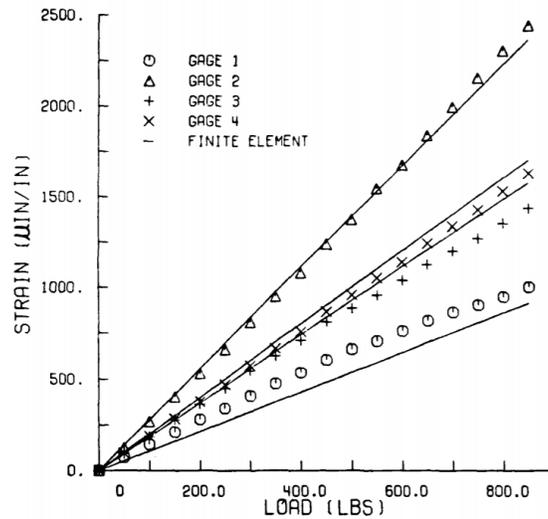


Figura 1.24. Resultados con tacones convencionales vidrio/epoxi.  
(Sun & Berreth, 1987)

La longitud del espécimen fue de 6 pulgadas. Con lo cual se logró un estado de tensión uniforme es decir esfuerzo uniforme. Para estudiar las distintas capacidades del refuerzo, se usaron muestras más cortas de longitudes de 4 pulgadas y 3/4 pulgadas. En ambos casos, el tacón produjo muy buenos resultados. Estos resultados muestran que al usar el nuevo tacón compuesto de silicón con fibra de vidrio, no es necesario usar una relación de aspecto grande para lograr un estado uniforme de deformación.

Se podría suponer que la razón por la que el nuevo método podría lograr un campo de deformación uniforme podría ser el resultado del deslizamiento entre el tacón y la muestra debido a la falta de un buen enlace o compactación entre las dos superficies. En la prueba, no se observó ningún deslizamiento entre el tacón y la probeta. Se realizaron una serie de pruebas utilizando refuerzos convencionales de material epoxy y fibra de vidrio. Estas pestañas se colocaron en la muestra de 6 pulgadas sin unión.

El nuevo refuerzo en el extremo compuesto de fibra de vidrio y una matriz de goma de silicona permitió la deformación por cizallamiento en muestras de material compuesto fuera del eje u off-axis sujetadas por agarres hidráulicos. Esta capacidad permitió que la muestra fuera del eje alcanzara un campo de deformación uniforme y, por lo tanto, es adecuada para la caracterización de propiedades mecánicas de compuestos unidireccionales, como se muestra en la figura 1.25. Además, el nuevo diseño del refuerzo hace posible utilizar muestras cortas para realizar pruebas sin inducir el efecto de concentración de tensión indeseable producido por el tacón rígido convencional.

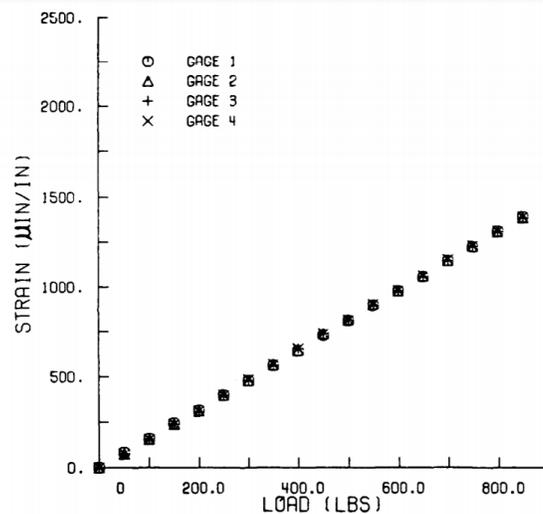


Figura 1.25. Esfuerzos con nuevos refuerzos fibra de vidrio.

(Sun & Berreth, 1987)

- **Estudios realizados por Tsai-Hill:**

Estos investigadores se basan en un desarrollo analítico. El esfuerzo es una medida de las fuerzas internas en un medio continuo, es un tensor, una entidad matemática, más que un vector. El vector F de fuerza se puede resolver en dos componentes  $F_x$  y  $F_y$ , a lo largo de los ejes de coordenadas x, y

$$F_x = F \cos \phi \tag{1.31}$$

$$F_y = F \sin \phi \quad (1.32)$$

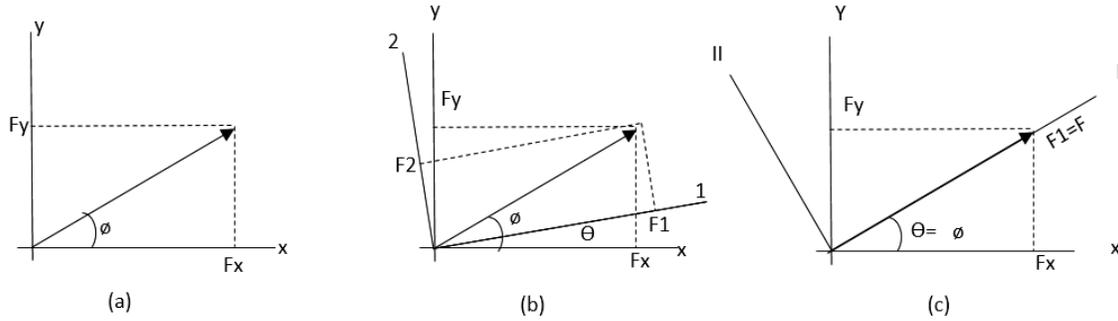


Figura 1.26. Sistemas de referencia utilizados en el estudio de Tsai Hill.  
(Tsai, 1966)

Con la orientación de la fibra se tiene un nuevo sistema de coordenadas de referencia 1-2 como se observa en la figura 1. 26, el cual es usado en este estudio. El ángulo entre el eje 1 y el eje x original es  $\theta$ . Los componentes de F en el nuevo o transformado sistema de coordenadas son F1 y F2 con las siguientes relaciones:

$$F_1 = F * \cos(\phi - \theta) \quad (1.33)$$

$$F_2 = F \sin(\phi - \theta) \quad (1.34)$$

Donde:

$$\cos(\phi - \theta) = \cos\phi \cos\theta + \sin\phi \sin\theta \quad (1.35)$$

$$\sin(\phi - \theta) = \sin\phi \cos\theta - \cos\phi \sin\theta \quad (1.36)$$

Ahora:

$$F_1 = F_x \cos\theta + F_y \sin\theta = mF_x + nF_y \quad (1.37)$$

$$F_2 = F_y \cos\theta - F_x \sin\theta = -nF_x + mF_y \quad (1.38)$$

Donde  $m = \cos\theta$  ;  $n = \sin\theta$

Esta teoría puede ser representada por una superficie cuadrada lisa en el espacio de tensión. La tensión máxima o la teoría de la deformación máxima se pueden representar mediante un espacio de esfuerzo o deformación en cubos.

De la misma analogía del vector fuerza, se tiene los esfuerzos:

$$\sigma_1 = m^2 \sigma_x + n^2 \sigma_y + 2mn \sigma_s \quad (1.39)$$

$$\sigma_2 = n^2\sigma_x + m^2\sigma_y + 2mn\sigma_s \quad (1.40)$$

$$\sigma_6 = -mn\sigma_x + mn\sigma_y + (m^2 - n^2)\sigma_s \quad (1.41)$$

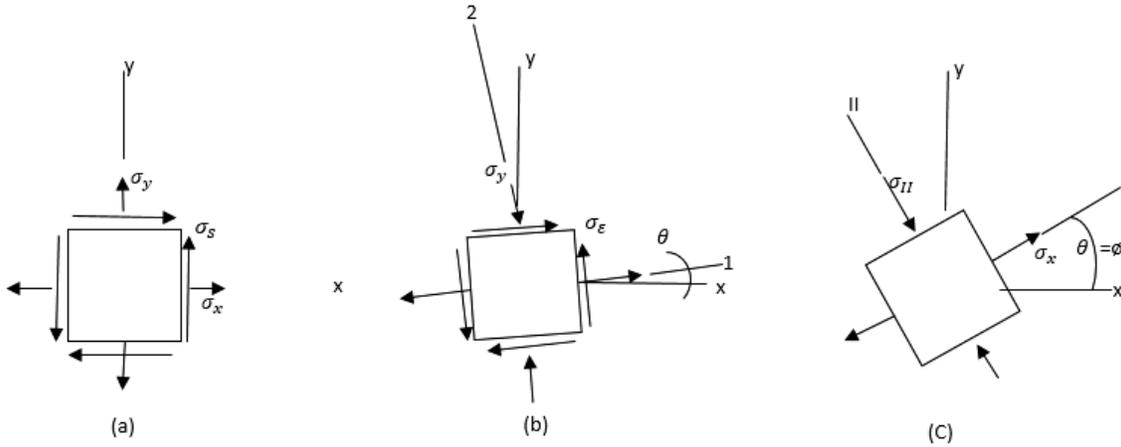


Figura 1.27. Esfuerzos presentes en un elemento infinitesimal.

(Tsai, 1966)

La investigación de Tsai también se centra en el significado físico de los componentes normales de la deformación,  $e_x$  y  $e_y$ , que se puede ilustrar como una medida de la extensión o contracción de la unidad a lo largo de los ejes  $x$  e  $y$  respectivamente. La deformación de corte  $e_s$  es una medida de distorsión que es el cambio de un ángulo recto original a un ángulo oblicuo.

$$e_1 = m^2 e_x + n^2 e_y + \left(\frac{mn * e_s}{2}\right) \quad (1.42)$$

$$e_2 = n^2 e_x + m^2 e_y - \left(\frac{mn * e_s}{2}\right) \quad (1.43)$$

$$\frac{e_s}{2} = -mne_x + mne_y + \left(\frac{(m^2 - n^2)e_s}{2}\right) \quad (1.44)$$

Similar al caso del esfuerzo, la tensión en cada punto dentro de un medio continuo está completamente especificada por tres componentes de deformación independientes. Las magnitudes de estas componentes de deformación dependen del sistema de coordenadas de referencia. A medida que cambian las coordenadas de referencia, las componentes de deformación cambian de acuerdo con las ecuaciones anteriores.

La diferencia principal entre el trabajo de distorsión y las teorías máximas de tensión radica en la existencia de interacción entre las fuerzas anisotrópicas. La teoría de trabajo distorsivo contiene un alto nivel de interacción, mientras que la teoría de esfuerzo o deformación máxima no supone alguna interacción. Con base en los datos de resistencia disponibles obtenidos de los compuestos de vidrio epoxídico, la teoría del trabajo distorsivo parece ser más precisa que la teoría máxima de tensión.

Según Tsai se puede predecir la resistencia de un compuesto laminado, si se conocen los módulos elásticos y las resistencias de cada capa constituyente. Una vez conocidos estos componentes, pueden ser sustituidos por teorías de fuerza apropiadas.

En un compuesto laminado, no todas las capas fallarán simultáneamente. Como una o varias de las capas han fallado, las capas que aún están intactas pueden ser capaces de sostener la carga existente.

El desplazamiento de la distribución de tensiones dentro de un material compuesto laminado puede provocar un cambio abrupto en la pendiente en la curva tensión-deformación del material compuesto. La fuerza máxima del compuesto se alcanza cuando las capas todavía intactas no pueden soportar la distorsión existente. Este análisis de resistencia de un compuesto laminado concuerda razonablemente con los datos disponibles obtenidos a partir del comportamiento del compuesto laminado de vidrio-epoxi.

- **Estudios realizados por Pagano & Halpin**

El modelo de Pagano-Halpin se emplea para ilustrar que, cuando el efecto de las restricciones finales se considera adecuadamente, se obtiene la expresión exacta para  $G_{12}$  (módulo de cizalladura). Se demuestra que el efecto de restricción final influye en la determinación precisa de  $G_{12}$  de manera más adversa de lo que afecta el módulo de Young de laminado  $E_{xx}$  en el eje de baja tensión.

Se considera para esta investigación el ensayo off-axis y un material ortotrópico homogéneo bajo un esfuerzo normal uniforme. La configuración de la deformada se indica mediante líneas continuas.

La deformación está dada por la ecuación 1.45:

$$\gamma_{xy} = S_{16} * \sigma_o \quad (1.45)$$

Donde  $S_{16}$  es el módulo de corte o cizalladura.

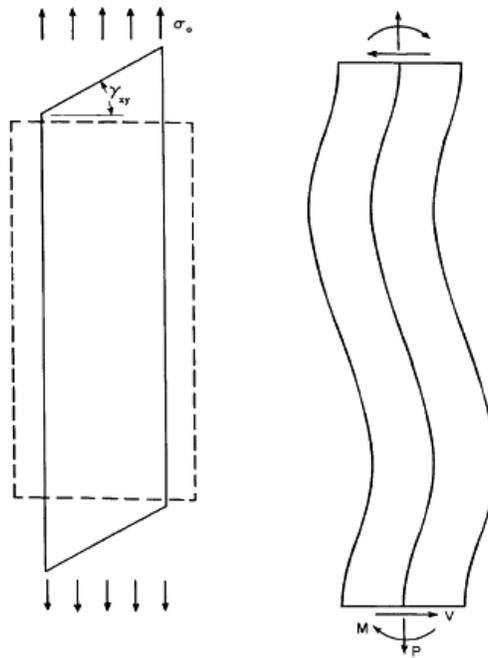


Figura 1.28. Deformación de la probeta debido a restricciones en los extremos.  
(Pagano & Halpin, 1968)

La aplicación de desplazamientos constantes induce fuerzas de cizallamiento y pares de flexión en los extremos de la barra, lo que da como resultado la deformación no uniforme que se muestra en la figura 1.28.

Pagano y Halpin también proponen una solución analítica basado en elementos finitos guiados por la figura 1.29.

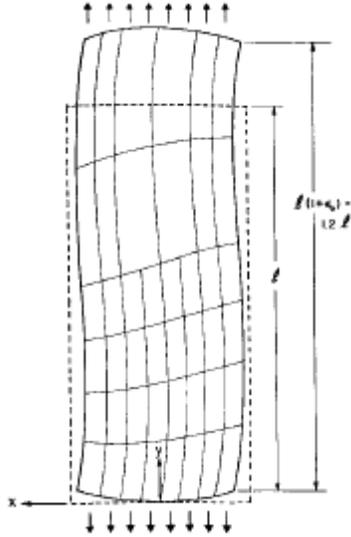


Figura 1.29. Solución analítica propuesta por Pagano y Halpin.  
(Pagano & Halpin, 1968)

Por lo tanto, las ecuaciones que gobiernan deben cumplirse en el medio ortotrópico, estas ecuaciones se muestran a continuación.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad (1.46)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \quad (1.47)$$

Las relaciones esfuerzo-desplazamiento son:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.48)$$

Y las ecuaciones constitutivas son:

$$\epsilon_x = S_{11}\sigma_x + S_{12}\sigma_y + S_{16}\tau_{xy} \quad (1.49)$$

$$\epsilon_y = S_{12}\sigma_x + S_{22}\sigma_y + S_{26}\tau_{xy} \quad (1.50)$$

$$\gamma_{xy} = S_{16}\sigma_x + S_{26}\sigma_y + S_{66}\tau_{xy} \quad (1.51)$$

Donde  $S_{ij}$  son los coeficientes con respecto al sistema de coordenadas  $xy$ , cuatro de estos son independientes. Se analiza además las condiciones de borde en la línea centro de la probeta

$$u(0,0) = \frac{\partial u}{\partial y}(0,0) = 0 \quad (1.52)$$

$$u(l, 0) = \frac{\partial u}{\partial y}(l, 0) = 0 \quad (1.53)$$

$$u(0, 0) = 0 \quad (1.54)$$

$$u(l, 0) = \epsilon_0 l \quad (1.55)$$

Donde  $\epsilon_0$  esfuerzo en la línea centro es directamente proporcional a la magnitud de la fuerza axial aplicada

En la parte experimental Pagano y Halpin realizan un estudio en la configuración del espécimen con fibras orientadas  $30^\circ$  respecto a la vertical en una máquina con mordazas fijas, sin rotación, con lo que se obtuvo una deformación como se muestra en la figura 1.30.

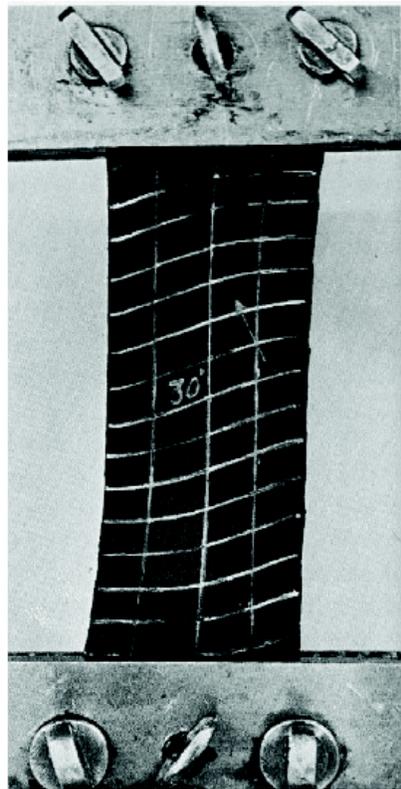


Figura 1.30. Deformación con fibras a  $30^\circ$  con mordazas fijas sin rotación.

(Pagano & Halpin, 1968)

Se puede observar la deformación de la muestra de las abrazaderas en las regiones de alta tensión de tracción. Las cargas aplicadas muestran que existe un gran momento de flexión y fuerza cortante que actúa en las abrazaderas.

Lo ideal se llegaría a obtener mediante una configuración de extremos que permitan una deformación uniforme que minimice las restricciones en los extremos, el resultado se muestra en la figura 1.31.

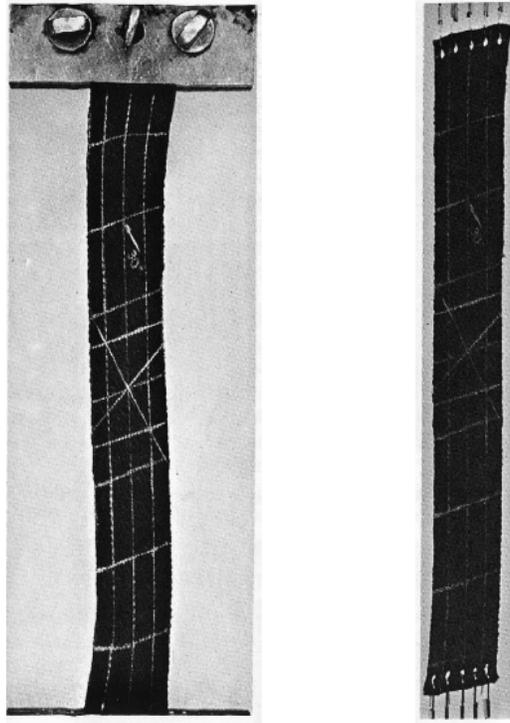


Figura 1.31. Configuración de la probeta con extremos uniformes.

(Pagano & Halpin, 1968)

## 1.4. Equipos

Para realizar pruebas en materiales compuestos se necesitan como equipos, la máquina universal de ensayos y unas mordazas acorde al material y ensayo que se desee realizar.

### 1.4.1. Máquina universal de ensayos

Para la realización de ensayos se tiene las máquinas universales (figura 1.31), las mismas que permiten realizar ensayos de resistencia a tracción, a compresión, Flexión y corte, en diversos materiales metálicos y no metálicos.

Existen diferentes tipos de máquinas de ensayos, de acuerdo al material y la carga máxima que se quiera aplicar al mismo. Entre estas tenemos: de una sola columna, de doble columna, de suelo, Serie Satec, de automatización, test master.

Una maquina universal de ensayos permite ejercer solicitaciones mecánicas por medio del uso de mordazas que se mueven mediante un sistema hidráulico. Con esta máquina se puede comprobar la resistencia de los materiales en una probeta normalizada midiendo la deformación y la carga hasta que esta falle.



Figura 1.32. Maquina universal de ensayos Tinius Olsen.  
(Alvarez & Peña, 2010)

## 1.4.2. Mordazas

Las mordazas son mecanismos de sujeción para mantener fija una probeta, existen varios tipos de diferente tipo de sujeción, para diferentes rangos de fuerza, de tracción directa o indirecta, de acuerdo a temperaturas de ensayos y para diferentes tipos de materiales. (Zwick, 2015)

### 1.4.2.1. Mordazas de tornillo

Las mordazas de tornillo son mordazas cuya fuerza de sujeción se aplica de manera manual a través del par del tornillo, se utilizan para aplicar fuerzas pequeñas a probetas finas tanto de diámetro como de espesor (figura 1.33).

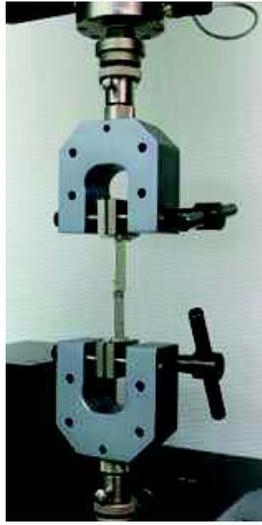


Figura 1.33. Mordazas de tornillo.  
(Ibertest, 2017)

#### 1.4.2.2. Mordaza tipo cuña

Las mordazas de tipo cuña (figura 1.34) poseen un principio de funcionamiento de tipo autoprensante, es decir que la fuerza de apriete va aumentando conforme la probeta se va desplazando en la dirección de la fuerza de tracción. Al iniciar un ensayo se da una fuerza de pretensión mediante el uso de un husillo, el uso de estas mordazas tiene como principales ventajas que las probetas no resbalan y la longitud de sujeción se mantiene constante aunque varíe el espesor de la probeta.

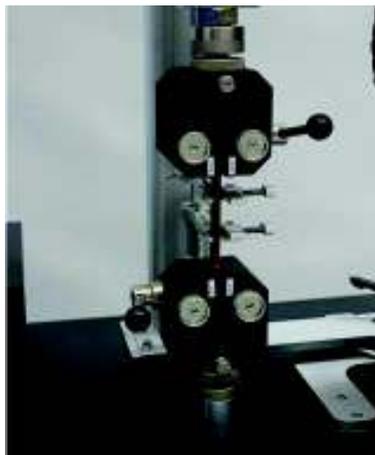


Figura 1.34. Mordaza tipo cuña.  
(Ibertest, 2017)

## **2. METODOLOGÍA**

Para la obtención de las especificaciones técnicas y requerimientos del prototipo se realizará el desarrollo de la función de calidad, el mismo que tiene como objetivo plasmar los requerimientos del usuario en el diseño para que este cumpla con su función.

### **2.1. Desarrollo de la función de calidad**

El desarrollo de la función de calidad permite asegurar que el producto a diseñar cumpla las necesidades requeridas por el usuario traduciendo estas necesidades a especificaciones técnicas de ingeniería.

#### **2.1.1. Voz del usuario**

Las características del equipo se basan en investigaciones y modificaciones que se han ido haciendo al ensayo de tracción oblicua a lo largo del tiempo, también se toma en cuenta las dimensiones de la máquina, y necesidades propias del ensayo, con lo cual se establece los siguientes requerimientos:

Dimensionamiento para aplicación en materiales compuestos, que el material sea resistente a la corrosión y al desgaste, que sea de fácil acople a la maquina universal, que evite deslizamiento de las probetas, que tenga una vida útil de al menos 10 años y que sea de bajo costo.

#### **2.1.2. Voz del ingeniero**

Tomando en cuenta las necesidades del usuario se traduce cada requerimiento a especificaciones y características técnicas obteniendo lo siguiente:

Dimensiones, desgaste de material, acoplamiento, sujeción, vida útil, costos

#### **2.1.3. Resultados**

El diseño de la mordaza es único debido al requerimiento del laboratorio, por lo tanto no se considera necesario la obtención de una casa de la calidad, el diseño es bajo pedido y no para producción en serie.

## 2.2. Especificaciones técnicas

El establecimiento de las especificaciones técnicas permite la definición del producto las mismas que se muestran en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.

|   |   |                |            |  |
|---|---|----------------|------------|--|
| <b>Empresa: EPN</b>   | <b>Producto:</b><br>Mordaza para ensayo de tracción oblicua<br>(off-axis) |                |            | <b>Fecha inicial:</b><br>26/04/2017  |
|   |   |                |            | <b>Fecha revisión:</b><br>26/05/2017   |
| <b>Diseñadores</b><br>Rodríguez Jairo<br>Vera Danny                         |   |                |            | <b>Página 1/1</b>  |
| <b>Especificaciones</b>   |   |                |            |  |
| <b>Concepto</b>   | <b>Fecha</b>  | <b>Propone</b> | <b>R/D</b> | <b>Descripción</b>   |
| Función   |   | D+C            | R          | Sujetar probetas sin permitir deslizamiento y evitando restringirla con esfuerzo cortante y momento flector en su extremo. |
| Dimensiones   |   | D              | R          | Probetas de 2 a 3 mm de espesor por 28 mm de ancho.  |
| Fuerzas   |   | D+C            | R+D        | Fuerza de tracción máxima de 2,5 kN  |
| Materiales  |   | D              | R          | Materiales compuestos  |
| Señales y control   |   | C              | R          | Máquina Universal Tinius Olsen   |
| Vida Útil   |   | C              | D          | Hasta 10 años  |
| Costos  |   | D              | D          | Menor a 500 dólares  |
| <b>Propone:</b> D=Diseño; C=Cliente<br><b>R/D:</b> R=Requerimiento; D=Deseo |   |                |            |  |

(Fuente propia)

## 2.3. Análisis funcional

Este método permite identificar las funciones principales y las funciones secundarias de la mordaza a diseñar. Las funciones primarias son aquellas por las que el cliente compra el

producto. Las funciones secundarias son aquellas que permiten que la función primaria se ejecute satisfactoriamente, y son las que mediante el presente análisis se determinarán.

- **Desarrollo de diagramas funcionales**

Para el desarrollo de los diagramas se toma en cuenta el funcionamiento del mecanismo y se detalla a continuación en 3 niveles.

El nivel 0 se compone de la función principal del mecanismo que es traccionar las probetas eliminando en lo posible las restricciones de esfuerzo cortante y momento flector en cada extremo debido a la orientación de las fibras del material que va a ser ensayado.

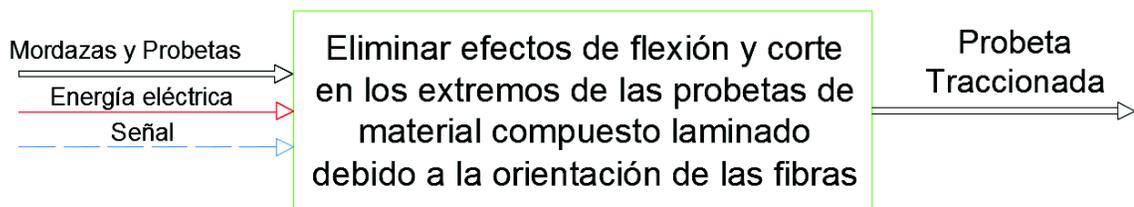


Figura 2.1 Diagrama funcional nivel 0.

(Fuente propia)

En el nivel 1 del diagrama funcional se establecen los módulos en los cuales se divide la función principal del mecanismo.



Figura 2.2. Diagrama funcional nivel 1.

(Fuente propia)

En el nivel 2 del diagrama funcional se desglosa de manera más detallada el diagrama del nivel 1 en sub funciones.

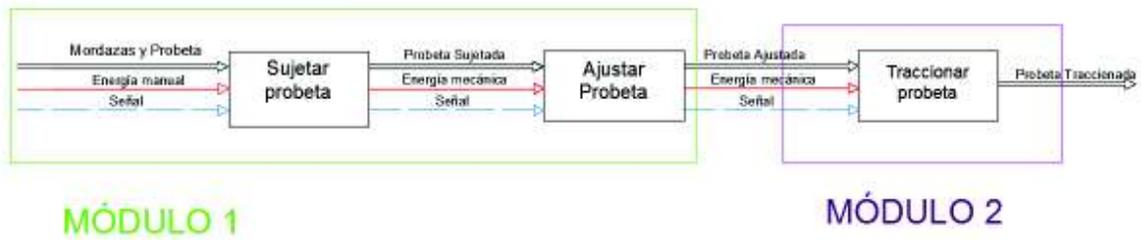


Figura 2.3. Diagrama funcional nivel 2.

(Fuente propia)

## 2.4. Soluciones para cada módulo

### 2.4.1. Módulo 1 - sujetar probeta.

- **Funciones**

Sujetar la probeta impidiendo deslizamiento mientras se somete a tracción a la misma.

**Mordaza tipo cuña.**



Figura 2.4. Mordaza tipo cuña.

(Fuente propia)

**VENTAJAS:**

- El ajuste es aumenta conforme aumenta la fuerza detracción en la probeta.
- Permite una sujeción simétrica
- Ejerce una presión superficial pequeña sobre la probeta.

**DESVENTAJAS:**

- Se necesita gran cantidad de material para construirlas
- Son pesadas

## Mordaza con tornillo.

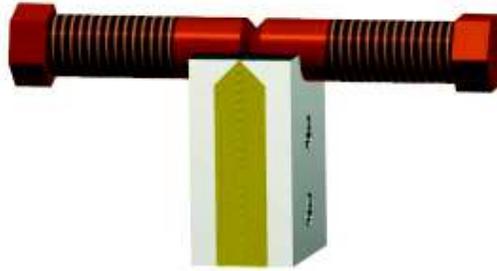


Figura 2.5. Mordaza con tornillo.

(Fuente propia)

### VENTAJAS:

- La manipulación de estas mordazas es muy sencilla.
- Se puede realizar ensayos en probetas de forma asimétrica.
- Sirven para realizar ensayos a varios tipos de materiales.

### DESVENTAJAS:

- La fuerza de sujeción a la probeta se debe aplicar de forma manual.
- Si la probeta comienza a deslizar se debe continuar apretando el par del tornillo.
- Soportan fuerzas de ensayo pequeñas.

## 2.4.2. Módulo 2 - traccionar la probeta.

### • Funciones

Evitar que la probeta se deforme como se mostró en la figura 1.10 mientras está sometida a tracción debido a la existencia de esfuerzo cortante y momento flector en sus extremos.

### **Mordazas rectangulares sin rotación.**



Figura 2.6. Mordaza rectangular sin rotación.

(Fuente propia)

#### **DESVENTAJAS:**

- Establece restricciones en los extremos de momento flector y esfuerzos cortantes.
- Los esfuerzos se producen fuera del eje de ortotropía deseado

### **Mordazas oblicuas sin rotación.**

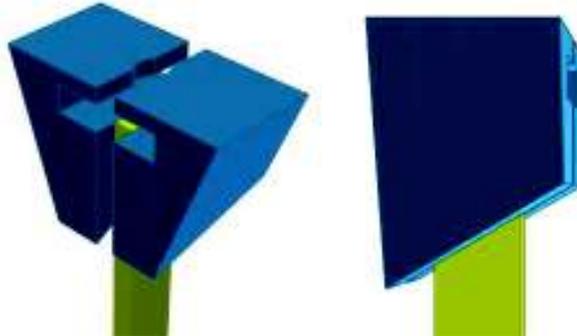


Figura 2.7. Mordaza oblicua sin rotación.

(Fuente propia)

#### **VENTAJAS:**

- Permite una mejor distribución de esfuerzos a lo largo de la probeta con orientación de la fibra.

#### DESVENTAJAS:

- Se debe fabricar 2 pares de mordazas para cada ángulo al cual se haga el ensayo.
- El efecto cuña disminuye y el agarre no es simétrico en la probeta

#### **Mordaza rectangular con rotación.**

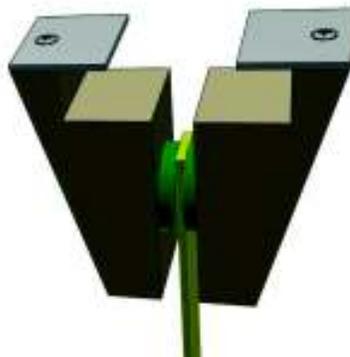


Figura 2.8. Mordaza rectangular con rotación.

(Fuente propia)

#### VENTAJAS:

- Permite una mejor distribución de esfuerzos a lo largo de la probeta con orientación de la fibra.
- Evita restricciones en los extremos

#### DESVENTAJAS:

- Se requieren más elementos para su funcionamiento como rodamientos
- Más costosa

## **2.5. Alternativas a los módulos**

Las alternativas se obtendrán al relacionar las diferentes soluciones propuestas anteriormente a los módulos, esto se puede observar en el siguiente diagrama:

Tabla 2.2. Alternativas a los módulos.

| FUNCIÓN   | COMPONENTES         |                      |                                  |
|---|---------------------|----------------------|----------------------------------|
| Sujetar Probeta   | Mordaza cuña        | Mordaza con tornillo |                                  |
|   |                     |                      |                                  |
| Traccionar probeta  | Mordaza Rectangular | Mordaza Oblicua      | Mordaza Rectangular con rotación |
| <p> <span style="color: green;">■</span> Alternativa 1: Mordaza rectangular tipo cuña<br/> <span style="color: blue;">■</span> Alternativa 2: Mordaza oblicua con tornillo<br/> <span style="color: red;">■</span> Alternativa 3: Mordaza rectangular tipo cuña con rotación         </p> |                     |                      |                                  |

(Fuente propia)

## 2.6. Evaluación de alternativas

Para seleccionar la mejor alternativa se utilizará la evaluación con el método ordinal corregido de criterios ponderados cuyos criterios más relevantes son los siguientes.

- Sujeción: Indica que tan bien puede sujetar un elemento sin que se produzca deslizamiento.
- Construcción: Indica que tan sencillo o complejo resulta la elaboración del elemento o mecanismo.
- Resistencia: Indica la capacidad del mecanismo para resistir fuerzas aplicadas al mismo sin romperse.
- Funcionamiento: Indica el comportamiento del elemento o mecanismo que uno espera para realizar una tarea de manera efectiva.

Todos estos criterios se evalúan y sus resultados se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Evaluación de criterios.

| Criterio       | Sujeción | Construcción | Resistencia | Funcionamiento | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|----------------|----------|--------------|-------------|----------------|------------|-------------|
| Sujeción       |          | 1            | 0,5         | 0,5            | 3          | 0,33        |
| Construcción   | 0        |              | 0           | 0              | 1          | 0,11        |
| Resistencia    | 0,5      | 1            |             | 0              | 1,5        | 0,17        |
| Funcionamiento | 0,5      | 1            | 1           |                | 3,5        | 0,39        |
|                |          |              |             | Suma           | 9          | 1           |

(Fuente propia)

Funcionamiento > Sujeción > Resistencia > Construcción

A continuación se realiza la evaluación de los pesos específicos de las Alternativas para cada criterio en las siguientes tablas que se muestran a continuación.

Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio sujeción.

| Sujeción      | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 |               | 1             | 0,5           | 2,5        | 0,42        |
| Alternativa 2 | 0             |               | 0             | 1          | 0,17        |
| Alternativa 3 | 0,5           | 1             |               | 2,5        | 0,42        |
|               |               |               | Suma          | 6          | 1,00        |

(Fuente propia)

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio construcción.

| Construcción  | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 |               | 1             | 0,5           | 2,5        | 0,45        |
| Alternativa 2 | 0             |               | 0,5           | 1,5        | 0,27        |
| Alternativa 3 | 0             | 0,5           |               | 1,5        | 0,27        |
|               |               |               | Suma          | 5,5        | 1,00        |

(Fuente propia)

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 2.6. Evaluación del peso específico del criterio resistencia.

| Resistencia   | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\Sigma+1$ | Ponderación |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-------------|
| Alternativa 1 |               | 1             | 0,5           | 2,5        | 0,42        |
| Alternativa 2 | 0             |               | 0             | 1          | 0,17        |
| Alternativa 3 | 0,5           | 1             |               | 2,5        | 0,42        |
|               |               |               | Suma          | 6          | 1,00        |

(Fuente propia)

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 2.7. Evaluación del peso específico del criterio funcionamiento.

| Funcionamiento | Alternativa 1 | Alternativa 2 | Alternativa 3 | $\sum+1$ | Ponderación |
|----------------|---------------|---------------|---------------|----------|-------------|
| Alternativa 1  |               | 0             | 0             | 1        | 0,17        |
| Alternativa 2  | 1             |               | 0             | 2        | 0,33        |
| Alternativa 3  | 1             | 1             |               | 3        | 0,50        |
|                |               |               | Suma          | 6        | 1,00        |

(Fuente propia)

Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1

A continuación la tabla 2.8 muestra las conclusiones a las evaluaciones realizadas en las tablas anteriores.

Tabla 2.8. Conclusiones de la evaluación de alternativas.

| Conclusión    | Sujeción | Construcción | Resistencia | Funcionamiento | $\Sigma$ | Prioridad |
|---------------|----------|--------------|-------------|----------------|----------|-----------|
| Alternativa 1 | 0,1375   | 0,0500       | 0,0283      | 0,0663         | 0,2821   | 2         |
| Alternativa 2 | 0,0550   | 0,0300       | 0,0567      | 0,1287         | 0,2704   | 3         |
| Alternativa 3 | 0,1375   | 0,0300       | 0,0850      | 0,1950         | 0,4475   | 1         |

(Fuente propia)

La alternativa 3, es decir la mordaza cuadrada tipo cuña con rotación es la mejor situada y contempla ser la mejor solución, un esquema de la misma se muestra a continuación en la figura 2.9.



Figura 2.9. Esquema de la solución final.

(Fuente propia)

## 2.7. Cálculo y selección de componentes

En esta sección se realiza el diseño final incluyendo cálculos de componentes para así asegurar su correcto funcionamiento y confiabilidad.

La consideración principal es el acoplamiento que deberán tener las mordazas en el cabezal, para lo cual se deben considerar el espacio interior del mismo y las dimensiones de las mordazas ya existentes en el laboratorio.

Durante el ensayo al traccionar la probeta se tiene un diagrama de cuerpo libre que se muestra en la figura 2.10.

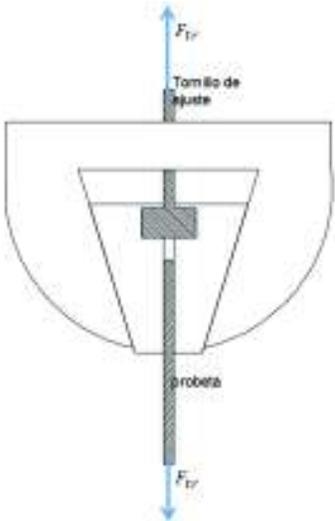


Figura 2.10. Fuerzas presentes durante ensayo de tracción.  
(Fuente propia)

Existen varios elementos que deben interactuar para soportar la Fuerza  $F_{tr}$  cada mordaza tiene reacciones como se muestran en la figura 2.11.

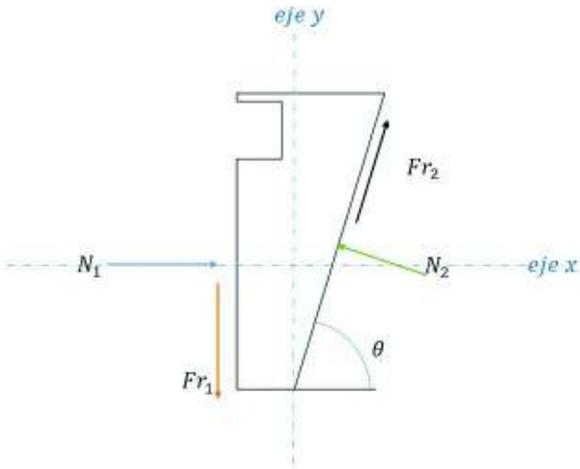


Figura 2.11. Diagrama de cuerpo libre de mordaza.  
(Fuente propia)

Donde:

$N_1$  : Es la normal que ejerce la probeta sobre la mordaza

$Fr_1$  : Es la fuerza de rozamiento entre la probeta y la mordaza

$N_2$  : Es la fuerza normal ejercida por el cabezal sobre la mordaza

$Fr_2$  : Es la fuerza de rozamiento entre el cabezal y la mordaza

La fuerza  $Fr_1$  que es igual a la mitad de la fuerza de tracción  $F_{tr}$  que se muestra en la figura 2-13 debido a que se reparte entre las 2 mordazas.

$$Fr_1 = \frac{F_{tr}}{2} = 1250 \text{ N} \quad (2.1)$$

Se asume una fuerza máxima de tracción de 2500 N para el ensayo tomando en la siguiente consideración:

- La resistencia de tracción que posee una probeta de material compuesto con fibra de carbono, cuyo valor máximo es de 67 MPa aproximadamente para una probeta de sección transversal de dimensiones 1,8 mm por 20 mm, con orientación de la fibra de 15 °, de donde la fuerza resultante es igual a 2,4 kN. (Xiao, Kawai, & Hatta, 2010)

Con las consideración anterior se continúa con el sumatorio de Fuerzas en el *eje x* de donde se obtiene que.

$$N_1 - N_2 * \text{Sen}(\theta) + Fr_2 * \text{Cos}(\theta) = 0 \quad (2.2)$$

Y en el *eje y* de donde se obtiene lo siguiente.

$$N_2 * \text{Cos}(\theta) + Fr_2 * \text{Sen}(\theta) - Fr_1 = 0 \quad (2.3)$$

Se sabe que:

$$Fr_1 = \mu_1 * N_1 \quad (2.4)$$

$$Fr_2 = \mu_2 * N_2 \quad (2.5)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.4 y 2.5 en la ecuación 2.2 se obtiene.

$$N_2 = \frac{Fr_1}{\cos(\theta) + \mu_2 \text{Sen}(\theta)} \quad (2.6)$$

El valor de  $Fr_1$  se calculó en la ecuación 2.1 y se asume un coeficiente de fricción  $\mu_2$  de 0,78 para acero vs acero y para  $\mu_1$  que es la probeta vs acero un valor intermedio entre 0,2-0,6 es decir 0,4 que es el valor de coeficiente de rozamiento para la madera vs acero. (Handbook, 2006)

El ángulo  $\theta$  depende de la geometría de la mordaza. Se ha tomado las medidas de la mordaza existente en laboratorio que servirá como referencia para la construcción de la nueva mordaza para ensayo off axis, las dimensiones se muestran en la figura 2.12.

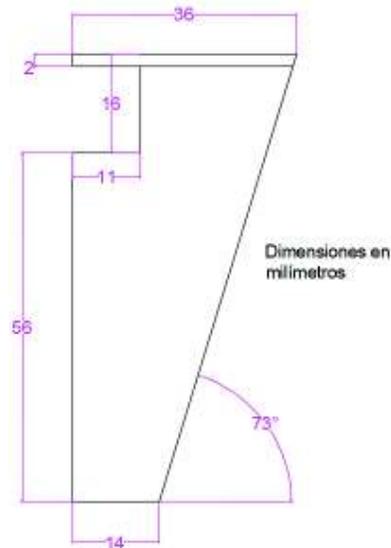


Figura 2.12. Dimensiones de la mordaza existente en laboratorio.

(Fuente propia)

El valor de la Normal  $N_1$  es entonces:

$$N_1 = \frac{Fr_1}{\mu_1} = 3125 \text{ N} \quad (2.7)$$

El valor de  $N_2$  es:

$$N_2 = 1204 \text{ N}$$

- **Diseño del eje de sujeción de la probeta**

Uno de los elementos críticos del mecanismo es el eje que sujeta la probeta al momento del ensayo cuyo modelo se muestra en la figura 2.13.



Figura 2.13. Modelo del eje de sujeción de la probeta.  
(Fuente propia)

El eje tiene una longitud total de 23 mm y está hecho de material acero AISI 1018. Dicho eje está sometido a la fuerza  $F_{tr}$  que se muestra en la figura 2.10 y está soportado por un rodamiento radial y uno de empuje. Las propiedades del material son:

$Densidad = 7.87 \text{ g/cm}^3$  ;  $Módulo \text{ de elasticidad} = 205 \text{ GPa}$

$S_y = 373 \text{ MPa}$  ;  $S_{ult} = 441 \text{ MPa}$ ;

- **Cálculo del eje de sujeción**

El diagrama de cuerpo libre para el eje en cuestión se muestra en la figura 2.14.

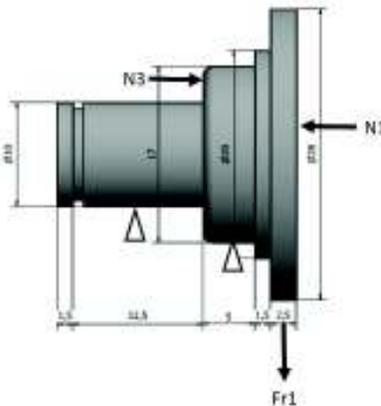


Figura 2.14. Diagrama de cuerpo libre eje de sujeción.  
(Fuente Propia)

En la sección anterior se calculó la magnitud de la fuerza  $F_{r1}$  que es de 1250 N, con este valor se procede a realizar los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector que se muestran en la figura 2.15.

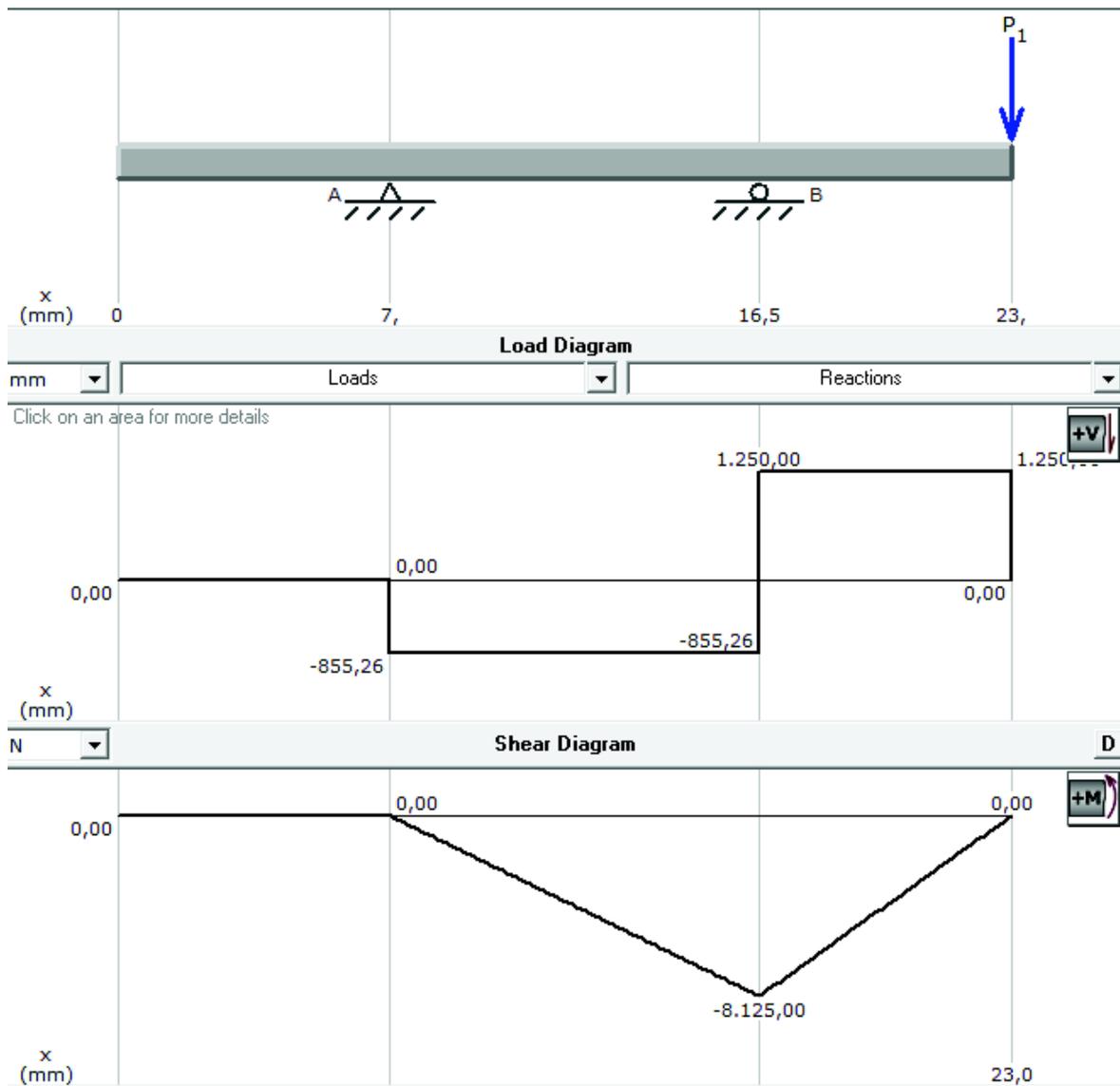


Figura 2.15. Esfuerzo cortante y momento flector para eje de sujeción.  
(Fuente propia)

Utilizando la teoría de falla de Von Mises se tiene que:

$$S_{sy} = 0,577S_y \tag{2.8}$$

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau_{max}} \tag{2.9}$$

$$\tau_{max} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (2.10)$$

Teniendo en cuenta de la figura 2.15 los valores de M y T máximos son 8,12 N-m y 0 se tiene que:

$$\tau_{max} = 1,88 \text{ MPa}$$

$$Ssy = 215,22 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{Ssy}{\tau_{max}} = 114$$

Se tiene que el factor de seguridad es muy alto por lo tanto el eje soporta las cargas.

Para determinar el comportamiento del eje en la dirección axial se realiza la simulación del mismo considerando a las fuerzas N1 y N3 como fuerzas de presión distribuidas a lo largo de la sección circular donde está apoyada la probeta para el caso de la fuerza N1 y el cojinete de empuje para el caso de la fuerza N3.

Al hacer el sumatorio de fuerzas del eje se obtiene que  $N1=N3=3125 \text{ N}$ , la presión que produce la Fuerza N1 es entonces.

$$P = 5,075 \text{ MPa}$$

En la figura 2.16 se muestra las restricciones y la presión aplicada al eje. Se considera también las cargas en la dirección radial es decir las cargas de la figura 2.14 para obtener un resultado más exacto del comportamiento del eje.

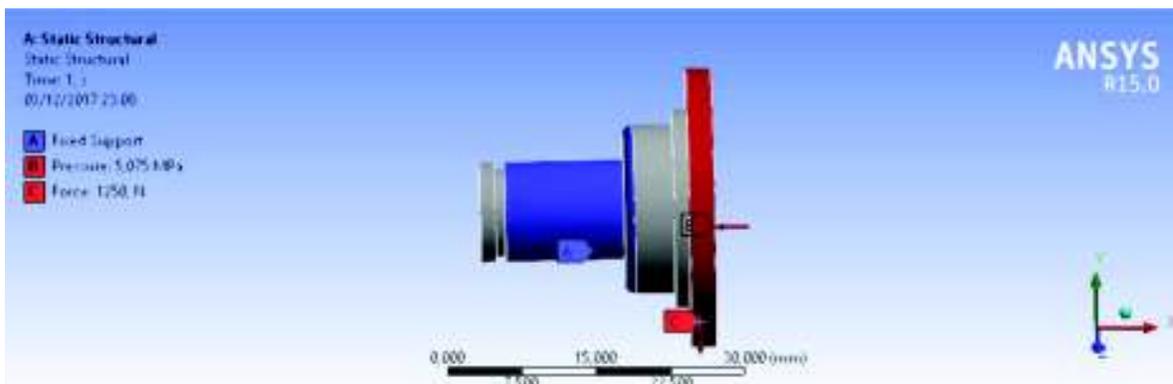


Figura 2.16. Restricciones y cargas aplicadas al eje de sujeción.

(Fuente propia)

Los esfuerzos de Von Mises se muestran en la figura 2.17 llegando a su valor máximo en donde cambia el diámetro de la sección que es igual a 50,6 MPa.

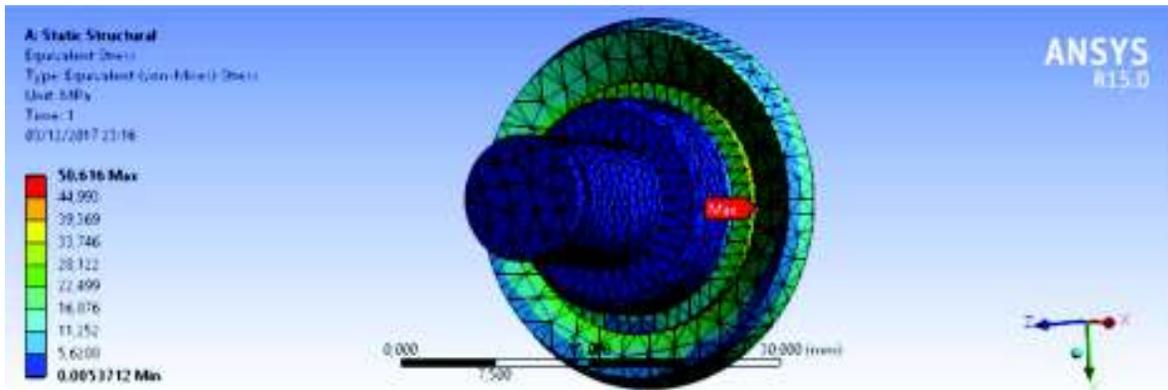


Figura 2.17. Esfuerzos de Von Mises en el eje de sujeción.  
(Fuente propia)

A continuación en la figura 2.18 se muestra la deformación cuyo valor máximo es de 0,0028 mm y su factor de seguridad cuyo valor mínimo es de 4,9.

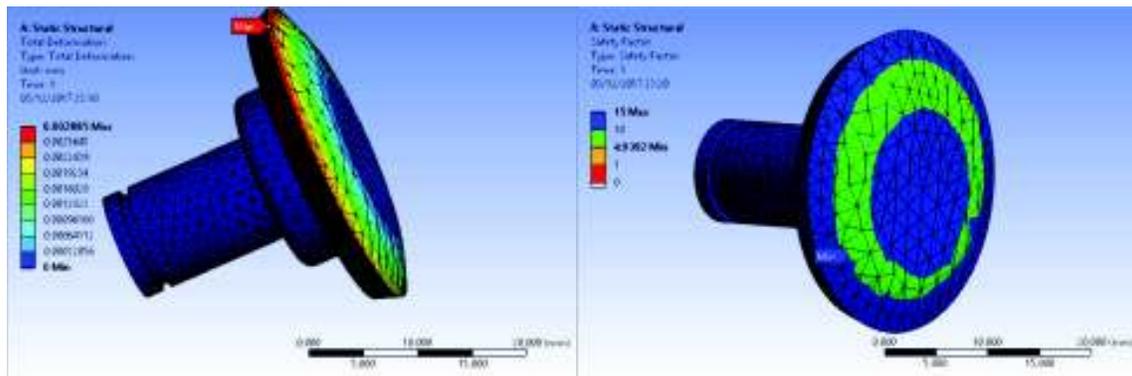


Figura 2.18. Deformación y factor de seguridad para eje de sujeción.  
(Fuente propia)

- **Selección de rodamientos**
  - **Rodamiento axial:**

Tomando en cuenta la fuerza la fuerza  $N_1$  de la figura 2.11 cuyo valor es igual a 3125 N,

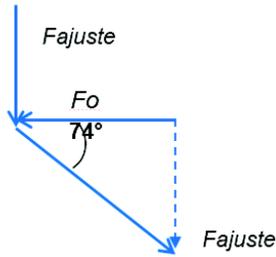


Figura 2.19. Fuerzas que actúan en el rodamiento axial.  
(Fuente propia)

$$\tan 74^\circ = \frac{F_a}{F_o}$$

$$F_o = 896,07 \text{ N}$$

La capacidad de carga del rodamiento axial se establece según la ecuación 2.11.

$$C_o = f_s \cdot F_o \quad (2.11)$$

$f_s$ : Coeficiente de esfuerzos estáticos; factor de seguridad

$f_s$ : 2 → tabla 11 pág. 93 catálogo SKF

$$C_o = 1,79 \text{ kN}$$

Debido al espacio de confinamiento y diseño se selecciona un rodamiento axial de bolas con  $d = 10 \text{ mm}$ , en el catálogo SKF se tiene el rodamiento serie 51100 cuyo valor de  $C_o$  es de  $15,3 \text{ kN}$  y soporta la carga.

- **Rodamiento radial de bolas**

Se considera carga de diseño =  $F$  tracción en sentido radial del rodamiento.

Se asume una Velocidad  $\approx 0,25 \text{ rpm}$  debido a que no va a estar girando constantemente.

Según SKF; clasifica a rodamientos como :  $L_{10} = 10^6 \text{ rpm}$

Vida deseada =  $7000 \text{ h}$

Con la ecuación 2.12 se establece la capacidad de carga del rodamiento radial.

$$C_{10} = FD \left( \frac{L_D n_D 60}{L_R n_R 60} \right)^{1/a} \quad (2.12)$$

$$L_{10} = 60 L_R n_R$$

$a = 3$ ; para rodamiento de bolas.

Reemplazando en la ecuación 2.12

$$C_{10} = 1,17 \text{ kN}$$

Catálogo SKF rodamiento 61803;  $d = 17\text{mm}$  y  $D = 26 \text{ m}$

$C_{10 \text{ max}}$  del rodamiento seleccionado = 1,27 kN. Cumple con los requerimientos.

- **Diseño del cuerpo de la mordaza**

Una de las partes de la mordaza que va a estar sometida a esfuerzos es el cuerpo donde van a estar alojados el eje sujeción de la probeta y los rodamientos tanto de empuje como radial, las dimensiones de este cuerpo deberán garantizar que pueda alojarse en el cabezal existente en el laboratorio y también que exista espacio suficiente para alojar a la probeta para realizar el ensayo de tracción oblicua. Las dimensiones se muestran en la figura 2.20, las mismas que se han determinado en base a las dimensiones de las mordazas comunes utilizadas en la máquina universal.

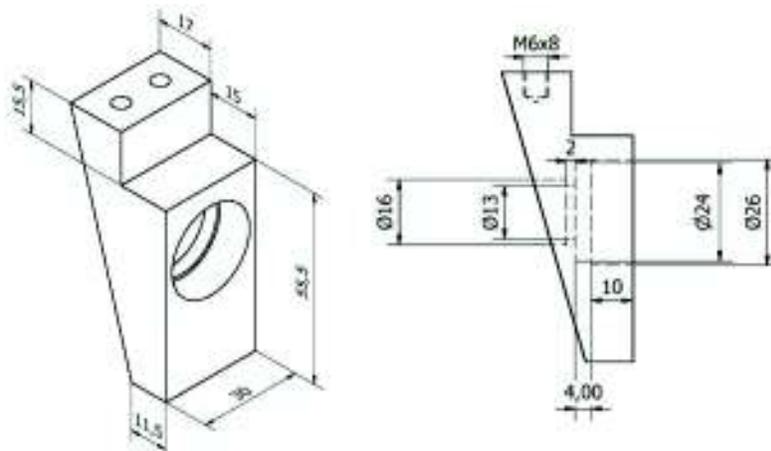


Figura 2.20. Esquema y dimensiones del cuerpo de la mordaza.

(Fuente propia)

- **Cálculo del cuerpo de la mordaza**

Como se observa en la figura 2.20 se está al frente de un elemento sólido tridimensional por lo tanto para calcularlo se debe utilizar un método de elementos finitos, se utilizará el software ANSYS 16.0 tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- El material es un acero K100 (AISI D o SAE D3) cuyos valores de resistencia son:  $S_y = 2200 \text{ MPa}$ ; (aceroscol, 2015)
- Las propiedades del material son las siguientes: módulo de elasticidad = 210 GPa; coeficiente de Poisson = 0,3. (Charro & Eugenio, 2014)
- Se realiza una restricción de desplazamiento en la cara trasera inclinada del elemento como se observa en la figura 2.21.

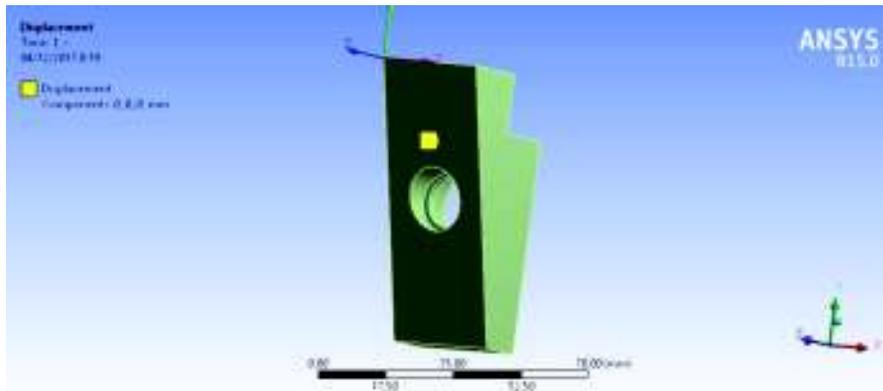


Figura 2.21. Restricción asignada a cuerpo de la mordaza.

(Fuente propia)

- Existirá una presión que ejerce el rodamiento de empuje sobre el área donde va asentado la misma que es igual a

$$Pr \approx 3 \text{ MPa}$$

Como se muestra en la figura 2.22. Además se agrega la fuerza  $F_{r1}$  que actúa sobre el eje de sujeción y se transmite en una de las superficies del cuerpo de la mordaza.

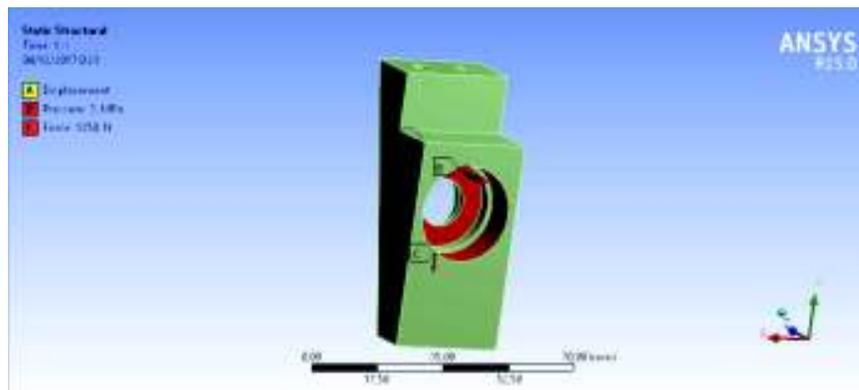


Figura 2.22. Cargas asignadas a cuerpo de la mordaza.

(Fuente propia)

La distribución de esfuerzos máximos de Von-Mises se muestra en la figura 2.23 siendo el máximo igual a 9,38 MPa, presente en la superficie del asentamiento del rodamiento radial.

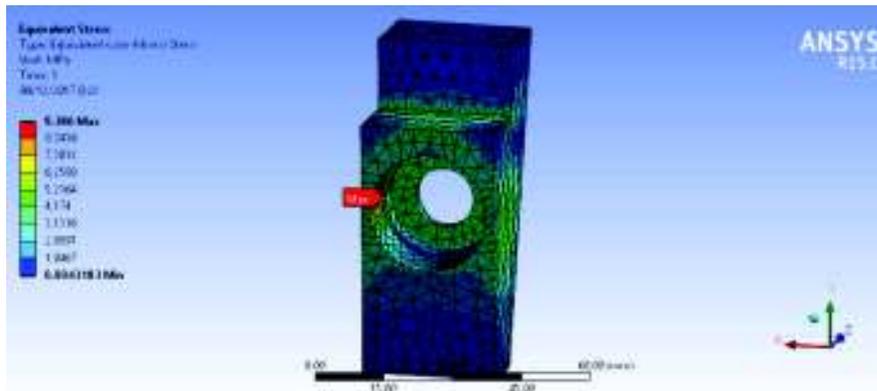


Figura 2.23. Distribución de esfuerzos de Von-Mises para cuerpo de mordaza.  
(Fuente propia)

Las deformaciones generadas se muestran en la figura 2.24 donde se observa que el valor máximo corresponde a 0,0010 milímetros, que representa un valor despreciable.

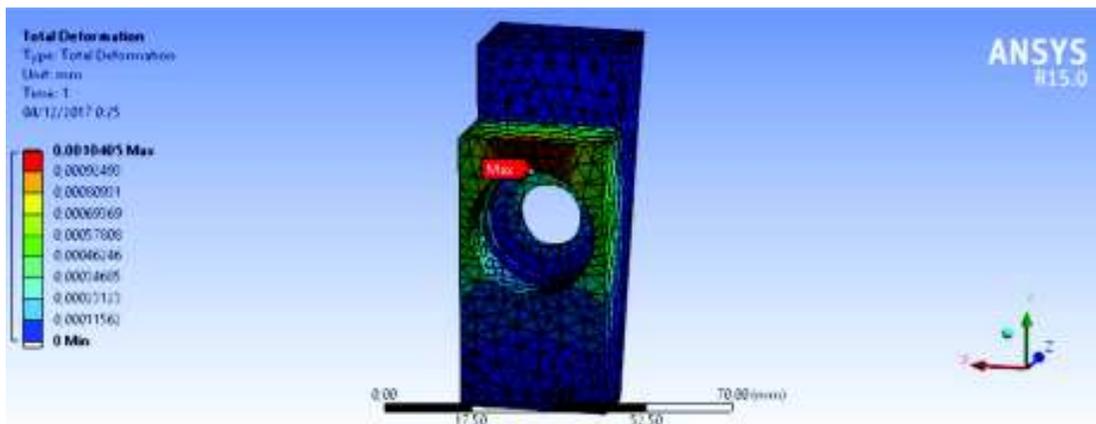


Figura 2.24. Deformaciones en cuerpo de la mordaza.  
(Fuente propia)

Por último se presenta la distribución del factor de seguridad para todo el elemento en la figura 2.25 cuyo valor es de para todo el elemento con lo cual se considera que el elemento no va a fallar.

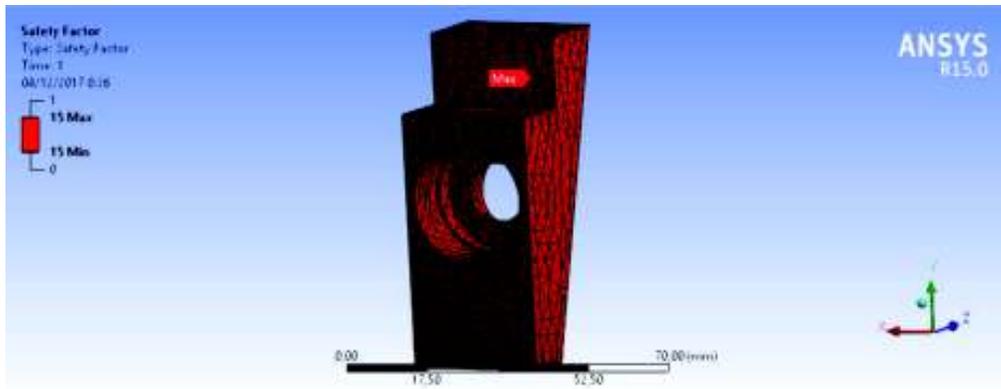


Figura 2.25. Factor de seguridad para el cuerpo de la mordaza.  
(Fuente propia)

## 2.8. Simulación del funcionamiento de las mordazas

En esta sección se pretende simular el comportamiento de las mordazas que se van a construir y el efecto en la probeta para validar su correcto funcionamiento. El análisis se realiza en el software ANSYS 15.0 con la ayuda del módulo ACP que permite la simulación de materiales compuestos laminados.

Utilizando el módulo ACP se define el material que se va a usar que es un laminado con refuerzo de fibra de cabuya cuyas propiedades son:

$$\text{Densidad} = 1.3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad \text{Módulo de Young} = 7,5 \times 10^9 \text{ Pa}; \quad \text{Coeficiente de Poisson} = 0.27$$

Y las propiedades de la resina son los valores tomados de la tabla 1.1.

A continuación se muestra los resultados de la simulación, utilizando las mordazas a ser construidas.

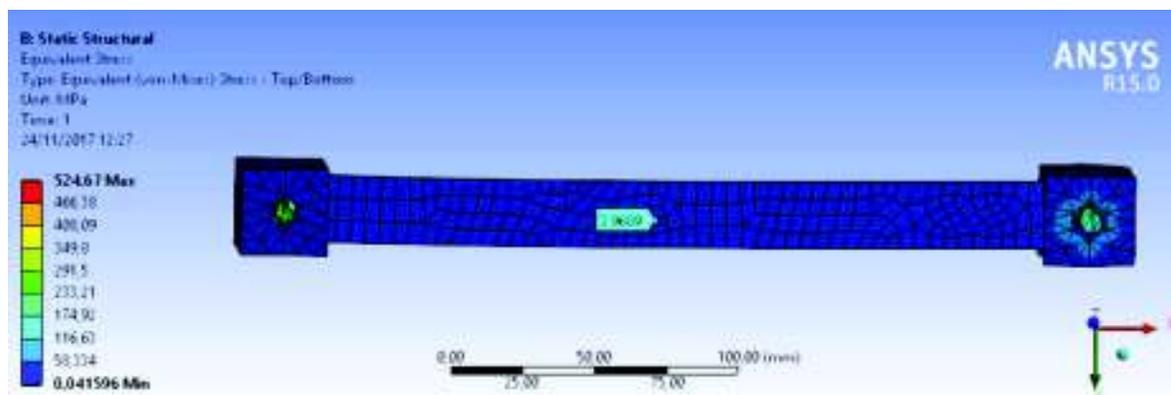


Figura 2.26. Resultados de esfuerzo utilizando mordazas off axis.

(Fuente Propia)

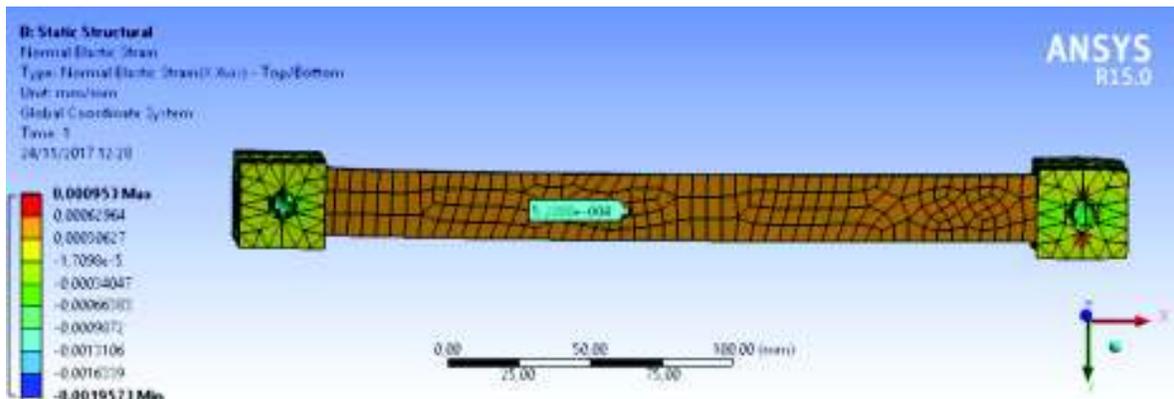


Figura 2.27. Deformación en eje normal utilizando mordazas off axis.

(Fuente propia)

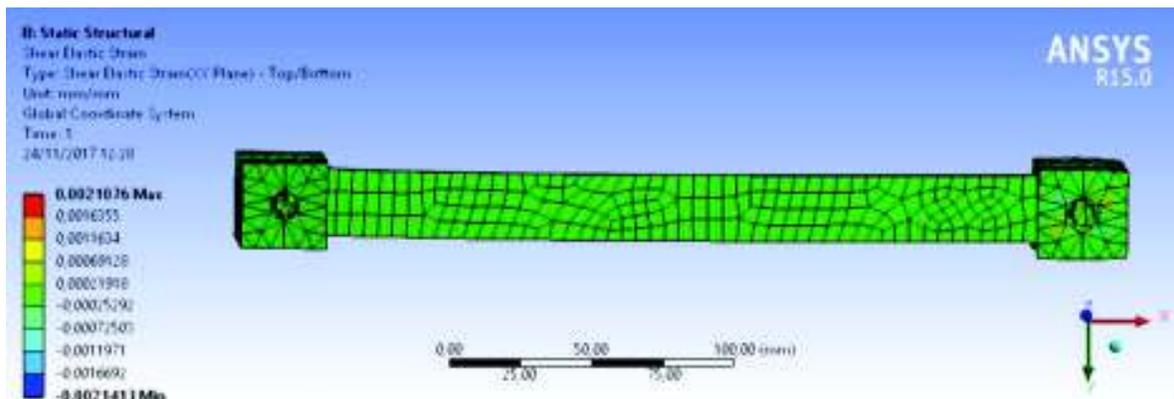


Figura 2.28. Deformación en eje y utilizando mordazas off axis.

(Fuente propia)

Como se observa en la simulación resulta factible la construcción de las mordazas, más adelante se realizará las pruebas funcionales con las mismas para validar los datos obtenidos en la simulación.

## 2.9. Análisis de costos

Una vez que ya se han conseguido evaluar y determinar los elementos exactos de la mordaza se necesita realizar un estudio de costos para su posterior fabricación, estos costos se han dividido en: costos de elementos normalizados, costos de mano de obra y costos de material.

- **Costo de elementos normalizados**

Los costos de elementos normalizados se muestran en la tabla 2.9.

Tabla 2.9. Costos de elementos normalizados.

| ELEMENTOS         | ESPECIFICACIONES | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (\$/U) | PRECIO TOTAL (\$) |
|-------------------|------------------|----------|------------------------|-------------------|
| Pernos            | M6x8             | 8        | 0,05                   | 0,40              |
| Arandelas presión | M6               | 8        | 0,07                   | 0,56              |
| Arandelas planas  | Ø10              | 4        | 0,85                   | 3,40              |
| Anillos de eje    | Ø10 DIN 471      | 4        | 0,95                   | 3,80              |
| <b>TOTAL</b>      |                  |          |                        | <b>8,16</b>       |

(Fuente propia)

- **Costos de mano de obra**

Los costos de mano de obra han sido cotizados en la metalmecánica de San Bartolo y se muestran en la tabla 2.10.

Tabla 2.10. Costos de mano de obra.

| Máquina        | Cantidad | Torno       |            | Taladrado   |              | Fresado   |            | Soldadura   |             | Corte       |              | Operario general |           | Total         |
|----------------|----------|-------------|------------|-------------|--------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------------|-----------|---------------|
| Costo HHM      |          | 12          |            | 4           |              | 8         |            | 12          |             | 5           |              | 4                |           |               |
| Pieza          |          | Cant.       | (USD)      | Cant.       | (USD)        | Cant.     | (USD)      | Cant.       | (USD)       | Cant.       | (USD)        | Cant.            | (USD)     | (USD)         |
| Eje            | 4        | 8           | 96         | 0           | 0            | 0         | 0          | 0           | 0           | 0,5         | 2,5          | 1                | 4         | 102,50        |
| Cuña           | 4        | 4,5         | 54         | 0,8         | 3,2          | 13        | 104        | 0           | 0           | 1,5         | 7,5          | 3                | 12        | 180,70        |
| Molde acero    | 1        | 0           | 0          | 0           | 0            | 0         | 0          | 0,6         | 7,2         | 1           | 5            | 0,5              | 2         | 14,20         |
| Placas Soporte | 4        | 0           | 0          | 2           | 8            | 0         | 0          | 0           | 0           | 0,7         | 3,5          | 0,5              | 2         | 13,50         |
| <b>Total</b>   |          | <b>12,5</b> | <b>150</b> | <b>2,80</b> | <b>11,20</b> | <b>13</b> | <b>104</b> | <b>0,60</b> | <b>7,20</b> | <b>3,70</b> | <b>18,50</b> | <b>5</b>         | <b>20</b> | <b>310,90</b> |

(Fuente propia)

- **Costos de materiales**

Lo costos de materiales se han cotizado en diferentes ferreterías y se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11. Costos de materiales.

| Pieza          | Eje AISI 1040<br>Ø 1 1/8"<br>(\$/kg) |           | Barra<br>cuadrada<br>acero K100,<br>7" (\$/kg) |            | Plancha<br>acero A 36,<br>50x50 (\$/m) |           | Plancha A<br>36, t=3 mm<br>(\$/kg) |             | Electrodo E-<br>6011- 1/8<br>(\$/kg) |             |            |
|----------------|--------------------------------------|-----------|--|------------|--|-----------|------------------------------------|-------------|--------------------------------------|-------------|------------|
| Costo unitario | 4                                    |           | 10   |            | 4,5                                    |           | 2,5                                |             | 2,5                                  |             | Total      |
|                | Cant.                                | (USD)     | Cant.  | (USD)      | Cant.                                  | (USD)     | Cant.                              | (USD)       | Cant.                                | (USD)       | (USD)      |
| Eje            | 5                                    | 20        | 0  | 0          | 0                                      | 0         | 0                                  | 0           | 0                                    | 0           | 20         |
| Cuña           | 0                                    | 0         | 16   | 160        | 0                                      | 0         | 0                                  | 0           | 0                                    | 0           | 160        |
| Molde acero    | 0                                    | 0         | 0  | 0          | 10                                     | 45        | 0                                  | 0           | 0,2                                  | 0,5         | 45,50      |
| Placas soporte | 0                                    | 0         |  | 0          |  | 0         | 1                                  | 2,5         | 0                                    | 0           | 2,50       |
| <b>Total</b>   | <b>5</b>                             | <b>20</b> | <b>25</b>                                      | <b>160</b> | <b>10</b>                              | <b>45</b> | <b>1</b>                           | <b>2,50</b> | <b>0,20</b>                          | <b>0,50</b> | <b>228</b> |

(Fuente propia)

### • Costos totales de fabricación

Los costos totales de fabricación se muestran en la tabla 2.12 y son la suma de los costos de materiales, mano de obra y elementos normalizados.

Tabla 2.12. Costos totales de fabricación.

| RUBRO                  | VALOR (\$)     |
|------------------------|----------------|
| MATERIALES             | 228            |
| MANO DE OBRA           | 310,90         |
| ELEMENTOS NORMALIZADOS | 8,16           |
| SUBTOTAL 1             | 547,06         |
| IPREVISTOS (10%)       | 54,706         |
| <b>TOTAL</b>           | <b>601,766</b> |

(Fuente propia)

## 2.10. Protocolo de pruebas

Con el fin de verificar la funcionalidad de las mordazas para el ensayo de tracción oblicua, se debe establecer un protocolo de pruebas que servirá para que una vez construidas se garantice que cumplen su función correctamente. El formato deberá contar con pruebas básicas que sean medibles en base a parámetros.

En esta sección establecerán una serie de procedimientos que deben ser cumplidos por el mecanismo fabricado posterior a su construcción.

- **Verificación de montaje**

Objetivo: verificar que los elementos estén correctamente ensamblados.

Responsable: operario.

Actividades:

Verificar que las placas superiores de las mordazas estén bien ajustadas por los dos tornillos.

Comprobar que la superficie circular que sujetará las probetas gire con facilidad.

Verificar por la parte trasera del eje de sujeción que este asegurado con las arandelas de seguridad.

- **Verificación de acoplamiento a cabezal de la máquina universal**

Objetivo: verificar que las mordazas se acoplan correctamente dentro del cabezal de la máquina universal de ensayos.

Responsable: operario.

Actividades:

Girar los tornillos que sujetan las mordazas dentro del cabezal para permitir el ingreso de las mordazas para ensayo off-axis.

Insertar una de la mordaza tratando que la placa superior de la misma se aloje en el pistón del interior del cabezal, y que el canal que posee en una de sus caras se aloje correctamente.

Insertar la otra mordaza en el cabezal como se hizo con la primera y verificar las distancias mínimas y máximas entre las superficies circulares que sostendrán la probeta.

Verificar paralelismo entre la cara inclinada de cada mordaza con la cara inclinada del cabezal.

Verificar paralelismo entre caras circulares que sujetarán la probeta.

- **Pruebas de sujeción**

Objetivo: verificar que las mordazas sujetan correctamente la probeta sin producir restricciones indeseadas o deslizamiento.

Responsable: operario.

Actividades:

Encender la máquina universal de ensayos.

Acercar los cabezales el uno respecto al otro lo suficiente para que pueda ser insertada una probeta para ensayo de tracción.

Insertar en un extremo una probeta dentro de las mordazas de uno de los cabezales.

Ajustar el pistón utilizando el tornillo de ajuste del cabezal hasta que el extremo de la probeta quede bien sujeto.

Comprobar que la probeta puede girar con facilidad respecto al eje axial del eje de sujeción de la mordaza.

Insertar el otro extremo de la probeta dentro del otro cabezal y ajustar con el pistón y tornillo de ajuste hasta que este extremo quede bien sujeto.

- **Pruebas de tracción.**

Objetivo: verificar el funcionamiento de las mordazas en probetas de material compuesto con fibras alineadas a diferentes ángulos.

Responsable: operario.

Actividades:

Encender la máquina universal de ensayos.

Insertar una probeta de material compuesto con fibra unidireccional orientada a cierto ángulo.

Aplicar una velocidad de avance para traccionar la probeta.

Verificar que la probeta no deslice respecto a las mordazas.

Para verificar que se cumpla el protocolo de pruebas se realizarán las respectivas pruebas de campo en base al formato que se presenta en la tabla 2.13.

Tabla 2.13. Formato de protocolo de pruebas.

| <b>PROTOCOLO DE PRUEBAS</b>  |                |                  |
|--|----------------|------------------|
| <b>Mordazas de tracción oblicua off-axis para materiales compuestos con funcionalidad de acople a la máquina de laboratorio de esfuerzos de la FIM EPN</b> |                |                  |
| Empresa:   | Verificador:   |                  |
| Fecha:   | Página: 1 de 1 |                  |
| <b>Pruebas a realizar</b>  | <b>Cumple</b>  | <b>No cumple</b> |
| <b>Verificación de montaje</b>   |                |                  |
| Verificar que todos los elementos de la mordaza estén bien sujetos   |                |                  |
| Verificar que el eje que sujetará la probeta gire con facilidad  |                |                  |
| <b>Verificación de acoplamiento</b>  |                |                  |
| Verificar que las mordazas calcen dentro del cabezal.  |                |                  |
| Verificar paralelismo entre las caras que sujetarán la probeta   |                |                  |
| Verificar paralelismo entre las caras inclinadas del cabezal y de las mordazas   |                |                  |
| <b>Pruebas de sujeción</b>   |                |                  |
| Verificar que las mordazas sujeten firmemente un extremo de la probeta   |                |                  |
| Verificar que el otro extremo de la probeta gire con facilidad respecto al extremo que está sujeto.  |                |                  |
| Verificar que ambos extremos de la probeta estén sujetos firmemente  |                |                  |
| <b>Pruebas de tracción</b>   |                |                  |
| Verificar que la probeta no deslice dentro de las mordazas   |                |                  |
| Verificar que la probeta falle dentro de la zona permitida   |                |                  |
| <b>NOTAS:</b>  |                |                  |

(Fuente propia)

## 2.11. Construcción de las mordazas

En el ANEXO D se detallan los respectivos planos de cada uno de los elementos construidos. Para mencionada construcción se plantea varios procesos de producción como las principales: torneado y fresado; además de las herramientas utilizadas como fresa de vástago, machuelos, cuchillas de desbaste entre otras

- **Máquinas y herramientas**

En la tabla 2.14, tabla 2.15 y tabla 2.16 se detallan las descripciones de las herramientas utilizadas como las máquinas y los instrumentos de medición, para la construcción de las mordazas para ensayo de tracción oblicua (off-axis) para materiales compuestos.

Tabla 2.14. Herramientas usadas para construcción de mordazas.

| DESIGNACIÓN | HERRAMIENTA             |
|-------------|-------------------------|
| <b>H</b>    | Hoja de sierra de corte |
|             | Brocas                  |
|             | Lima                    |
|             | Cuchilla de desbaste    |
|             | Machuelo                |
|             | Fresa de vástago        |

(Fuente propia)

Tabla 2.15. Máquinas usadas para construcción de mordazas.

| DESIGNACIÓN | MÁQUINA               |
|-------------|-----------------------|
| <b>M1</b>   | Torno                 |
| <b>M2</b>   | Fresadora             |
| <b>M3</b>   | Sierra semiautomática |
| <b>M4</b>   | Cepilladora           |
| <b>M5</b>   | Taladro Fijo          |
| <b>M6</b>   | Equipo de suelda TIG  |
| <b>M7</b>   | Esmeril               |

(Fuente propia)

Tabla 2.16 Instrumentos de medición usadas en construcción de mordazas.

| DESIGNACIÓN | INSTRUMENTO    |
|-------------|----------------|
| I           | Calibrador     |
|             | Flexómetro     |
|             | Reloj palpador |
|             | Nivel          |
|             | Escuadra       |
|             | Micrómetro     |

(Fuente propia)

### 2.11.1. Operaciones de construcción

Todas las operaciones que se mencionan en la tabla 2.17 fueron utilizadas para maquinar o construir los elementos del sistema de las mordazas para ensayo off-axis.

Tabla 2.17. Operaciones realizadas para construcción de mordazas.

| N° | Operación  |
|----|------------|
| 1  | Corte      |
| 2  | Cepillado  |
| 3  | Torneado   |
| 4  | Fresado    |
| 5  | Taladrado  |
| 6  | Esmerilado |
| 7  | Doblado    |
| 8  | Soldado    |
| 9  | Roscado    |

(Fuente propia)

### 2.11.2. Cursograma de construcción

Para mayor entendimiento del proceso de construcción de las mordazas para ensayo off-axis se realizará el cursograma de construcción del mismo, los símbolos que se van a utilizar se definen según la tabla 2.18

Tabla 2.18. Definición de símbolos a usarse en cursograma de construcción.

| SÍMBOLO        | DEFINICIÓN     |
|----------------|----------------|
| ○              | OPERACIÓN      |
| □              | INSPECCIÓN     |
| ▽              | TRASLADO       |
| ▽ <sub>F</sub> | FIN DE PROCESO |

(Fuente propia)

Una vez definidos los símbolos se procede a realizar el cursograma de construcción que incluye la construcción de un molde para fabricación de probetas. Este cursograma se muestra en la figura 2.29.

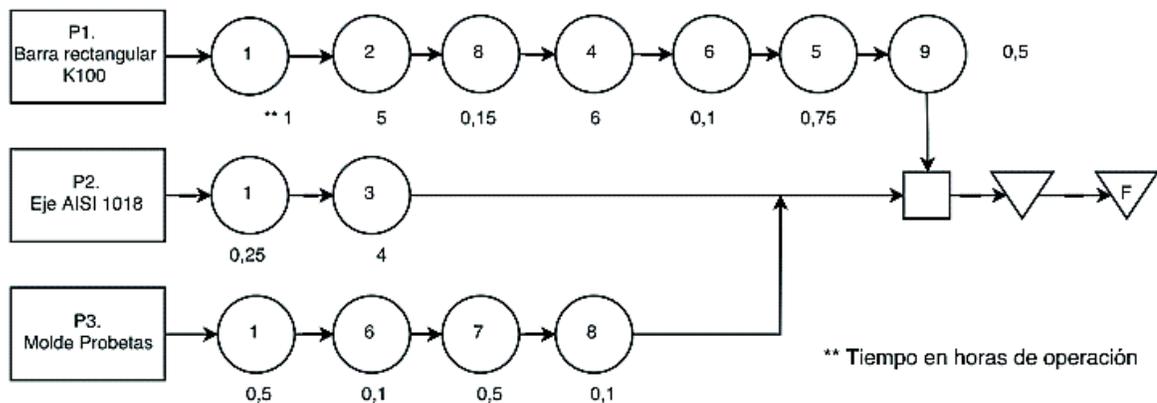


Figura 2.29. Cursograma de construcción para mordazas off-axis.

(Fuente propia)

El tiempo de operación del proyecto es de: 19 horas sin tomar en cuenta elaboración de probetas.

## 2.12. Operaciones de montaje

Al igual que se hizo con el proceso y operaciones de construcciones se construye un cursograma de las operaciones de montaje del mecanismo, las operaciones de montaje se muestran en la tabla 2.19.

Tabla 2.19. Operaciones de montaje para las mordazas.

| N°  | OPERACIÓN   |
|-----|---|
| O1  | Posicionamiento de la cuña en prensa para ensamble  |
| O2  | Colocar con el respectivo ajuste el rodamiento radial en el eje                             |
| O3  | Colocar con el respectivo ajuste parte del rodamiento axial o de empuje en el eje           |
| O4  | Colocar con el respectivo ajuste el complemento del rodamiento axial o de empuje en la cuña |
| O5  | Ensamble del eje con los rodamientos en el agujero interior de la cuña                      |
| O6  | Rodaje libre y alineamiento del eje   |
| O7  | Ubicar arandelas en el agujero del extremo trasero de la cuña alineadamente con el eje      |
| O8  | Verificación libertad del chavetero   |
| O9  | Colocar cimbras de seguridad en el chavetero para el eje                                    |
| O10 | Posicionar rosca para pernos en la parte superior de la cuña                                |
| O11 | Ubicar placas de sujeción con arandelas de presión y pernos                                 |
| O12 | Ajustar pernos  |
| O13 | Alinear cuñas y placas de sujeción  |
| O14 | Instalar la cuña ensamblada en la carcasa de las mordazas del equipo de tracción            |
| O15 | Prueba de ensayo  |

(Fuente propia)

### 2.12.1. Cursograma de montaje

Una vez definidos las operaciones de montaje se procede a realizar el cursograma del mismo. Este cursograma se muestra en la figura 2.30.

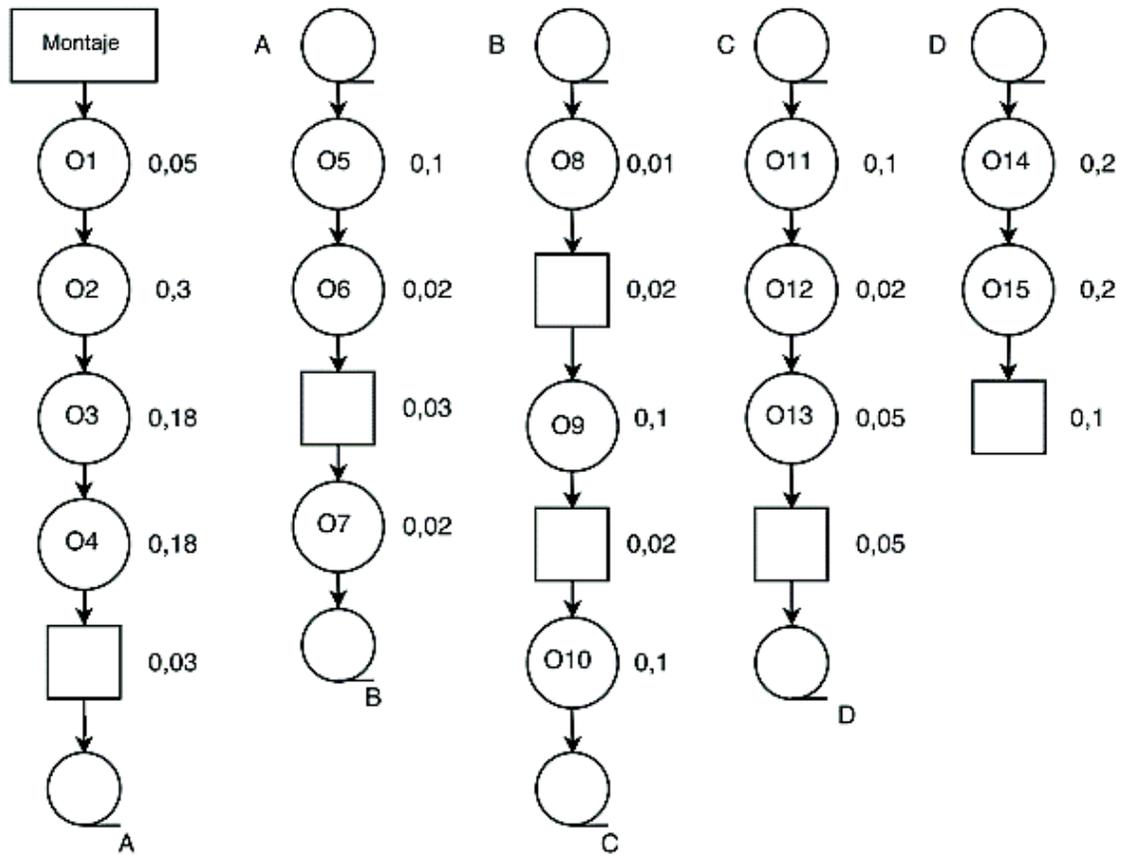


Figura 2.30. Cursograma de montaje de las mordazas.  
(Fuente propia)

El tiempo total aproximado de montaje es de: 2 horas y 52 min.

Todas las imágenes de las operaciones realizadas para la construcción y ensamble de las mordazas se muestran en el ANEXO B. Una vez terminadas todas las operaciones se tienen las mordazas definitivas que se muestran en la figura 2.31.



Figura 2.31. Mordazas terminadas.

(Fuente propia)

## 2.13. Fabricación de probetas

Una vez construidas las mordazas se necesitan probetas de material compuesto para probar su funcionamiento, cabe mencionar que no es el objetivo de estudio caracterizar al material que se va a ensayar, sino solo la obtención del módulo de cizalladura del mismo mediante el uso de las mordazas.

### 2.13.1. Consideraciones iniciales

Para esto, se ensayaron probetas de material compuesto fabricadas de matriz poliéster reforzado con fibra de yute orientada en a  $10^\circ$  respecto al eje x como se muestra en la figura 2.32.

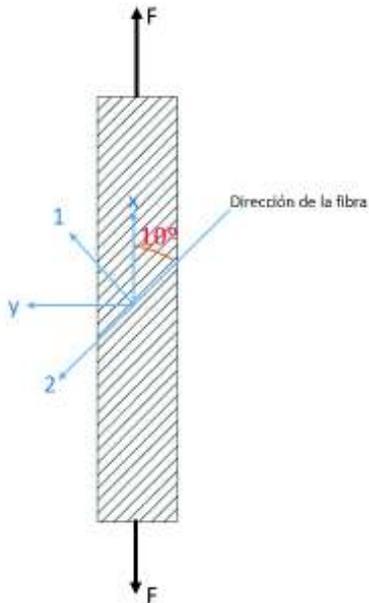


Figura 2.32. Esquema de la orientación de las fibras en la probeta.  
(Fuente propia)

Para la fabricación de las probetas, se han tomado datos de valores experimentales ya existentes de configuraciones de la matriz de resina poliéster y una presión aplicada de 1000 Psi, estos valores se muestran en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20. Configuración de la matriz de resina poliéster.

| Componente                    | Cantidad |
|-------------------------------|----------|
| Estireno                      | 10%      |
| Octoato de cobalto            | 0,5%     |
| Peróxido de metil etil cetona | 1%       |

(Tamayo, 2012)

Tomando en cuenta que el refuerzo no puede superar a la unidad y varias recomendaciones se han decidido tomar una fracción volumétrica de refuerzo de 0,3. Se ha considerado una densidad de la fibra de yute de  $1,3 \text{ g/cm}^3$

Se considera como volumen, el establecido por las dimensiones de la probeta que indica la norma ASTM D3039, estas dimensiones se muestran en la figura 2.33.

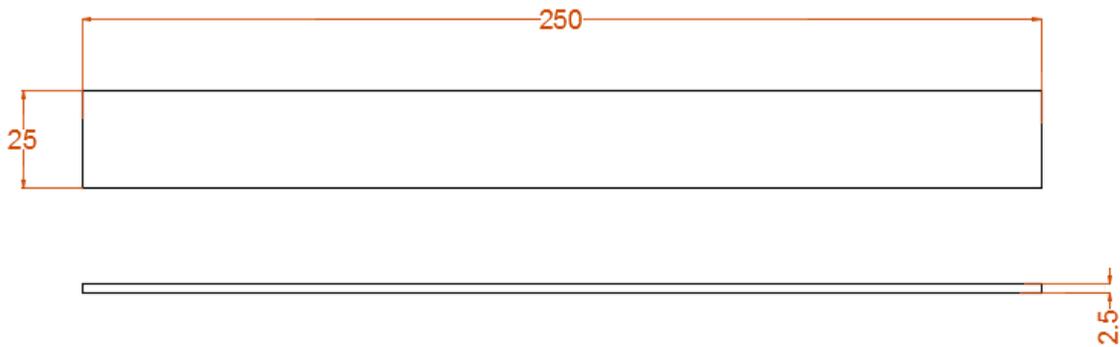


Figura 2.33. Esquema de la probeta para ensayo de tracción.  
(Fuente propia)

### 2.13.2. Elaboración de las probetas

Para el refuerzo se utiliza fibra de cabuya de tejido fino el mismo que se ha coloca dentro de un molde de dimensiones 400 x 400 mm como se observa en la figura 2.34.

Dicho molde, debe estar completamente limpio de partículas o basura y previamente cubierto con cera desmoldante para facilitar la extracción de la probeta cuando esta ya se haya curado y secado.



Figura 2.34. Colocación de la fibra dentro del molde.  
(Fuente Propia)

Posteriormente se debe preparar la mezcla según las proporciones indicadas en la tabla 2.20, para llenar un molde se ha utilizado las cantidades de compuestos que se muestran en la tabla 2.21.

Tabla 2.21. Proporciones utilizadas para fabricación de probetas.

| Compuesto                     | Cantidad (cm <sup>3</sup> ) |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Resina poliéster              | 424,8                       |
| Estireno                      | 48                          |
| Octoato de Cobalto            | 4,8                         |
| Peróxido de etil metil cetona | 2,4                         |

(Fuente propia)

Las cantidades de la tabla 2.21 se han tomado con referencia al peso de la resina poliéster tomando en cuenta que la cantidad de resina utilizada para esta mezcla equivale a 510 gramos, adicional a esto la cantidad de cabuya es de 153 gramos aproximadamente para cubrir la fracción volumétrica requerida



Figura 2.35. Colocación del molde dentro de la prensa y aplicación de presión.

(Fuente Propia)

Una vez colocada la mezcla y cerrado el molde se coloca el mismo en la prensa y se aplica una presión de 1000 Psi como se observa en la figura 2.35.

Posteriormente cuando han pasado un mínimo de 2 horas en la prensa el molde es retirado de la prensa y dejado al ambiente por el transcurso de 48 horas, luego son cortadas las probetas de acuerdo a las medidas mostradas en la figura 2.33, para esto se ha utilizado

corte laser que garantiza que las medidas sean exactas. El proceso de corte y las probetas obtenidas se muestran en la figura 2.36, y figura 2.37 respectivamente.



Figura 2.36. Proceso de corte laser de las probetas.  
(Fuente Propia)



Figura 2.37. Probetas obtenidas.  
(Fuente Propia)

Se obtuvieron 11 probetas de las cuales se eligieron las 4 mejores para realizar los ensayos de tracción.

Para la medición de las deformaciones unitarias se utilizaron galgas extensométricas modelo EA-03-125RA-120, y para los cálculos las ecuaciones descritas en el capítulo 1.

Una vez obtenidas las probetas se pegaron las galgas tipo roseta en las mismas con pegamento a base de resina para evitar que estas se separen al momento de traccionar la probeta como se muestra en la figura 2.38.



Figura 2.38. Probetas con galgas tipo roseta para ensayos de tracción.

(Fuente Propia)

- **Calibración del equipo de medición**

Para medir las deformaciones en los ensayos de tracción se utilizó un circuito electrónico con un Puente de Weathstone amplificado por un módulo modelo HX711 como lo describe la sección 1.3.2 del presente documento, el circuito construido que se muestra en la figura 2.39.

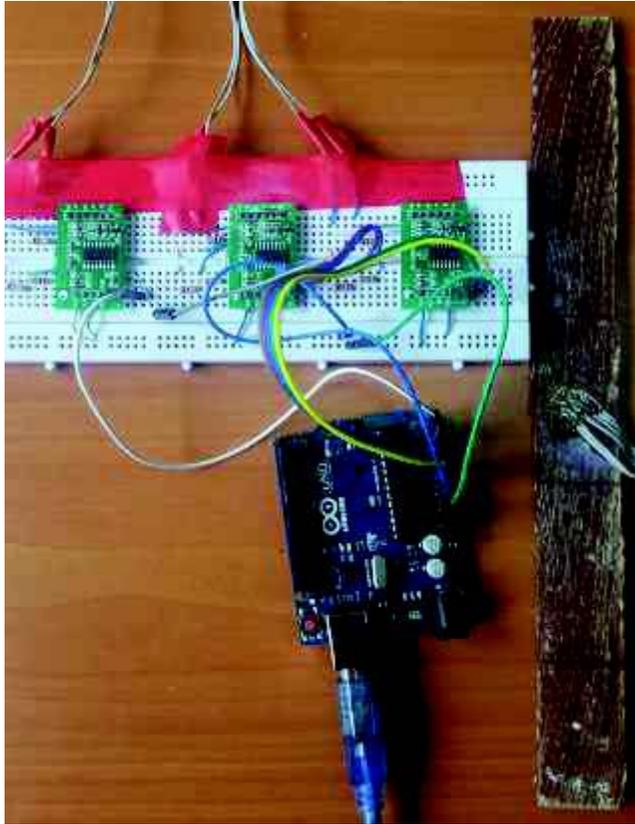


Figura 2.39. Sistema de conexiones con microcontrolador arduino uno.  
(Fuente propia)

Una vez construido el circuito se lo conectó a una tarjeta arduino uno, posteriormente se procede a calibrarlo comparando las medidas con un medidor de deformaciones de marca OMEGA.

La calibración se la realizó en base a dos probetas; la primera de acero preparada con galgas extensométricas en la dirección longitudinal y transversal como se muestra en la figura 2.40 con un peso de 0,5 kg.



Figura 2.40. Calibración con probeta de acero y peso de 0,5 kg.  
(Fuente propia)

Los resultados tanto para el equipo Omega como para el circuito con arduino se muestran en la figura 2.41. Se tomaron mediciones 5 veces cuyos valores se observan en la tabla 2.22.



Figura 2.41. Mediciones de deformación con arduino y medidor OMEGA.  
(Fuente propia)

Tabla 2.22. Datos de mediciones con tarjeta arduino para la probeta 1.

|                   |       |       |       |       |       |       |       |                 |              |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|--------------|
| <b>Medición 1</b> | 13,61 | 32,09 | 32,09 | 20,21 | 29,45 | 25,49 | 20,21 | 21,53           | 28,13        |
| <b>Medición 2</b> | 43,98 | 34,73 | 40,02 | 34,73 | 33,42 | 30,77 | 34,73 | 36,69           | 25,49        |
| <b>Medición 3</b> | 12,29 | 41,34 | 37,38 | 36,06 | 32,09 | 37,38 | 43,98 | 40,02           | 45,3         |
| <b>Medición 4</b> | 8,33  | 5,69  | 42,66 | 47,94 | 26,81 | 32,09 | 43,98 | 45,3            | 37,38        |
| <b>Medición 5</b> | 16,25 | 49,26 | 33,69 | 41,34 | 49,26 | 50,58 | 42,66 | 37,38           | 47,94        |
|                   |       |       |       |       |       |       |       | <b>Promedio</b> | <b>25,36</b> |

(Fuente propia)

La segunda probeta de material compuesto de resina poliéster y fibra de yute que se muestra en la figura 2.42, fue deformada con un peso de 0,5 kg, la máquina de medición de deformaciones y la tarjeta arduino dieron los resultados que se muestran en la figura 2.43.



Figura 2.42. Probeta de material compuesto deformada con peso de 0,5 kg.  
(Fuente propia)



Figura 2.43. Mediciones con arduino y medidor OMEGA para probeta 2.  
(Fuente propia)

En el equipo OMEGA se anotaron 10 medidas las mismas que se muestran tabla 2.23

Tabla 2.23. Datos medidos para la probeta 2 por el equipo OMEGA.

| Medida Nº       | Medidor deformaciones |
|-----------------|-----------------------|
| 1               | 2306                  |
| 2               | 2423                  |
| 3               | 2460                  |
| 4               | 2485                  |
| 5               | 2510                  |
| 6               | 2473                  |
| 7               | 2487                  |
| 8               | 2610                  |
| 9               | 2589                  |
| 10              | 2548                  |
| <b>Promedio</b> | <b>2489</b>           |

(Fuente propia)

Los datos obtenidos por el programa en arduino se muestran en la tabla 2.24.

Tabla 2.24 Datos medidos para la probeta 2 por el equipo OMEGA.

|                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |             |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| <b>Medida 1</b> | 2524 | 2518 | 2509 | 2527 | 2531 | 2534 | 2527 | 2548 | 2646 | 2688        |
| <b>Medida 2</b> | 2189 | 2179 | 2169 | 2175 | 2185 | 2175 | 2167 | 2165 | 2175 | 2183        |
| <b>Medida 3</b> | 184  | 1990 | 2604 | 2515 | 2540 | 2577 | 2620 | 2622 | 2659 | 2679        |
| <b>Medida 4</b> | 2655 | 2730 | 2651 | 2653 | 2642 | 2641 | 2630 | 2645 | 2630 | 2638        |
| <b>Medida 5</b> | 2571 | 2559 | 2560 | 2567 | 2564 | 2559 | 2573 | 2564 | 2568 | 2556        |
| <b>Promedio</b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      | <b>2412</b> |

(Fuente propia)

Se establece un factor de corrección para que se calibre con mayor exactitud el programa con arduino utilizando la ecuación 2.16.

$$\text{Factor corrección para programación} = \frac{\text{Teórico programa}}{\text{Real máquina}} \quad (2.16)$$

$$\text{Factor} = \frac{2412,062}{2489,1} = 0,969$$

Como se observa el factor de corrección no es alto ya que es semejante a 1, es decir el programa es correcto con un rango de error mínimo.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados de las pruebas funcionales que se han realizado a las mordazas y el análisis de los mismos, en primer lugar se realizó ensayos de tracción en un material plástico utilizando las mordazas comunes y luego con las mordazas construidas, posteriormente se realizaron ensayos de tracción en probetas de material compuesto laminado con fibra orientada a 10 grados, en estas se colocó galgas extensométricas para medir deformaciones y posteriormente calcular el módulo de cizalladura.

#### 3.1. Resultados obtenidos de las pruebas de tracción

A continuación se presentan los resultados de las propiedades más relevantes de los ensayos de tracción como son fuerzas, esfuerzos, módulo de elasticidad y porcentaje de deformación para el caso de las probetas de material plástico.

Para el material compuesto laminado, las propiedades indicadas son las de fuerza, deformaciones de acuerdo a la galga, esfuerzos en la dirección de la fibra y deformación angular.

- **Resultados de las pruebas de tracción a material plástico**

Para estas pruebas se utilizó probetas de acetato con refuerzos en su estructura orientadas a 10 grados respecto al eje de tracción como se muestra en la figura 3.1. Se usó una velocidad de avance de 5 mm/min.

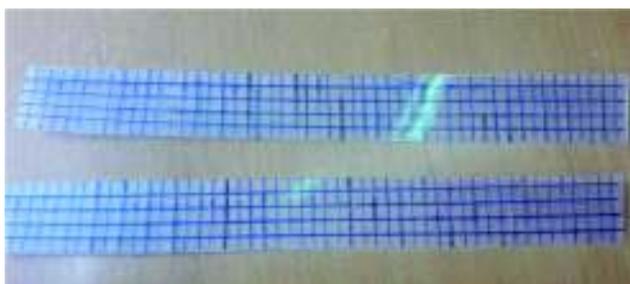


Figura 3.1. Probeta de material plástico.

(Fuente propia)

Como se observa en la figura 3.1 se dibujaron cuadrículas para mejor visualización de la deformación causada durante la tracción, el material se ensayó con las mordazas

convencionales cuyos resultados se muestran en la tabla 3.1 y con las mordazas para ensayo off-axis en la tabla 3.2

Tabla 3.1. Ensayo de tracción a probetas de acetato con mordazas comunes.

| Designación     | Ancho        | Espesor     | Area            | E              | Fuerza máx.   | Resistencia máx. | Tensión máxima | Elongación total |
|-----------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|----------------|------------------|
|                 | mm           | mm          | mm <sup>2</sup> | MPa            | N             | MPa              | %              | %                |
| <b>F1</b>       | 23,41        | 0,27        | 6,32            | 2784,36        | 154,17        | 24,39            | 5,09           | 4,66             |
| <b>F2</b>       | 24,25        | 0,22        | 5,33            | 1883,86        | 200,83        | 37,65            | 7,26           | 8,43             |
| <b>F3</b>       | 23,43        | 0,22        | 5,15            | 4356,93        | 181,63        | 35,24            | 2,86           | 4,81             |
| <b>Promedio</b> | <b>23,70</b> | <b>0,24</b> | <b>5,60</b>     | <b>3008,38</b> | <b>178,88</b> | <b>32,43</b>     | <b>5,07</b>    | <b>5,97</b>      |

(Fuente Propia)

Tabla 3.2. Ensayo de tracción a probetas de acetato con mordazas off-axis.

| Designación     | Ancho        | Espesor     | Area            | E              | Fuerza máx.   | Resistencia máx. | Tensión máxima | Elongación total |
|-----------------|--------------|-------------|-----------------|----------------|---------------|------------------|----------------|------------------|
|                 | Mm           | mm          | mm <sup>2</sup> | MPa            | N             | MPa              | %              | %                |
| <b>F4</b>       | 24,88        | 0,22        | 5,47            | 4083,39        | 155,24        | 28,36            | 6,55           | 15,83            |
| <b>F5</b>       | 24,18        | 0,22        | 5,32            | 3498,98        | 186,67        | 35,09            | 9,46           | 51,5             |
| <b>F6</b>       | 24,88        | 0,22        | 5,47            | 4702,86        | 186,67        | 34,1             | 6,62           | 35,46            |
| <b>Promedio</b> | <b>24,65</b> | <b>0,22</b> | <b>5,42</b>     | <b>4095,08</b> | <b>176,19</b> | <b>32,52</b>     | <b>7,54</b>    | <b>34,26</b>     |

(Fuente Propia)

En la figura 3.2 se muestra como se produce la falla en las probetas F1, F2 y F3 utilizando las mordazas convencionales y en la figura 3.3 se muestran las probetas a las cuales se les realizó el ensayo de tracción con las mordazas off-axis.

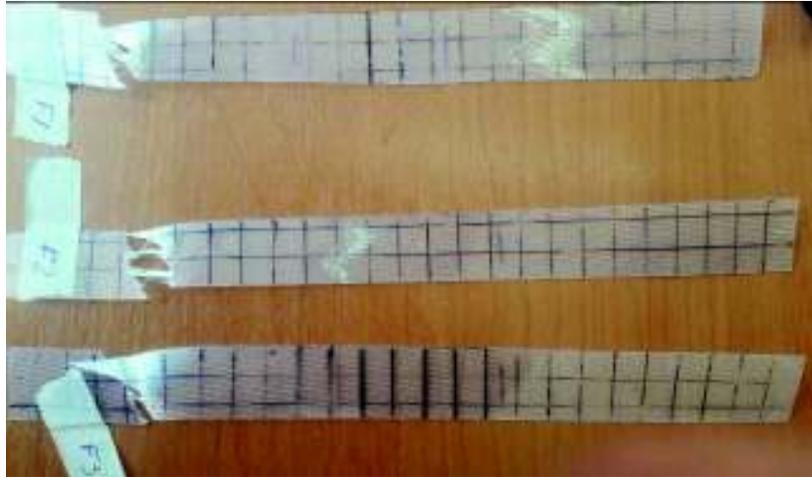


Figura 3.2. Probetas de acetato ensayadas con mordazas convencionales.

(Fuente propia)



Figura 3.3. Probetas de acetato ensayadas con mordazas off-axis.

(Fuente propia)

Al realizar los ensayos utilizando mordazas convencionales la probeta se deformó como muestra la figura 3.4.

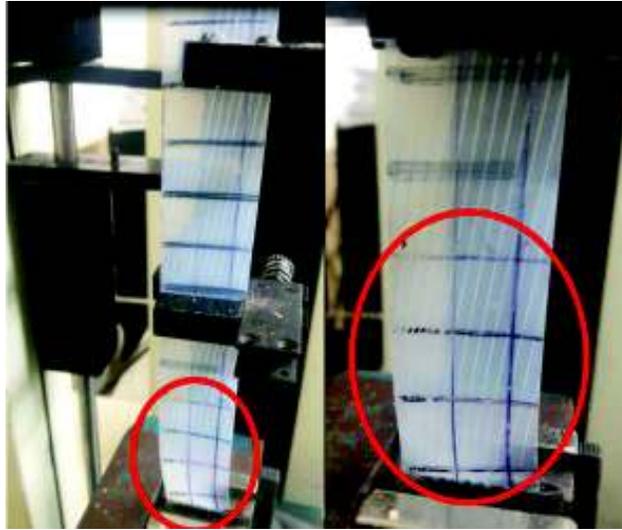


Figura 3.4. Deformación de probeta de acetato con mordazas convencionales.  
(Fuente propia)

Al realizar los ensayos utilizando las mordazas para ensayo off-axis la probeta se deformó como muestra la figura 3.5.

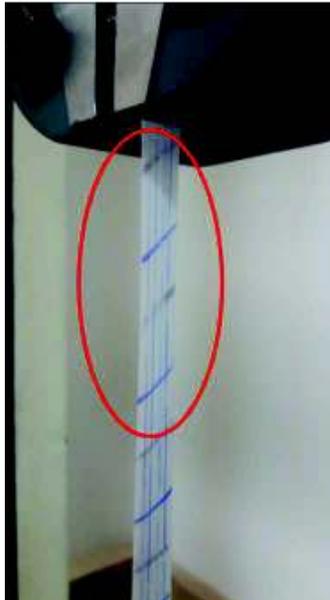


Figura 3.5. Deformación de probetas de acetato con mordazas off axis.  
(Fuente propia)

A continuación en la figura 3.6 se muestra la gráfica de esfuerzo vs deformación para las probetas utilizando mordazas convencionales y utilizando mordazas off-axis.

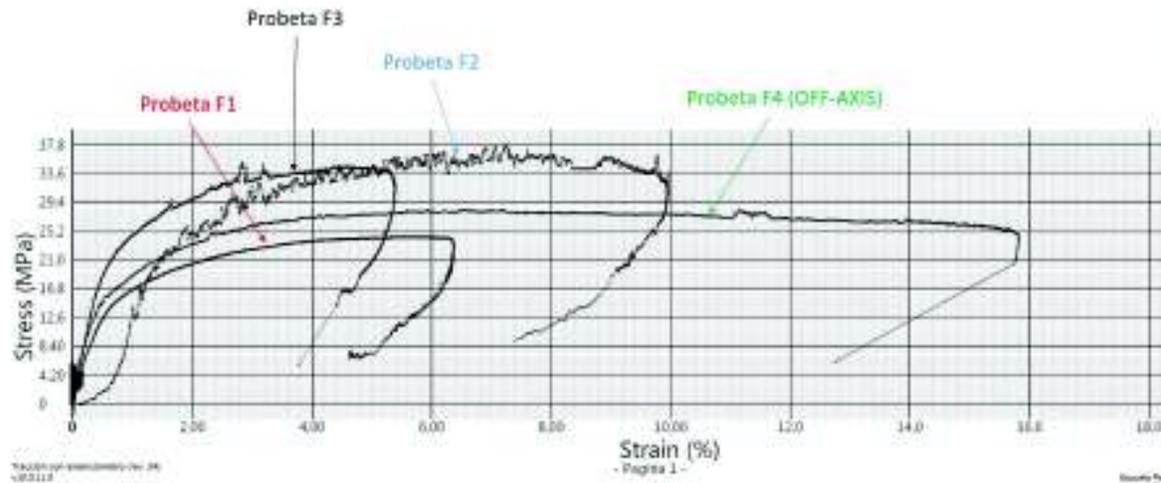


Figura 3.6. Diagrama esfuerzo - deformación para probetas de acetato.

(Fuente propia)

- **Resultados de las pruebas de tracción en material compuesto laminado**

**Resultados de ensayos utilizando mordazas convencionales**

Se ensayaron probetas de material compuesto laminado con fibra orientada a diez grados respecto al eje x de la probeta, al utilizar mordazas convencionales se realizaron 3 ensayos en una misma probeta sin que se produzca la falla en la misma obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 3.3. Resultados del primer ensayo con mordazas convencionales.

| FUERZA N | Ea         | Eb         | Ec          | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|------------|------------|-------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0          | 0          | 0           | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 50       | 0,00000985 | 0,00000088 | -0,00001645 | 0,00000836    | 0,70390314     | 0,12037480        | 0,00001685        |
| 100      | 0,00009735 | 0,00001208 | -0,00005914 | -0,00001405   | 1,40780629     | 0,24074959        | 0,00004032        |
| 150      | 0,00017835 | 0,00001814 | -0,00010855 | -0,00003352   | 2,11170943     | 0,36112439        | 0,00006663        |
| 200      | 0,00027565 | 0,00003973 | -0,00012795 | -0,00006824   | 2,81561257     | 0,48149919        | 0,00007392        |
| 300      | 0,00052083 | 0,00006047 | -0,00023205 | -0,00016784   | 4,22341886     | 0,72224878        | 0,00009978        |

(Fuente propia)

Tabla 3.4. Resultados del segundo ensayo con mordazas convencionales.

| FUERZA N | Ea         | Eb          | Ec          | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|------------|-------------|-------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0          | 0           | 0           | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 50       | 0,00008097 | -0,00000083 | -0,00004193 | -0,00004070   | 0,71801942     | 0,12278883        | 0,00000379        |
| 100      | 0,00017835 | 0,00003196  | -0,00005990 | -0,00005453   | 1,43603883     | 0,24557765        | 0,00003025        |
| 150      | 0,00023197 | 0,00003196  | -0,00009059 | -0,00007746   | 2,15405825     | 0,36836648        | 0,00003753        |
| 200      | 0,00036327 | 0,00004751  | -0,00014824 | -0,00012001   | 2,87207766     | 0,49115531        | 0,00006217        |
| 250      | 0,00040375 | 0,00005442  | -0,00016321 | -0,00013170   | 3,59009708     | 0,61394414        | 0,00007015        |
| 300      | 0,0005077  | 0,00007429  | -0,00020439 | -0,00015473   | 4,30811649     | 0,73673296        | 0,00009815        |
| 350      | 0,00058648 | 0,00008811  | -0,00025156 | -0,00015870   | 5,02613591     | 0,85952179        | 0,00013750        |

(Fuente propia)

Tabla 3.5. Resultados del tercer ensayo con mordazas convencionales.

| FUERZA N | Ea         | Eb         | Ec          | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|------------|------------|-------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0          | 0          | 0           | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 50       | 0,00006893 | 0,0000155  | -0,00003294 | -0,00000499   | 0,70390314     | 0,12037480        | 0,00003015        |
| 250      | 0,00041688 | 0,0000622  | -0,00018642 | -0,00010606   | 3,51951571     | 0,60187398        | 0,00010668        |
| 300      | 0,00050661 | 0,00007861 | -0,00022610 | -0,00012329   | 4,22341886     | 0,72224878        | 0,00013475        |
| 350      | 0,00062588 | 0,00008821 | -0,00022834 | -0,00022112   | 4,92732200     | 0,84262358        | 0,00008438        |
| 400      | 0,00069674 | 0,00009416 | -0,00026727 | -0,00024115   | 5,63122514     | 0,96299838        | 0,00010310        |

(Fuente propia)

### Resultados de ensayos utilizando mordazas construidas para ensayo off axis

Al igual que con las mordazas convencionales se ensayaron 3 veces una probeta de material compuesto laminado con fibra orientada a diez grados respecto al eje x sin que se produzca la falla en la misma obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 3.6. Resultados del primer ensayo con mordazas off-axis.

| FUERZA N | Ea        | Eb        | Ec          | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|-----------|-----------|-------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0         | 0         | 0           | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 100      | 0,0001352 | 0,0000216 | -0,00005808 | -0,00003392   | 1,40780629     | 0,24074959        | 0,00003423        |
| 150      | 0,0001676 | 0,0000345 | -0,00008628 | -0,00001232   | 2,11170943     | 0,36112439        | 0,00007526        |
| 200      | 0,0003322 | 0,000068  | -0,00015828 | -0,00003792   | 2,81561257     | 0,48149919        | 0,00013212        |
| 250      | 0,0005232 | 0,000095  | -0,00026528 | -0,00006792   | 3,51951571     | 0,60187398        | 0,00020585        |
| 300      | 0,0005474 | 0,0001028 | -0,00027598 | -0,00006582   | 4,22341886     | 0,72224878        | 0,00021976        |

(Fuente propia)

Tabla 3.7. Resultados del segundo ensayo con mordazas off-axis.

| FUERZA N | Ea        | Eb        | Ec         | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|-----------|-----------|------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0         | 0         | 0          | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 50       | 0,0000639 | 0,0000647 | -0,0000339 | 0,0000994     | 0,70884281     | 0,12121953        | 0,00012686        |
| 100      | 0,0001613 | 0,0001184 | -0,0000796 | 0,0001551     | 1,41768563     | 0,24243906        | 0,00022814        |
| 150      | 0,0002195 | 0,0001477 | -0,0001043 | 0,0001802     | 2,12652844     | 0,3636586         | 0,00028008        |
| 200      | 0,0002732 | 0,0001807 | -0,0001305 | 0,0002187     | 2,83537126     | 0,48487813        | 0,00034358        |
| 250      | 0,0003506 | 0,0002087 | -0,0001717 | 0,0002385     | 3,54421407     | 0,60609766        | 0,00040275        |
| 300      | 0,0004109 | 0,0002347 | -0,0001997 | 0,0002582     | 4,25305688     | 0,72731719        | 0,00045147        |

(Fuente propia)

Tabla 3.8. Resultados del tercer ensayo con mordazas off-axis.

| FUERZA N | Ea        | Eb        | Ec         | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ MPa | $\sigma_{12}$ MPa | $\gamma_{12}$ rad |
|----------|-----------|-----------|------------|---------------|----------------|-------------------|-------------------|
| 0        | 0         | 0         | 0          | 0             | 0              | 0                 | 0                 |
| 150      | 0,0001680 | 0,0000470 | -0,0000700 | -0,0000040    | 2,1540582      | 0,3683665         | 0,0000776         |
| 200      | 0,0002100 | 0,0000492 | -0,0001000 | -0,0000116    | 2,8720777      | 0,4911553         | 0,0000951         |
| 250      | 0,0002560 | 0,0000580 | -0,0001460 | 0,0000060     | 3,5900971      | 0,6139441         | 0,0001431         |
| 350      | 0,0004060 | 0,0001190 | -0,0002080 | 0,0000400     | 5,0261359      | 0,8595218         | 0,0002476         |
| 400      | 0,0004600 | 0,0001330 | -0,0002440 | 0,0000500     | 5,7441553      | 0,9823106         | 0,0002878         |

(Fuente propia)

- **Comparación de resultados utilizando mordazas comunes y mordazas off axis**

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de tracción para el material laminado se comparan las gráficas de esfuerzo  $\sigma_{12}$  vs deformación angular  $\gamma_{12}$  ya que la pendiente de

esta gráfica representa el valor del módulo de cizalladura del material. En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos.

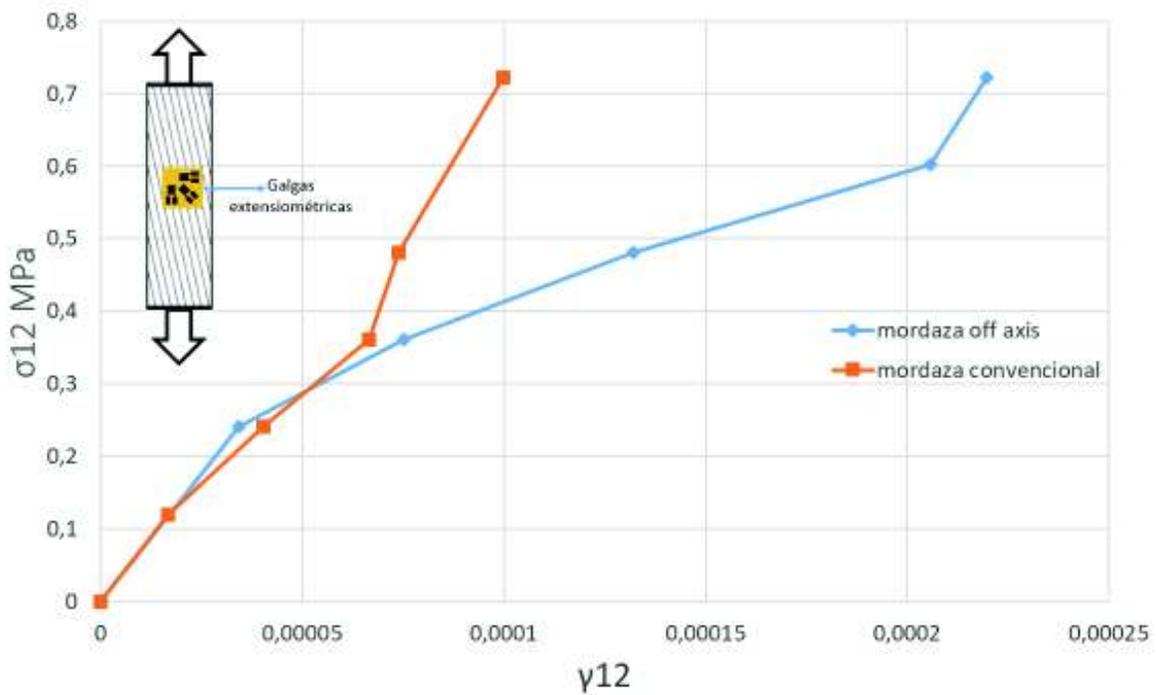


Figura 3.7. Gráfica esfuerzo-deformación en primer ensayo de tracción.

(Fuente propia)

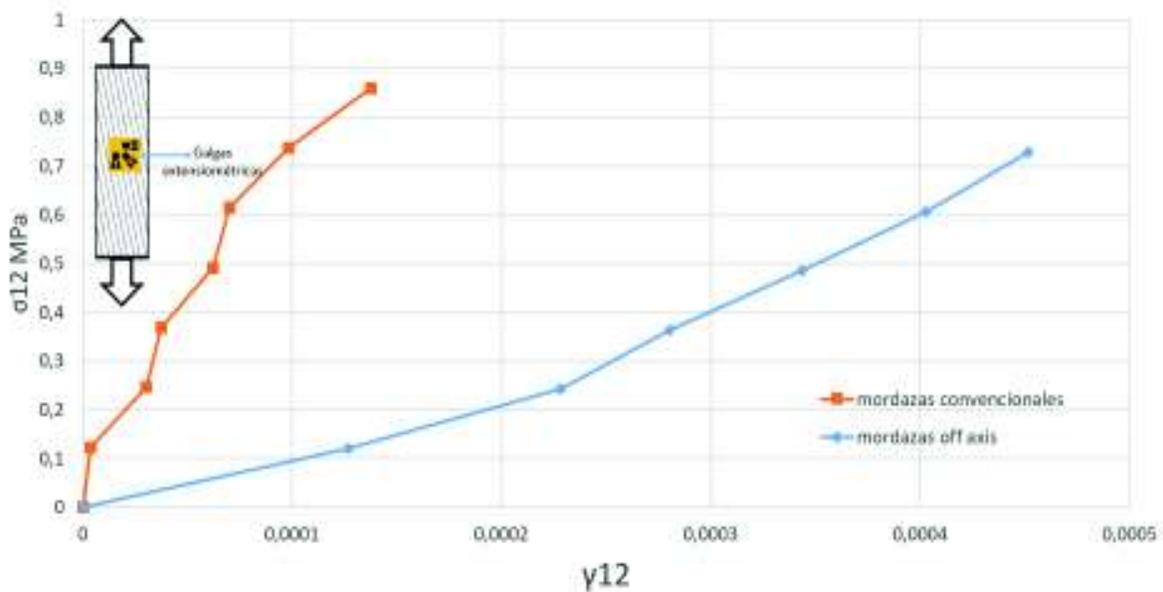


Figura 3.8. Gráfica esfuerzo-deformación para segundo ensayo de tracción.

(Fuente propia)

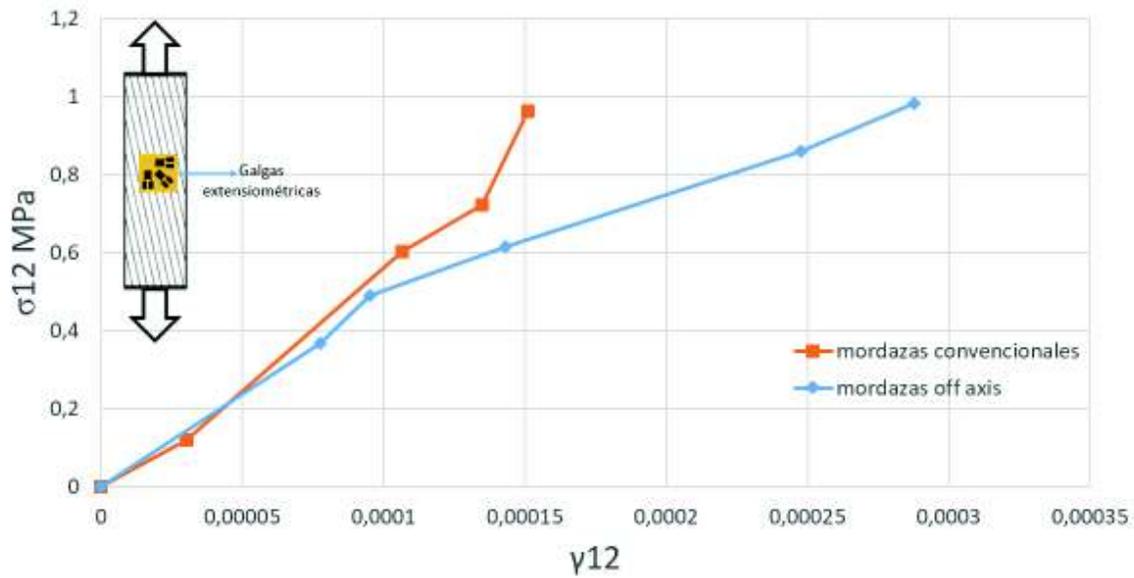


Figura 3.9. Gráfica esfuerzo- deformación para tercer ensayo de tracción.

(Fuente propia)

Tabla 3.9. Resultados módulo de cizalladura.

|                      | G12            |                |                |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|
|                      | 1er Ensayo MPa | 2do Ensayo MPa | 3er Ensayo MPa |
| Mordaza Convencional | 6833           | 6247           | 6246           |
| Mordaza Off-axis     | 2795           | 1626           | 3197           |
| %variación           | 59,10%         | 73,97%         | 48,82%         |

(Fuente propia)

- **Comparación de resultados de la simulación y del primer ensayo de tracción con mordazas off axis**

La tabla 3.10 indica los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y la simulación descrita en la sección 2.8 de este documento.

Tabla 3.10. Comparación entre simulación y ensayo con mordazas off axis.

| Prueba             | Fuerza N | Ex      | Ey       | $\sigma_x$ MPa |
|--------------------|----------|---------|----------|----------------|
| Ensayo de tracción | 300      | 0,00054 | -0,00027 | 4,22           |
| Simulación         | 300      | 0,00052 | -0,00025 | 4,56           |
| % error            | 0        | 3,84    | 8        | 7,38           |

(Fuente propia)

### 3.2. Discusión de resultados

Dentro de las pruebas de tracción en las probetas de acetato utilizando mordazas convencionales se observa que la resistencia máxima no sobrepasa los 40 MPa, y la deformación es mínima y no lineal, se tiene un alabeo característico y existió una restricción, que produjo un momento flector en los extremos de la probeta y la falla con las mordazas convencionales se produce en el extremo de las mismas, se observa una distribución no uniforme de los esfuerzos como se muestra en la figura 3.4.

En las probetas de acetato utilizando las mordazas diseñadas para el ensayo de tracción oblicua (off axis), se observa que la resistencia es similar al ensayo con mordazas convencionales las cuales no sobrepasa los 40 MPa, sin embargo la deformación sobrepasa el 50% de su longitud inicial como se observa en la tabla 3.3. La distribución de esfuerzos para este caso, resultó más simétrica respecto a las ensayadas con las mordazas convencionales, no existió ningún tipo de alabeo en los extremos de las probetas, esto se puede verificar en la figura 3.5.

Al traccionar el material plástico utilizando mordazas convencionales, se tiene una falla en las zonas cercanas a las mordazas, debido a la concentración de esfuerzos que se genera en estas zonas.

En el estudio de Pagano y Halpin se utiliza un material caucho reforzado con nylon, con fibra orientada  $30^\circ$  para diferentes relaciones de longitud-ancho, entre más corta la probeta ( $L/w=2$ ) menos deformaciones presenta, en cambio si ( $L/w=4$ ) se observa notoriamente el momento y los esfuerzos generados en los extremos, hechos que se llegaron a observar del mismo comportamiento en la sección 3.1 de este documento para probetas plásticas de tipo acetato, usando mordazas convencionales; en los extremos de sujeción existe una restricción, generando la fractura en esta zona de tal manera que no se observa una distribución uniforme de los esfuerzos.

Pindera y Herakovich obtuvieron errores que disminuyeron al aumentar el ángulo y la relación longitud-ancho ( $L/2h$ ), se tuvo un error del 27% respecto al módulo de cizalladura ya conocido del material grafito-poliamida de 5 GPa sin utilizar ningún factor de corrección ni método alguno para eliminar las restricciones en los extremos de la probeta; utilizando la solución propuesta de mordazas que permitan un giro obtuvieron un error del 12%, obteniendo una variación de casi el 50%; en esta investigación procediendo de igual

manera aunque no se tenga punto de referencia y con material laminado de fibra-resina, se obtuvo una variación promedia en tres ensayos del 60% utilizando mordazas off-axis respecto al uso de mordazas convencionales.

El utilizar las mordazas off-axis permite el giro de los extremos eliminando restricciones, C.T.SUn & S.P. Berreth refuerzan los extremos de las probetas con tacones para evitar que se destruya en estas zonas, lo cual implica mayor costo en materiales y fabricación de las probetas, por otro lado tenemos a Pindera y Heracovich cuyas mordazas solo dejan libre el extremo del espécimen y las sujeta más cerca de su centro sin lograr que se eliminen las restricciones en su totalidad.

Para el caso del ensayo de tracción de material compuesto laminado, se tiene que:

En el primer ensayo usando las mordazas off axis se llega a una fuerza de 300 N, con un esfuerzo máximo en la dirección de las fibras de 0,72 MPa y una deformación angular máxima de  $219 \times 10^{-6}$ . Para las mordazas convencionales el esfuerzo máximo es de 0,72 MPa con una deformación angular de  $99,78 \times 10^{-6}$ .

En el segundo ensayo para mordazas off axis también se llega a una fuerza de 300 N con un esfuerzo máximo de 0,727 MPa y una deformación angular de  $451 \times 10^{-6}$ . Con las mordazas convencionales se obtiene un esfuerzo máximo de 0,737 MPa y una deformación angular de  $137 \times 10^{-6}$ .

Para el tercer ensayo para mordazas off axis se llega a una fuerza de 400 N, con un esfuerzo máximo de 0,98 MPa en la dirección de las fibras y una deformación angular de  $287,8 \times 10^{-6}$ . Usando las mordazas convencionales se tiene un esfuerzo máximo de 0,963 MPa con una deformación angular de  $103 \times 10^{-6}$ .

Para las probetas de material compuesto laminado, se observa en los tres ensayos que la pendiente de la curva esfuerzo vs deformación angular cuando se usa mordazas convencionales es mayor que al utilizar mordazas off axis como se muestra en las figuras 3.7, 3.8 y 3.9, esto quiere decir que el módulo de cizalladura resulta mayor al haber restricciones en los extremos de la probeta.

Como se observa en la tabla 3.10 en la simulación realizada para la deformación en el "eje x" de la probeta se tiene un porcentaje de error del 3.84, para la deformación en el "eje y" se obtuvo un error del 8 %, estos son valores admisibles debido a que las deformaciones son medidas pequeñas. Para el esfuerzo se tiene un error de 7.38 %, lo cual es válido

debido a que el área en el caso de ensayo de tracción es mayor por las dimensiones de la probeta.

## 4. CONCLUSIONES

- El ensayo de tracción off axis es un método que permite obtener el módulo de cizalladura en materiales ortotrópicos de manera experimental. Las condiciones ideales para este ensayo son: eliminar los esfuerzos cortantes y los momentos de flexión en los extremos de la probeta en el material compuesto para obtener un campo de deformación uniforme.
- Al utilizar las mordazas convencionales se tiene que el módulo de cizalladura es superior en un 50% de su valor real. Esto debido al incremento de la rigidez en los extremos de la probeta causado por la sujeción de las mordazas fijas.
- El color blanquecino a lo largo de las probetas de material plástico ensayadas, es una de las evidencias del correcto funcionamiento de las mordazas construidas, mostrando así que los esfuerzos se repartieron uniformemente, y que en los extremos se eliminaron las fuerzas cortantes y momentos de flexión que se generan por las restricciones con las mordazas convencionales.
- Pueden obtenerse mejores resultados del ensayo off axis si se utiliza rosetas de deformación en lugar de una sola galga extensométrica debido a que este último no permite medir deformaciones angulares, cuyo valor es indispensable para obtener el módulo de cizalladura del material.
- Las mediciones de las deformaciones unitarias obtenidas en los ensayos inicialmente presentan cierta inestabilidad debido a perturbaciones y ruidos en la señal, que trasmite el circuito electrónico con Arduino UNO, esto se puede mejorar utilizando filtros u otro tipo de módulo amplificador más estable.
- Mediante el uso de una simulación, se puede inferir el correcto comportamiento de las mordazas, así como los valores obtenidos por el medidor de deformaciones

construido, ya que estos últimos tienen un error admisible de 3,8 % en deformaciones y 7,37 % en esfuerzos.

- Los materiales compuestos reforzados con fibras pueden fallar en la interfaz matriz fibra, por esto es importante la obtención del módulo de cizalladura para la aplicación de una teoría de falla adecuada para materiales compuestos con fibras orientadas a diferentes ángulos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Pindera, M.-J., & Herakovich, C. (1981). AN ENDOCHRONIC THEORY FOR TRANSVERSELY ISOTROPIC FIBROUS COMPOSITES. En NASA. Virginia: NASA.
- aceroscol. (2015). ACEROS PARA HERRAMIENTAS SAE D3. ACEROSCOL.
- Alvarez, R., & Peña, C. (2010). *DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE MORDAZAS HIDRÁULICAS PARA UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA TINIUS OLSEN MODELO SUPER L*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Chamis, C., & Sinclair, H. (1976). (10° Off-axis tensile test for intralaminar shear characterization of fiber composites; . *Nasa Technical note TN D-8215*.
- Charro, C., & Eugenio, C. (2014). Construcción de una matriz de corte para laminas de aluminio de 0,6mm de espesor para obtener discos de 145 mm de diámetro para el laboratorio de conformado mecánico. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cimbala, J. M. (2013). *Stress, Strain, and Strain Gages*. Pensilvania: Penn State University.
- eFunda. (2017). *Carbon Steel AISI 1018*. Obtenido de [http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon\\_steels/show\\_carbon.cfm?ID=AISI\\_1018&show\\_prop=all&Page\\_Title=AISI%201018](http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/show_carbon.cfm?ID=AISI_1018&show_prop=all&Page_Title=AISI%201018)
- García, E. (2016). *Estudio comparativo del módulo y resistencia a cortadura intralaminar con diferentes tipologías de probetas Off-Axis para un material compuesto Grafito-Epoxi*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Gramoll, K. (2008). *eCourses*. Obtenido de MECHANICS - THEORY: [https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap\\_sec=08.3&page=theory](https://ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=08.3&page=theory)
- Handbook, E. (2006). *Reference Tables -- Coefficient of Friction*. Obtenido de <http://www.engineershandbook.com/Tables/frictioncoefficients.htm>
- Hull, D. (1987). *Materiales compuestos*. Barcelona: Reverté.
- Ibertest. (2017). *Ibertest*. Obtenido de <https://www.ibertest.es/en/products/mechanical-tensile-gripping-heads-ib154/>
- Naylamp, M. (2016). *Naylamp Mechatronics*. Obtenido de [http://www.naylampmechatronics.com/blog/25\\_tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-hx711-ba.html](http://www.naylampmechatronics.com/blog/25_tutorial-trasmisor-de-celda-de-carga-hx711-ba.html)

- OMEGA. (1999). PRACTICAL STRAIN GAGE MEASUREMENTS.
- Pagano, N., & Halpin, J. (1968). Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies. *Journal of Composite Materials American Society for Composites*.
- Paris, F., Cañas, J., & Marín, J. (2006). Introducción al Análisis y Diseño de Materiales Compuestos. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Pindera, & Herakovich. (1981). An Endochronic Theory for Transversely Isotropic Fibrous Composites. *Department of Engineering Science and Mechanics; Interim Report 25*.
- Pinto, A. (2013). *ingenieriareal.com*. Obtenido de Tipos de máquinas universales, de tensión y compresión.: <http://ingenieriareal.com/tipos-de-maquinas-universales-de-tension-y-compresion/>
- Riba, C. (2002). *Diseño concurrente*. España: Ediciones UPC.
- Richard, G., & Keith, J. (2011). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México D.F.: McGrawHill.
- Romel, L., & Germán, P. (2017). *FABRICACIÓN DE UN RETROVISOR PARA EL VEHÍCULO SUZUKI FORSA CON MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ POLIMÉRICA DE POLIÉSTER Y REFUERZO NATURAL DE CABUYA*. Riobamba: ESPOCH.
- Sun, C. T., & Berreth, P. (1987). A NEW END TAB DESIGN FOR OFF-AXIS TENSION TEST OF COMPOSITE MATERIALS. *Composite Materials Laboratory, School of Aeronautics and Astronautics Purdue University*.
- Tamayo, N. (2012). *OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRÍZ POLIESTER REFORZADOS CON FIBRA DE CABUYA MEDIANTE ESTRATIFICACIÓN*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Tsai, S. (1966). Mechanics of Composite Materials, Part II - Theoretical Aspects,. *Air Force Materials Laboratory Technical Report AFML-TR-66-149*.
- Xiao, Y., Kawai, M., & Hatta, H. (2010). An integrated method for off-axis tension. *JOURNAL OF COMPOSITES MATERIAL*.
- Zwick. (Abril de 2015). *Zwick/Roell*. Obtenido de Mordazas y útiles de ensayo: <http://www.zwick.es/es/productos/mordazas-y-utiles-de-ensayo.html>

# **ANEXOS**

**ANEXO A**

**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES  
Y CATÁLOGOS DE ELEMENTOS  
NORMALIZADOS**

## ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180)

**1. Descripción:** este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

**2. Normas involucradas:** ASTM A 108

**3. Propiedades mecánicas:** Dureza 126 HB (71 HRb)  
Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)  
Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)  
Elongación máxima 15% (en 50 mm)  
Reducción de área 40%  
Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)  
Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.87 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

**5. Propiedades químicas:** 0.15 – 0.20 % C  
0.60 – 0.90 % Mn  
0.04 % P máx  
0.05 % S máx

**6. Usos:** se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

**NOTA:**

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumple el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

ANEXO A.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE ACERO AISI D3/K100



**aceroscol** s.a.s.  
la compañía de sus aceros

**ACEROS PARA HERRAMIENTAS**  
**SAE D3**

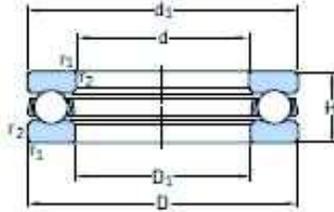


| SAE D3   | COMPOSICIÓN QUÍMICA |   |           |           |              |             |           | PROPIEDADES MECÁNICAS |            |  |                                    |
|--|---------------------|---|-----------|-----------|--------------|-------------|-----------|-----------------------|------------|--|------------------------------------|
|  | C                   | Mn  | P         | S         | Si           | Cr          | V         | W                     | DUREZA HRC | Resistencia a la Tracción Kg/mm <sup>2</sup> | Límite elástico Kg/mm <sup>2</sup> |
|  | 2.00/2.35           | 0.25/0.45   | 0.04 max. | 0.04 max. |              | 11.0 / 13.0 | 1.00 max. | 1.00 max.             |            | 62<br>60<br>55<br>50<br>45                   | 109<br>204<br>261<br>228<br>190    |
| TRATAMIENTO TÉRMICO  |                     |   |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |
| TRATAMIENTO  |                     | TEMPERATURA °C  |           |           | ENFRIAMIENTO |             |           | DUREZA                | RC         | HBN  |                                    |
| Recocido   |                     | 870-900°C   |           |           | Lento        |             |           |                       |            | 255 max.                                     |                                    |
| Temple   |                     | 925-980°C   |           |           | Aire/Sales   |             |           |                       |            | 68-74Hc.                                     |                                    |
| Revenido   |                     | 200-540°C   |           |           |              |             |           |                       |            | 56-62  |                                    |
| CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES   |                     |   |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |
| <p><b>CARACTERÍSTICAS:</b> Posee gran resistencia al desgaste, alta dureza superficial, gran estabilidad dimensional y resistencia a la compresión. Alta templabilidad aunque menor a la del AISI D2.</p> <p><b>APLICACIONES:</b> Herramientas para corte de piezas (punzonado, cizallado etc.) cizallas circulares, fresas para madera, brocas, buriles, dados para extrusión en frío; rodillos para formar tubos y perfiles, matricería y troquelaría. Dureza obtenida después de tratamiento térmico 61 - 63 HRC.</p> |                     |   |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |
| NORMAS EQUIVALENTES  |                     |   |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |
| <p>Afnor (Fr.) M 2200 C12 - BS (Ingl) BD3 - Din (Ale) ...12080 - Jis (Jap) ...S KD1 - UNI (ITAL) X210 Cr13 KU - AISI / SAE... D3</p>   |                     |   |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |
| PERFILES USUALES   |                     |  De 12 mm hasta 280 mm. Premaquinado, laminado o forjado<br> De 25X10 hasta 500X120mm |           |           |              |             |           |                       |            |  |                                    |

www.aceroscol.com - PBX: 447 5500

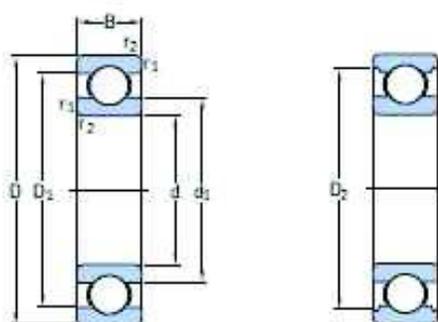
## ANEXO A.3 CATÁLOGO DE RODAMIENTOS

### 10.1 Rodamientos axiales de bolas de simple efecto d 3–30 mm



| Dimensiones principales |    |     | Capacidad de carga básica |                            | Carga límite de fatiga | Factor de carga mínima | Velocidades nominales   |                  | Masa   | Designación |
|-------------------------|----|-----|---------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|--------|-------------|
| d                       | D  | H   | dinámica<br>C             | estática<br>C <sub>0</sub> | P <sub>L</sub>         | A                      | Velocidad de referencia | Velocidad límite |        |             |
| mm                      |    |     | kN                        |                            | kN                     | –                      | r.p.m.                  |                  | kg     | –           |
| 3                       | 8  | 3,5 | 0,806                     | 0,72                       | 0,027                  | 0,000 003              | 26 000                  | 36 000           | 0,0009 | BA 3        |
| 4                       | 10 | 4   | 0,761                     | 0,72                       | 0,027                  | 0,000 003              | 22 000                  | 30 000           | 0,0015 | BA 4        |
| 5                       | 12 | 4   | 0,852                     | 0,965                      | 0,036                  | 0,000 005              | 20 000                  | 28 000           | 0,0021 | BA 5        |
| 6                       | 14 | 5   | 1,78                      | 1,92                       | 0,071                  | 0,000 019              | 17 000                  | 24 000           | 0,0035 | BA 6        |
| 7                       | 17 | 6   | 2,51                      | 2,9                        | 0,108                  | 0,000 044              | 14 000                  | 19 000           | 0,0065 | BA 7        |
| 8                       | 19 | 7   | 3,19                      | 3,8                        | 0,143                  | 0,000 075              | 12 000                  | 17 000           | 0,0091 | BA 8        |
| 9                       | 20 | 7   | 3,12                      | 3,8                        | 0,143                  | 0,000 075              | 12 000                  | 16 000           | 0,01   | BA 9        |
| 10                      | 24 | 9   | 9,95                      | 15,3                       | 0,56                   | 0,0012                 | 9 500                   | 13 000           | 0,02   | 51100       |
|                         | 26 | 11  | 12,7                      | 18,6                       | 0,695                  | 0,0018                 | 8 000                   | 11 000           | 0,03   | 51200       |
| 12                      | 26 | 9   | 10,4                      | 16,6                       | 0,62                   | 0,0014                 | 9 000                   | 13 000           | 0,022  | 51101       |
|                         | 28 | 11  | 13,3                      | 20,8                       | 0,765                  | 0,0022                 | 8 000                   | 11 000           | 0,034  | 51201       |
| 15                      | 28 | 9   | 10,6                      | 18,3                       | 0,67                   | 0,0017                 | 8 500                   | 12 000           | 0,023  | 51102       |
|                         | 32 | 12  | 15,9                      | 25                         | 0,915                  | 0,0038                 | 7 000                   | 10 000           | 0,046  | 51202       |
| 17                      | 30 | 9   | 11,4                      | 21,2                       | 0,78                   | 0,0023                 | 8 500                   | 12 000           | 0,025  | 51103       |
|                         | 35 | 12  | 16,3                      | 27                         | 1                      | 0,0047                 | 6 700                   | 9 500            | 0,053  | 51203       |
| 20                      | 35 | 10  | 15,1                      | 29                         | 1,08                   | 0,0044                 | 7 500                   | 10 000           | 0,037  | 51104       |
|                         | 40 | 14  | 21,2                      | 37,5                       | 1,4                    | 0,0085                 | 6 000                   | 8 000            | 0,083  | 51204       |
| 25                      | 42 | 11  | 18,2                      | 39                         | 1,43                   | 0,0079                 | 6 300                   | 9 000            | 0,056  | 51105       |
|                         | 47 | 15  | 24,5                      | 50                         | 1,86                   | 0,015                  | 5 300                   | 7 500            | 0,11   | 51205       |
|                         | 52 | 18  | 34,5                      | 60                         | 2,24                   | 0,018                  | 4 500                   | 6 300            | 0,17   | 51305       |
|                         | 60 | 24  | 42,3                      | 67                         | 2,45                   | 0,048                  | 3 600                   | 5 000            | 0,34   | 51405       |
| 30                      | 47 | 11  | 19                        | 43                         | 1,6                    | 0,0096                 | 6 000                   | 8 500            | 0,063  | 51106       |
|                         | 52 | 16  | 25,1                      | 51                         | 1,86                   | 0,013                  | 4 800                   | 6 700            | 0,13   | 51206       |
|                         | 60 | 21  | 35,8                      | 65,5                       | 2,4                    | 0,026                  | 3 800                   | 5 300            | 0,26   | 51306       |
|                         | 70 | 28  | 70,2                      | 122                        | 4,5                    | 0,097                  | 3 000                   | 4 300            | 0,52   | 51406       |

## 1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 12 – 22 mm

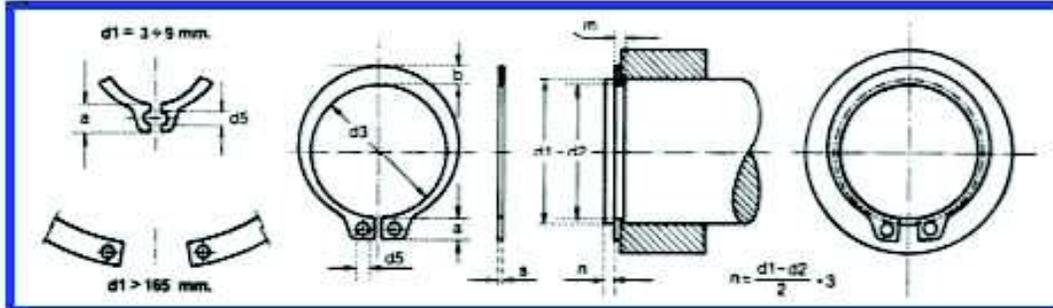


| Dimensiones principales |    |      | Capacidad de carga básica |                            | Carga límite de fatiga | Velocidades nominales   |                  | Masa   | Designación |
|-------------------------|----|------|---------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|------------------|--------|-------------|
| d                       | D  | B    | dinámica<br>C             | estática<br>C <sub>0</sub> | P <sub>L</sub>         | Velocidad de referencia | Velocidad límite |        |             |
| mm                      |    |      | kN                        |                            | kN                     | r. p. m.                |                  | kg     | -           |
| 12                      | 21 | 5    | 1,74                      | 0,915                      | 0,039                  | 70 000                  | 43 000           | 0,0063 | 61801       |
|                         | 24 | 6    | 2,91                      | 1,46                       | 0,062                  | 67 000                  | 40 000           | 0,011  | 61901       |
|                         | 28 | 8    | 5,4                       | 2,36                       | 0,1                    | 60 000                  | 38 000           | 0,021  | * 6001      |
|                         | 30 | 8    | 5,07                      | 2,36                       | 0,1                    | 60 000                  | 38 000           | 0,026  | 16101       |
|                         | 32 | 10   | 7,28                      | 3,1                        | 0,132                  | 50 000                  | 32 000           | 0,037  | * 6201      |
|                         | 37 | 12   | 10,1                      | 4,15                       | 0,176                  | 45 000                  | 28 000           | 0,06   | * 6301      |
| 15                      | 24 | 5    | 1,9                       | 1,1                        | 0,048                  | 60 000                  | 38 000           | 0,0065 | 61802       |
|                         | 28 | 7    | 4,36                      | 2,24                       | 0,095                  | 56 000                  | 34 000           | 0,016  | 61902       |
|                         | 32 | 8    | 5,85                      | 2,85                       | 0,12                   | 50 000                  | 32 000           | 0,03   | * 16002     |
|                         | 32 | 9    | 5,85                      | 2,85                       | 0,12                   | 50 000                  | 32 000           | 0,03   | * 6002      |
|                         | 35 | 11   | 8,06                      | 3,75                       | 0,16                   | 43 000                  | 28 000           | 0,045  | * 6202      |
|                         | 42 | 13   | 11,9                      | 5,4                        | 0,228                  | 38 000                  | 24 000           | 0,082  | * 6302      |
| 17                      | 26 | 5    | 2,03                      | 1,27                       | 0,054                  | 56 000                  | 34 000           | 0,0075 | 61803       |
|                         | 30 | 7    | 4,62                      | 2,55                       | 0,108                  | 50 000                  | 32 000           | 0,016  | 61903       |
|                         | 35 | 8    | 6,37                      | 3,25                       | 0,137                  | 45 000                  | 28 000           | 0,038  | * 16003     |
|                         | 35 | 10   | 6,37                      | 3,25                       | 0,137                  | 45 000                  | 28 000           | 0,038  | * 6003      |
|                         | 40 | 12   | 9,95                      | 4,75                       | 0,2                    | 38 000                  | 24 000           | 0,065  | * 6203      |
|                         | 40 | 12   | 11,4                      | 5,4                        | 0,228                  | 38 000                  | 24 000           | 0,064  | 6203 ETN9   |
| 20                      | 47 | 14   | 14,3                      | 6,55                       | 0,275                  | 34 000                  | 22 000           | 0,11   | * 6303      |
|                         | 62 | 17   | 22,9                      | 10,8                       | 0,455                  | 28 000                  | 18 000           | 0,27   | 6403        |
|                         | 32 | 7    | 4,03                      | 2,32                       | 0,104                  | 45 000                  | 28 000           | 0,018  | 61804       |
|                         | 37 | 9    | 6,37                      | 3,65                       | 0,156                  | 43 000                  | 26 000           | 0,037  | 61904       |
|                         | 42 | 8    | 7,28                      | 4,05                       | 0,173                  | 38 000                  | 24 000           | 0,05   | * 16004     |
|                         | 42 | 12   | 9,95                      | 5                          | 0,212                  | 38 000                  | 24 000           | 0,067  | * 6004      |
| 22                      | 47 | 14   | 13,5                      | 6,55                       | 0,28                   | 32 000                  | 20 000           | 0,11   | * 6204      |
|                         | 47 | 14   | 15,6                      | 7,65                       | 0,325                  | 32 000                  | 20 000           | 0,098  | 6204 ETN9   |
|                         | 52 | 15   | 16,8                      | 7,8                        | 0,335                  | 30 000                  | 19 000           | 0,14   | * 6304      |
|                         | 52 | 15   | 18,2                      | 9                          | 0,38                   | 30 000                  | 19 000           | 0,14   | 6304 ETN9   |
|                         | 72 | 19   | 30,7                      | 15                         | 0,64                   | 24 000                  | 15 000           | 0,41   | 6404        |
|                         | 50 | 14   | 14                        | 7,65                       | 0,325                  | 30 000                  | 19 000           | 0,13   | 62/22       |
| 56                      | 16 | 18,6 | 9,3                       | 0,39                       | 28 000                 | 18 000                  | 0,18             | 63/22  |             |

\* Rodamiento SKF Explorer

ANEXO A.4 CATÁLOGO DE ANILLOS DE SEGURIDAD PARA EJES

|   |   |                                     |
|---|---|-------------------------------------|
|  | <h2 style="margin: 0;">ANILLOS SEEGER PARA EJES</h2> <p style="margin: 0;">Anillos de Retención</p> | <h2 style="margin: 0;">DIN 471</h2> |
|---|---|-------------------------------------|



| Med.Nom. | ANILLO |        |                |               |     |     | RANURA  |       |               |
|----------|--------|--------|----------------|---------------|-----|-----|---------|-------|---------------|
|          | d1     | s h 11 | d3             | Tolerancia d3 | a = | b = | d5 Min. | d2    | Tolerancia d2 |
| 3        | 0,4    | 2,7    | +0,04<br>-0,15 | 1,9           | 0,8 | 1,0 | 2,8     | -0,04 | 0,50          |
| 4        |        | 3,7    |                | 2,2           | 0,9 |     | 3,8     |       |               |
| 5        | 0,6    | 4,7    | +0,06<br>-0,18 | 2,5           | 1,1 | 1,2 | 4,8     | -0,06 | 0,70          |
| 6        | 0,7    | 5,6    |                | 2,7           | 1,3 |     | 5,7     |       | 0,80          |
| 7        | 0,8    | 6,5    | +0,10<br>-0,36 | 3,1           | 1,4 | 1,5 | 6,7     | -0,11 | 0,90          |
| 8        |        | 7,4    |                | 3,2           | 1,5 |     | 7,6     |       |               |
| 9        | 1,0    | 8,4    | +0,13<br>-0,42 | 3,3           | 1,7 | 1,7 | 8,6     | -0,15 | 1,10          |
| 10       |        | 9,3    |                |               | 3,4 |     | 2,0     |       |               |
| 11       | 1,2    | 10,2   | +0,21<br>-0,42 | 3,9           | 2,2 | 2,0 | 10,5    | -0,21 | 1,30          |
| 12       |        | 11,0   |                |               |     |     | 4,0     |       |               |
| 13       | 1,5    | 11,9   | +0,25<br>-0,50 | 3,5           | 2,1 | 2,5 | 12,4    | -0,25 | 1,60          |
| 14       |        | 12,9   |                | 3,6           | 2,2 |     | 13,4    |       |               |
| 15       | 1,75   | 13,8   | +0,25<br>-0,50 | 3,7           | 2,2 | 2,5 | 14,3    | -0,25 | 1,85          |
| 16       |        | 14,7   |                | 3,8           | 2,3 |     | 15,2    |       |               |
| 17       | 1,75   | 15,7   | +0,25<br>-0,50 | 3,8           | 2,3 | 2,5 | 16,2    | -0,25 | 1,85          |
| 18       |        | 16,5   |                | 3,9           | 2,4 |     | 17,0    |       |               |
| 19       | 1,75   | 17,5   | +0,25<br>-0,50 | 4,0           | 2,6 | 2,5 | 18,0    | -0,25 | 1,85          |
| 20       |        | 18,5   |                | 4,1           | 2,7 |     | 19,0    |       |               |
| 21       | 1,75   | 19,5   | +0,25<br>-0,50 | 4,1           | 2,7 | 2,5 | 20,0    | -0,25 | 1,85          |
| 22       |        | 20,5   |                | 4,2           | 2,8 |     | 21,0    |       |               |
| 23       | 1,75   | 21,5   | +0,25<br>-0,50 | 4,2           | 2,8 | 2,5 | 22,0    | -0,25 | 1,85          |
| 24       |        | 22,2   |                | 4,3           | 2,9 |     | 22,9    |       |               |
| 25       | 1,75   | 23,2   | +0,25<br>-0,50 | 4,4           | 3,0 | 2,5 | 23,9    | -0,25 | 1,85          |
| 26       |        | 24,2   |                | 4,5           | 3,1 |     | 24,9    |       |               |
| 27       | 1,75   | 24,9   | +0,25<br>-0,50 | 4,6           | 3,1 | 2,5 | 25,6    | -0,25 | 1,85          |
| 28       |        | 25,9   |                | 4,7           | 3,2 |     | 26,6    |       |               |
| 29       | 1,75   | 26,9   | +0,25<br>-0,50 | 4,7           | 3,2 | 2,5 | 27,6    | -0,25 | 1,85          |
| 30       |        | 27,9   |                | 4,8           | 3,3 |     | 28,6    |       |               |
| 31       | 1,75   | 28,6   | +0,25<br>-0,50 | 5,0           | 3,4 | 2,5 | 28,6    | -0,25 | 1,85          |
| 32       |        | 29,6   |                | 5,2           | 3,6 |     | 29,3    |       |               |
| 33       | 1,75   | 30,5   | +0,25<br>-0,50 | 5,2           | 3,7 | 2,5 | 30,3    | -0,25 | 1,85          |
| 34       |        | 31,5   |                | 5,4           | 3,8 |     | 31,3    |       |               |
| 35       | 1,75   | 32,2   | +0,25<br>-0,50 | 5,4           | 3,8 | 2,5 | 32,3    | -0,25 | 1,85          |
| 36       |        | 33,2   |                | 5,6           | 3,9 |     | 33,0    |       |               |
| 37       | 1,75   | 34,2   | +0,25<br>-0,50 | 5,6           | 4,0 | 2,5 | 34,0    | -0,25 | 1,85          |
| 38       |        | 35,2   |                | 5,7           | 4,1 |     | 35,0    |       |               |
|          |        |        |                | 5,8           | 4,2 |     | 36,0    |       |               |

**ANEXO B**

**FOTOGRAFÍAS DE CONSTRUCCIÓN DEL  
PROTOTIPO**



Figura B-1 Corte de la barra rectangular Acero K100



Figura B-2 Corte del eje Acero AISI 1018



Figura B-3 Material Cortado listo para maquinar



Figura B-4 Seccionamiento de las 4 cuñas



Figura B-5 Desbastado con la Cepilladora



Figura B-6 Acabado superficial después de cepillado



Figura B-7 Fresa para desbaste



Figura B-8 Posicionamiento de las cuñas en la fresa



Figura B-9 Maquinado en la Fresadora



Figura B-10 Fresado de canal



Figura B- 11 Posicionamiento de cuñas en Torno



Figura B-12 Torneado de agujero interno en la Cuña



Figura B-13 Cuñas terminadas



Figura B-14 Torneado del eje

## **ANEXO C**

# **INFORMES DE ENSAYOS A PROBETAS ARROJADOS POR LA MÁQUINA UNIVERSAL**

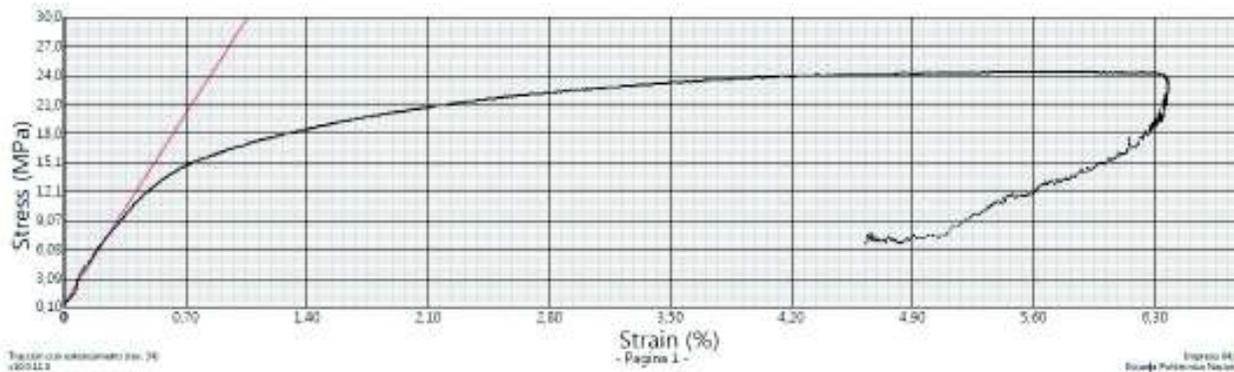
# ANEXO C.1 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F1

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D2009/ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (at Yield Stress)<br>% | Yield Stress<br>MPa | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|---|---------------------|-------------------|--------------------------|
| 32.41       | 6.27            | 6.32                    | 2744.38        | 154.17              | 24.39                  | 5.09                 | 4.66                                    | NF                  | NF                | NF                       |



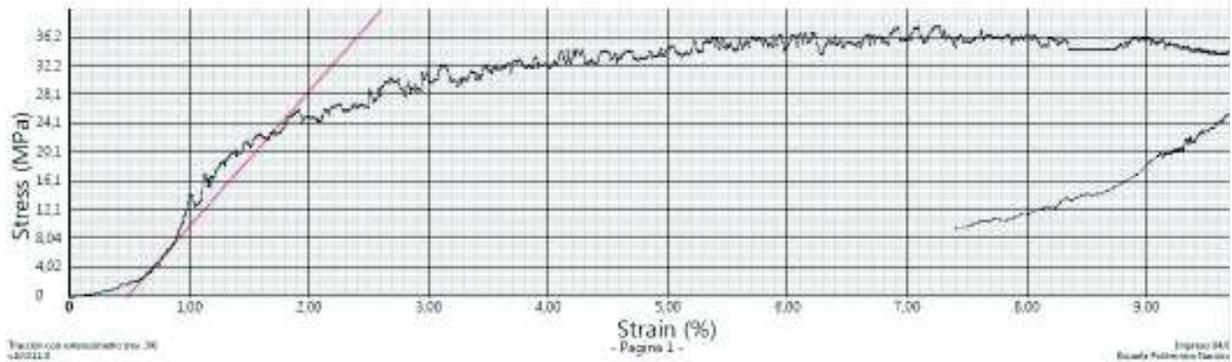
## ANEXO C.2 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F2

### LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3038-ASTM D638 Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (Avg) Yield Stress<br>% | Yield Stress<br>MPa | Yield Force - Yield<br>N |      |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|--|---------------------|--------------------------|------|
| 24.25       | 0.22            | 5.29                    | 1683.86        | 258.83              | 37.65                  | 7.26                 | 6.43                                     | 14.66               | 1.01                     | 75.0 |



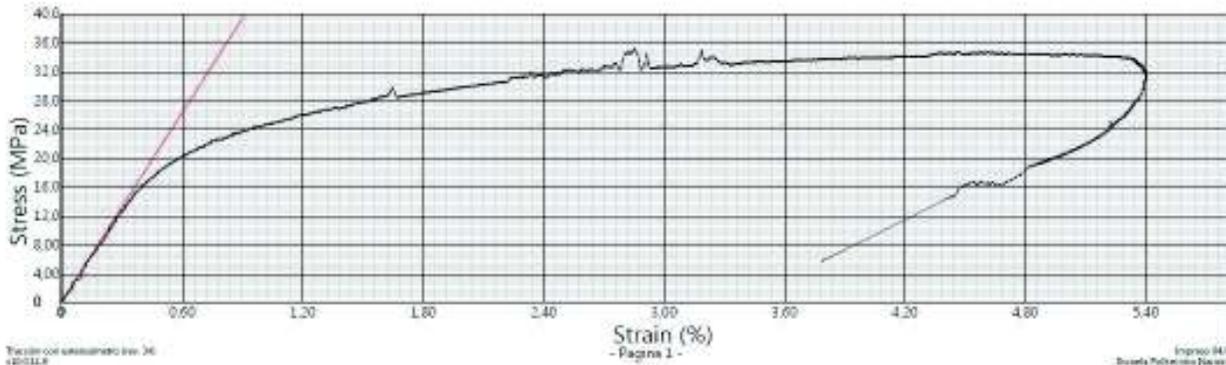
### ANEXO C.3 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F3

#### LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSOMETRO

ASTM D3059/ASTM D639 Tracción con extensómetro

Output Name:

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (At/Yield Stress)<br>% | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|---|-------------------|--------------------------|
| 22.42       | 5.22            | 5.15                    | 4356.62        | 181.63              | 35.24                  | 2.96                 | 4.81                                    | NT                | NT                       |



Tracción con extensómetro inv. 36  
4201114

Strain (%)  
- Pagina 1 -

Impreso 04/0  
Escuela Politécnica Javeriana

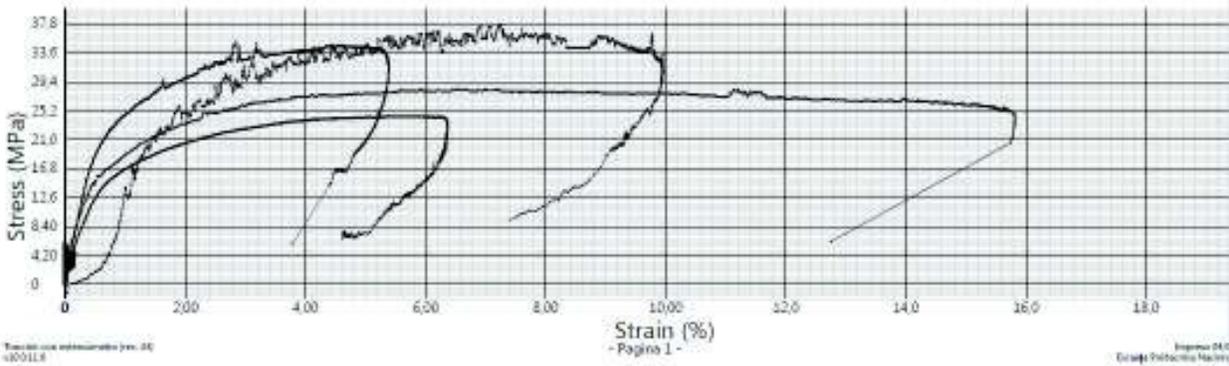
## ANEXO C.4 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F1, F2,F3 y F4

### LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSOMETRO

ASTM Dices ASTM Dices: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width (in) | Thickness (in) | Area (mm²) | Modulus (MPa) | Ultimate Force (N) | Ultimate Stress (MPa) | Ultimate Strain (%) | Total Elongation (mm) | Ult Yield Stress (MPa) | Yield Strain (%) | Yield Force - Yield (N) |
|------------|----------------|------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------|-------------------------|
| 23.97      | 5.95           | 146.24     | 329937.90     | 688.83             | 4.66                  | 0.04                | 0.12                  | 4.06                   | 0.0448           | 996                     |
| 23.97      | 5.95           | 146.24     | 6487.73       | 788.59             | 5.34                  | 0.04                | 0.04                  | 5.64                   | 0.0449           | 791                     |
| 24.62      | 6.06           | 147.72     | 6864.69       | 885.22             | 6.00                  | 0.05                | 0.05                  | 5.06                   | 0.05             | 899                     |
| 23.32      | 6.03           | 146.35     | 2195.21       | 649.69             | 4.56                  | 0.18                | 0.06                  | 4.26                   | 0.152            | 599                     |
| 23.41      | 6.27           | 6.32       | 2794.35       | 154.17             | 24.36                 | 5.06                | 4.66                  | NF                     | NF               | NF                      |
| 24.25      | 6.22           | 5.22       | 1883.86       | 303.63             | 27.65                 | 7.26                | 8.43                  | 14.66                  | 1.01             | 75.0                    |
| 22.43      | 6.22           | 5.15       | 4356.83       | 181.63             | 26.24                 | 2.66                | 4.01                  | NF                     | NF               | NF                      |
| 24.86      | 6.22           | 5.47       | NF            | 21.67              | 3.99                  | 0.00                | 0.00                  | NF                     | NF               | NF                      |
| 24.86      | 6.22           | 5.47       | 4683.38       | 155.24             | 28.26                 | 6.56                | 15.83                 | 14.77                  | 0.484            | 80.8                    |
| 24.25      | 6.22           | 5.33       | NF            | NF                 | NF                    | NF                  | NF                    | NF                     | NF               | NF                      |



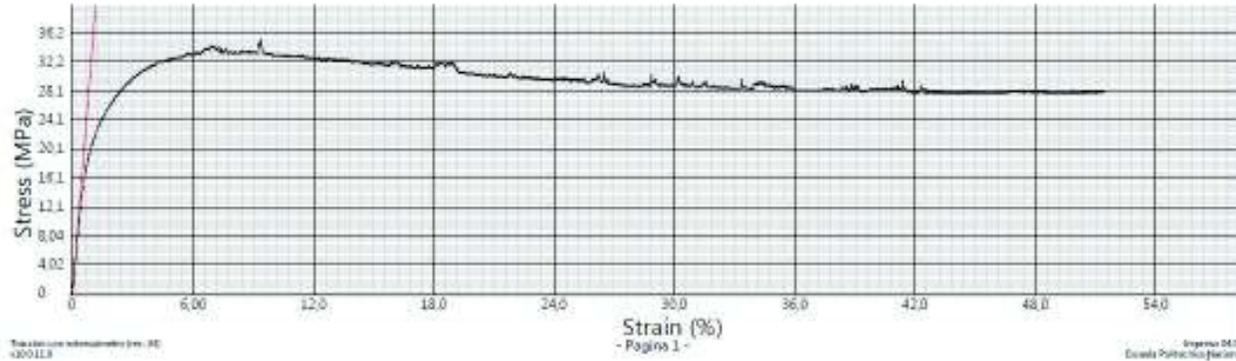
## ANEXO C.5 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F5

### LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM Code: ASTM Desc: Tracción con extensómetro

Output Name:

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation<br>% | Ultimate Stress<br>MPa | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|
| 24.16       | 0.22            | 0.32                    | 3493.99        | 188.67              | 38.06                  | 8.46                 | 81.00                 | NF                     | NF                | NF                       |



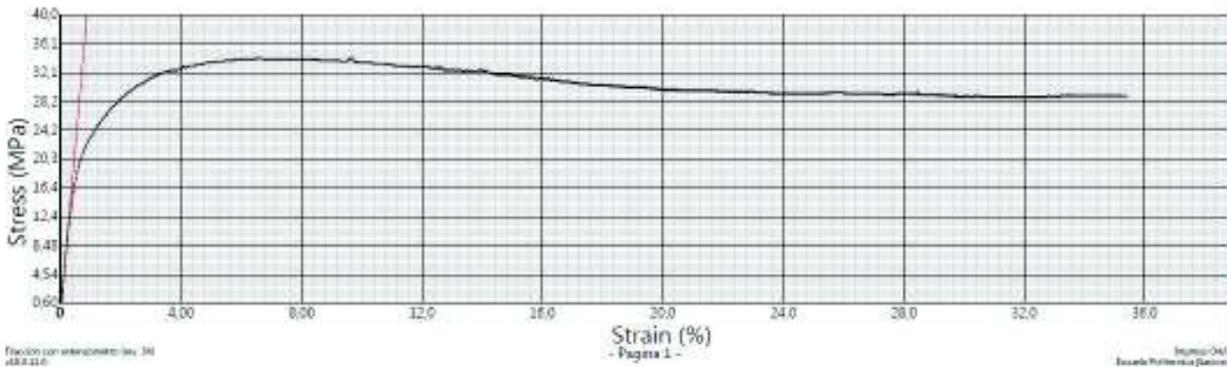
## ANEXO C.6 ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA F6

### LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3029 ASTM D639 Tracción con extensómetro

Output Name:

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (Austfield Stress)<br>% | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|--|-------------------|--------------------------|
| 24.88       | 0.22            | 5.47                    | 4702.96        | 195.67              | 34.10                  | 6.92                 | 25.46                                    | NF                | NF                       |



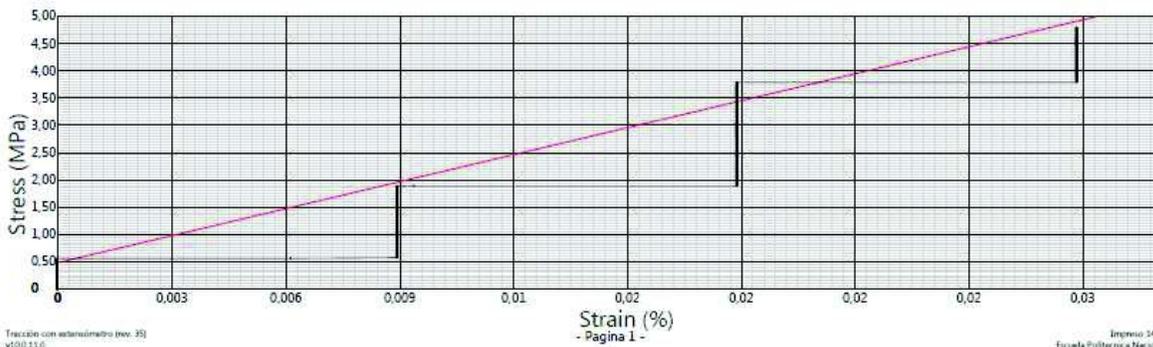
# ANEXO C.7 PRIMER ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS OFF AXIS

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (AutoYield Stress)<br>% | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|--|-------------------|--------------------------|
| 25.00       | 2.50            | 62.50                   | 16499.65       | 300.00              | 4.80                   | 0.03                 | 0.03                                     | N/F               | N/F                      |



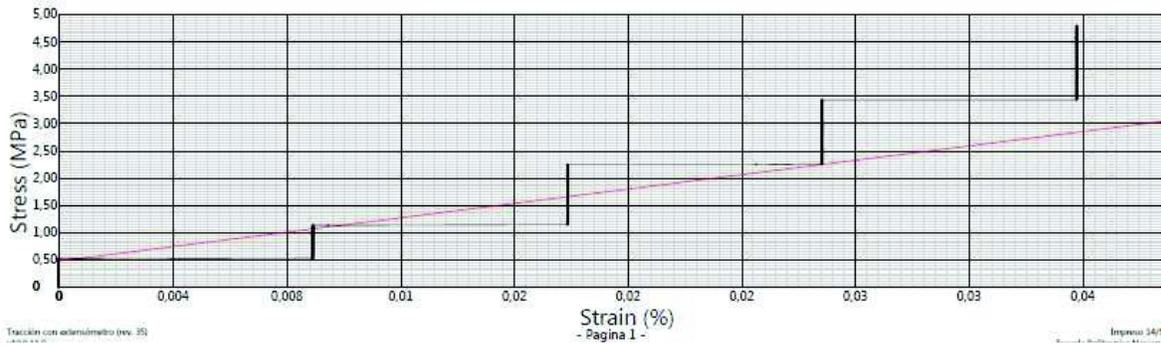
# ANEXO C.8 SEGUNDO ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS OFF AXIS

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (AutoYield Stress)<br>% | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|--|-------------------|--------------------------|
| 25,00       | 2,50            | 62,50                   | 6597,39        | 300,00              | 4,80                   | 0,04                 | 0,04                                     | N/F               | N/F                      |



Tracción con extensómetro (rev. 35)

- Pagina 1 -

Impreso 34/1

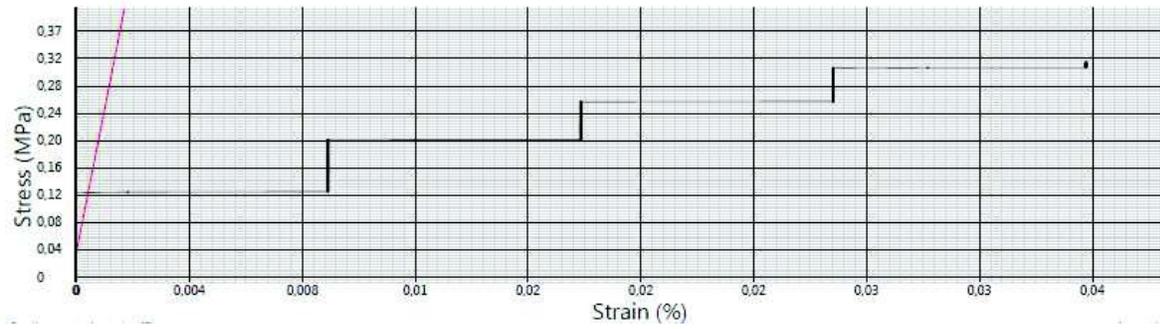
# ANEXO C.9 TERCER ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS OFF AXIS

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (AutoYield Stress)<br>% | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|--|-------------------|--------------------------|
| 25,00       | 50,00           | 1250,00                 | 21254,43       | 400,00              | 0,32                   | 0,04                 | 0,04                                     | N/F               | N/F                      |



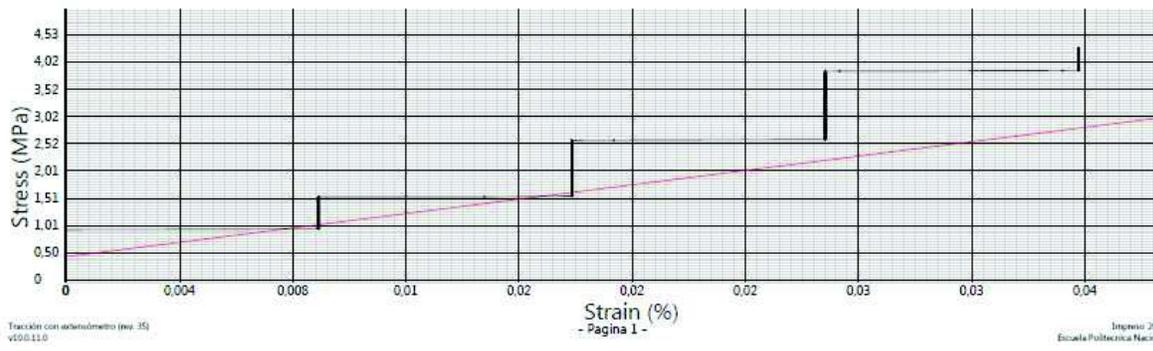
# ANEXO C.10 PRIMER ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS COMUNES

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation (%) | AutoYield Stress<br>MPa | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| 25,00       | 2,80            | 70,00                   | 6635,96        | 300,00              | 4,28                   | 0,04                 | 0,04                 | N/F                     | N/F               | N/F                      |



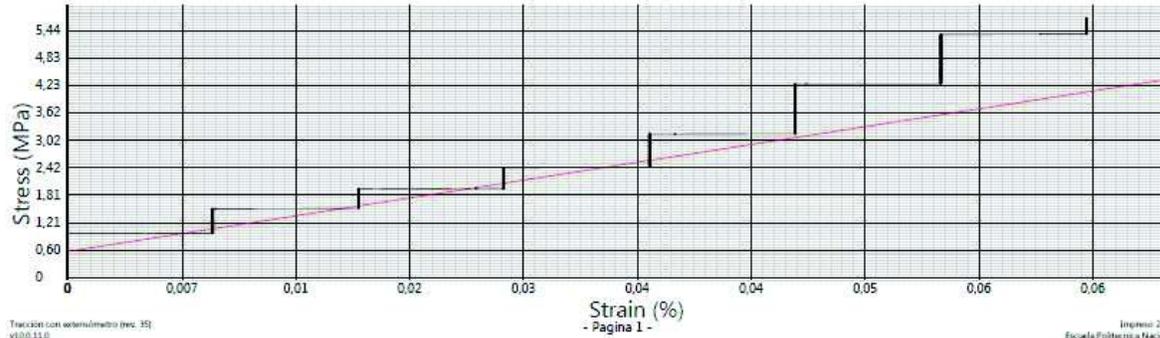
# ANEXO C.11 SEGUNDO ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS COMUNES

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name: Tracción con extensómetro

| Width mm | Thickness mm | Area mm <sup>2</sup> | Modulus MPa | Ultimate Force N | Ultimate Stress MPa | Ultimate Strain % | Total Elongation % | AutoYield Stress MPa | Yield Strain % | Yield Force - Yield N |
|----------|--------------|----------------------|-------------|------------------|---------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------|-----------------------|
| 25,00    | 2,60         | 70,00                | 5615,95     | 400,00           | 5,71                | 0,06              | 0,06               | N/F                  | N/F            | N/F                   |



Tracción con extensómetro (rec. 35)  
v1.0.0.11.0

- Pagina 1 -

Impreso: 20  
Escuela Politécnica Nacional

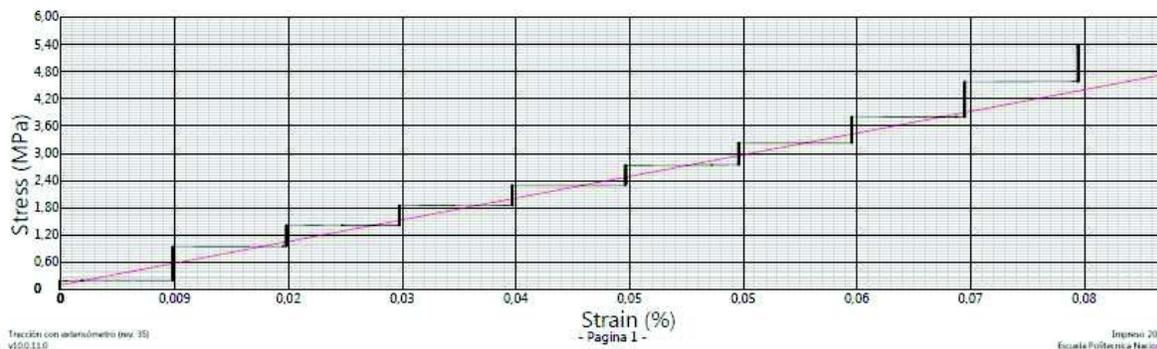
# ANEXO C.12 TERCER ENSAYO DE TRACCIÓN PROBETA DE MATERIAL COMPUESTO CON MORDAZAS COMUNES

## LABORATORIO DE NUEVOS MATERIALES TRACCIÓN CON EXTENSÓMETRO

ASTM D3039/ASTM D638: Tracción con extensómetro

Output Name:

| Width<br>mm | Thickness<br>mm | Area<br>mm <sup>2</sup> | Modulus<br>MPa | Ultimate Force<br>N | Ultimate Stress<br>MPa | Ultimate Strain<br>% | Total Elongation<br>% | AutoYield Stress<br>MPa | Yield Strain<br>% | Yield Force - Yield<br>N |
|-------------|-----------------|-------------------------|----------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|--------------------------|
| 25,00       | 2,80            | 70,00                   | 5316,10        | 400,00              | 5,71                   | 0,09                 | 0,09                  | NF                      | NF                | NF                       |



**ANEXO D**  
**PROTOCOLO DE PRUEBAS**

| <b>PROTOCOLO DE PRUEBAS</b><br><b>Mordazas de tracción oblicua off-axis para materiales compuestos con funcionalidad de acople a la</b><br><b>Máquina de laboratorio de esfuerzos de la FIM EPN</b> |  |                  |
|---|--|------------------|
| Empresa: Escuela Politécnica Nacional   | Verificador: Rodríguez J.; Vera Danny. |                  |
| Fecha: 17/08/2017   | Página: 1 de 1                         |                  |
| <b>Pruebas a realizar</b>   | <b>Cumple</b>                          | <b>No cumple</b> |
| <b>Verificación de Montaje</b>  |  |                  |
| Verificar que todos los elementos de la mordaza estén bien sujetos  | X                                      |                  |
| Verificar que el eje que sujetará la probeta gire con facilidad   | X                                      |                  |
| <b>Verificación de acoplamiento</b>   |  |                  |
| Verificar que las mordazas calcen dentro del cabezal.   | X                                      |                  |
| Verificar paralelismo entre las caras que sujetarán la probeta  | X                                      |                  |
| Verificar paralelismo entre las caras inclinadas del cabezal y de las mordazas  | X                                      |                  |
| <b>Pruebas de Sujeción</b>  |  |                  |
| Verificar que las mordazas sujeten firmemente un extremo de la probeta  | X                                      |                  |
| Verificar que el otro extremo de la probeta gire con facilidad respecto al extremo que está sujeto.   | X                                      |                  |
| Verificar que ambos extremos de la probeta estén sujetos firmemente   | X                                      |                  |
| <b>Pruebas de Tracción</b>  |  |                  |
| Verificar que la probeta no deslice dentro de las mordazas  | X                                      |                  |
| Verificar que la probeta falle dentro de la zona permitida  | X                                      |                  |
| <b>NOTAS:</b>   |  |                  |

**ANEXO E**  
**GUÍA DE PRÁCTICA**

## PRÁCTICA

### Ensayo de tracción off axis en probetas de material compuesto laminado

#### OBJETIVOS

- Evaluar el módulo de cizalladura de materiales compuestos laminados.
- Analizar el comportamiento de un material compuesto a tracción con fibras orientadas cierto ángulo.
- Trazar la curva esfuerzo en la dirección de la fibra – deformación angular para las probetas ensayadas.

#### REVISIÓN TEÓRICA

El ensayo de tracción off axis, está determinado para materiales compuestos ortotrópicos, en este caso compuestos por fibras orientadas cierto ángulo respecto al eje de acción de la fuerza, como se indica en la figura 1, lo cual determina un estado cortante el cual se debe analizar por su importancia en la falla de materiales. El ensayo tiene como objetivo determinar los esfuerzos cortantes como las deformaciones unitarias y angulares debido a la ubicación de las fibras.

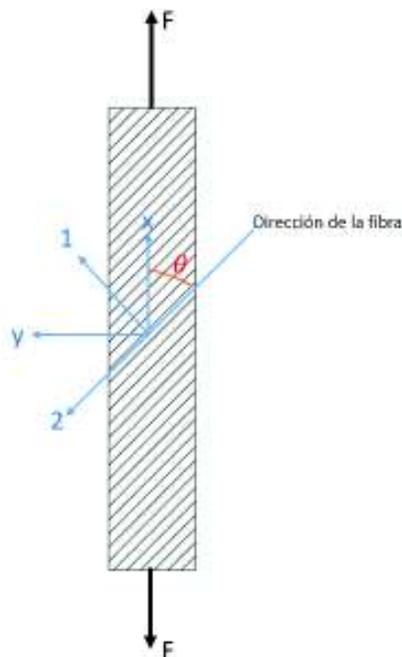


Figura 1. Esquema de la Probeta

La aplicación del ensayo se lo realiza bajo el parámetro de diseño de mordazas off axis, las cuales permiten reducir los momentos y los esfuerzos producidos en los agarres de las mismas.

Como se indica en la figura 2, la curva esfuerzo – deformación angular, es la que se construye con los datos obtenidos de deformaciones unitarias proporcionados por las galgas, las cuales tienen una configuración de roseta de 45° como se indica en la figura 3, para posteriormente hallar el módulo de cizalladura el material.

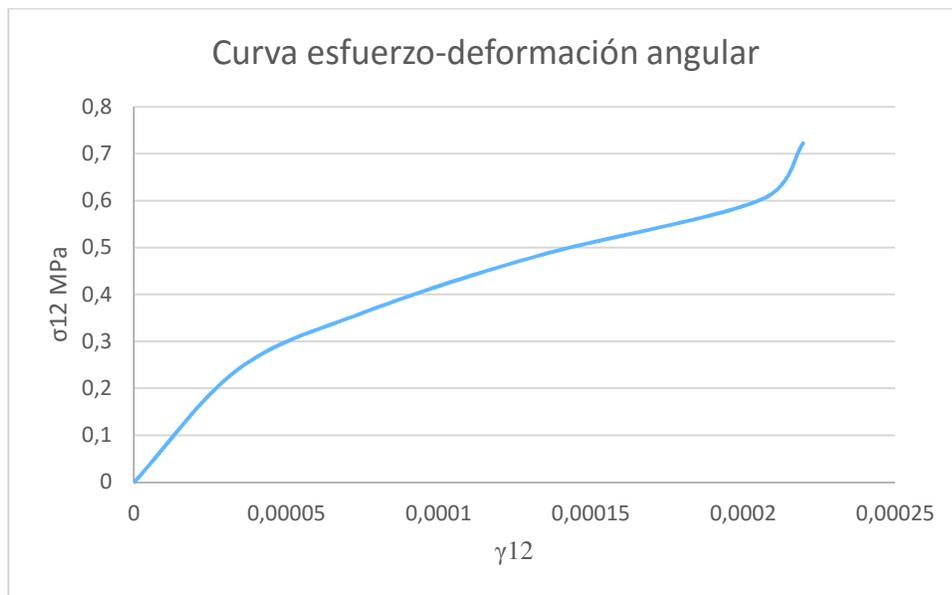


Figura 2. Curva esfuerzo-deformación angular en la dirección de las fibras

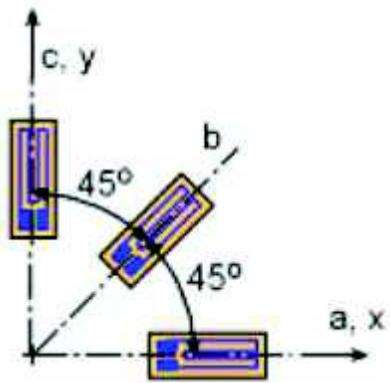


Figura 3. Roseta de deformación a 45°

## NORMAS

La norma que rige este tipo de ensayo de tracción en materiales compuestos es:

- ASTM D3039 / D3039M -17  
Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

## MATERIALES Y EQUIPOS

### Materiales

- Probeta normalizada (ASTM D3039)
- Rosetas de deformación a 45° (120 Ω)
- Pegamento de secado rápido (Loctite)
- Pegamento epoxy resin
- Pinzas
- Guantes
- Tinher

### Equipos

- Máquina universal de ensayos (Tinius Olsen)

- Mordazas off axis
- Medidor de deformaciones unitarias

## PROCEDIMIENTO

1. Preparar la superficie de la probeta, limpiando con tinher el lugar donde se colocará la roseta.
2. Pegar la roseta de deformación con loctite ubicando correctamente los ejes de las tres galgas.
3. Soldar los cables a las galgas de ser necesario.
4. Colocar sobre la roseta soldada y pegada una capa de pegamento epoxi-resin y dejar secar durante 24 horas.
5. Conectar los cables de la roseta al medidor de deformaciones.
6. Colocar las mordazas off axis en el cabezal de la máquina universal de ensayos.
7. Tomar las medidas de la probeta.
8. Colocar las probetas dentro de las mordazas.
9. Determinar la velocidad de tracción de 0,5 mm/min a 2 mm/min
10. Encender la máquina universal
11. Encerar la carga
12. Iniciar el ensayo
13. Tomar las medidas de deformación en las tres direcciones cada 50 N.
14. Evaluar los resultados obtenidos

## TABLA DE DATOS

Los valores de carga se obtienen de la máquina universal y los de deformación se obtienen del medidor de deformaciones unitarias de manera simultánea.

Tabla 1. Datos de fuerza y deformación

| FUERZA N | Ea | Eb | Ec |
|----------|----|----|----|
|          |    |    |    |
|          |    |    |    |
|          |    |    |    |

Donde:

Ea: Deformación unitaria en la dirección de la fuerza.

Eb: Deformación unitaria en la dirección transversal.

Ec: Deformación unitaria en la dirección 45°.

## CÁLCULOS

1. Esfuerzo cortante en el plano xy

$$\gamma_{xy} = 2 \epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c$$

2. Esfuerzo en la dirección de la fuerza.

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

3. Esfuerzo en la dirección de la fibra

$$\sigma_{12} = \sigma_x \operatorname{sen}\theta \cos\theta$$

4. Deformación angular en la dirección de la fibra

$$\gamma_{12} = (\epsilon_y - \epsilon_x) \operatorname{Sen}2\theta + \gamma_{xy} \operatorname{Cos}2\theta$$

5. Módulo de cizalladura.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}}$$

## TABLA DE RESULTADOS

Tabla 2. Resultados obtenidos ensayo off axis

| F [N] | Espesor t [mm] | Ancho b [mm] | Area [mm] <sup>2</sup> | $\gamma_{xy}$ | $\sigma_x$ [MPa] | $\sigma_{12}$ [MPa] | $\gamma_{12}$ |
|-------|----------------|--------------|------------------------|---------------|------------------|---------------------|---------------|
|       |                |              |                        |               |                  |                     |               |
|       |                |              |                        |               |                  |                     |               |
|       |                |              |                        |               |                  |                     |               |
|       |                |              |                        |               |                  |                     |               |
|       |                |              |                        |               |                  |                     |               |

## REFERENCIAS

1. ASTM D3039 / D3039M -17

“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”

**ANEXO F**  
**PLANOS**