



**ANALISIS DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA EL
REEMPLAZO DE LA MADERA EN LA FABRICACION DE
CRUCETAS PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCION EN
MEDIA TENSION DE LA ANDE.**

MOISES BRITTEZ IGLESIA

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2018

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE MATERIALES PARA EL
REEMPLAZO DE LA MADERA EN LA FABRICACIÓN DE
CRUCETAS PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN
MEDIA TENSIÓN DE LA ANDE.

Elaborado por:

MOISES BRITIZ IGLESIA

Tutor:

Ing. Fredy Ramírez Villanueva

Trabajo presentado a la Facultad de Ciencias y Tecnología de la
Universidad Nacional de Caaguazú, como requisito para la obtención del
título de Ingeniero en Electricidad

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZU
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2018

Página de aprobación

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electricista aprobado en representación de la Facultad Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el Tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Dedicado a:

Mi madre.

Agradecimientos

A mis orientadores, Ing. Fredy Ramírez por su predisposición y ayuda incondicional. Ing. Cesar Ferreira por su instrucción y asesoramiento en general.

A mis profesores, Msc. José Velázquez por la asesoría en el análisis de datos estadísticos. A los profesores Eduardo Giangreco y Alejandro Peruzzi por su grato recibimiento en los laboratorios de materiales de la FP-UNA.

Al alumno y amigo Richart Barrios por su innegable ayuda técnica en la fabricación de probetas.

Al Instituto de Tecnología (LACTEC), que a pesar de la diferencia regional concibieron la realización de los ensayos eléctricos.

A la Universidad Nacional del Caaguazú y a la Facultad de Ciencias y Tecnologías por las oportunidades y a todos los colegas y profesores que directa o indirectamente colaboraron en la realización de este proyecto.

Resumen

En la presente investigación se evaluaron materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio unidireccional y manta cortada, con el fin de utilizarse como crucetas de distribución eléctrica. Se efectuaron ensayos de tracción según la norma ASTM-D3039, a partir de los datos obtenidos se procedió a la realización de cálculos mecánicos de flexión, proponiéndose cinco modelos de crucetas, estos cálculos fueron corroborados en un marco de simulación utilizando el software ANSYS Student basado en elementos finitos. Se realizaron ensayos de trillamiento eléctrico según norma NBR-10296, de estos resultados se proponen ajustes en los parámetros de fabricación para el cumplimiento. Por último se plantea un presupuesto de toda la investigación tal que pueda repetirse con diferentes parámetros de estos materiales.

Palabras claves: Compuestos, Fibra de vidrio, Crucetas, Método de elementos finitos, Trillamiento eléctrico.

Abstract

In the present research, composite materials reinforced with unidirectional glass fiber and chopped strand mat glass fiber were evaluated, to be used as electric distribution crossheads. Tensile tests has been done according to ASTM-D3039, based on the data obtained, mechanical bending calculations were carried out, five crosshead models has been proposed, these calculations were corroborated in a simulation framework using the ANSYS Student software based on finite element method. Electric insulation tests has been done according to NBR-10296, from these results, adjustments are proposed in the manufacturing parameters for compliance. Finally, a budget of all the research is proposed in such a way that it can be repeated with different parameters of those materials.

Key words: Glass fiber, Reinforced composites, Crossheads, Finite element analysis, Electric tracking.

Índice general

1. Introducción	1
I Revisión Bibliográfica	3
2. Estructuras	5
2.1. Cálculo mecánico de cables	5
2.2. Apoyos	7
2.3. Crucetas	7
2.4. Crucetas de madera	8
2.4.1. Ensayos realizados a las crucetas de madera	9
2.5. Crucetas Poliméricas	10
2.5.1. Características mecánicas	10
2.5.2. Ensayo de resistencia a absorción de agua	12
2.5.3. Ensayo de resistencia a la propagación de las llamas	12
3. Características eléctricas de materiales aislantes	13
3.1. Aplicaciones	15
3.2. Nivel de impulso básico del aislamiento (BIL)	16
3.2.1. Obtención del BIL para aislantes y estructuras	17

3.3.	Trillamiento o arborescencia eléctrica	17
3.3.1.	Ensayos de resistencia al trillamiento eléctrico	19
4.	Mecánica de sólidos	21
4.1.	Esfuerzos y deformaciones	21
4.1.1.	Esfuerzo simple	21
4.1.2.	Deformación simple	23
4.1.3.	Esfuerzos límites	24
4.1.4.	Ley de Hooke o coeficiente de elasticidad	26
4.2.	Flexión	26
4.2.1.	Curvatura	31
4.3.	Análisis de elementos finitos	33
4.3.1.	Traslación	34
4.3.2.	Deformación normal	35
4.3.3.	Deformación angular o cortante	37
4.3.4.	Campo de deformaciones e interpolación	39
4.3.5.	Ecuación de equilibrio de un elemento	41
4.3.6.	Ecuación de equilibrio del conjunto	44
4.3.7.	Aplicaciones	45
II	Resumen Ejecutivo	47
5.	Resumen Ejecutivo	49
5.1.	Descripción del trabajo	49
5.1.1.	Métodos y Técnicas utilizadas	49

5.2. Justificación	50
5.3. Finalidad del proyecto	50
5.4. Metas	51
5.5. Objetivos	51
5.5.1. Objetivos generales	51
5.5.2. Objetivos específicos	51
5.6. Beneficiarios	52
5.7. Producto	52
5.8. Especificaciones de actividades y tareas realizadas	52
5.9. Recursos necesarios	53
5.9.1. Recursos humanos	53
5.9.2. Recursos materiales	53
5.10. Factibilidad económica	54
5.10.1. Costos	54
III Ingeniería de Diseño	57
6. Materiales Compuestos	59
6.1. Propiedades mecánicas	62
6.1.1. Fracción volumétrica de fibra	64
7. Cálculos mecánicos	65
7.1. Ensayos de tracción	65
7.1.1. Procedimientos y resultados	67
7.2. Cálculos de flexión	70
<hr/>	
Moises Britez	IX

7.3. Comprobación por el método de los elementos finitos	74
7.4. Criterios de falla	77
8. Resistencia al trillamiento eléctrico y erosión bajo condiciones ambientales severas	79
8.1. Procedimientos y resultados	80
IV	83
9. Resultados y Discusión	85
10. Conclusiones	87
11. Recomendaciones	89
Apéndice	89
A. Estudios mecánicos	91
A.1. Fabricación de probetas	91
A.2. Análisis de los datos	96
A.3. Resultados de ANSYS	97
A.3.1. Modelado geométrico	97
A.3.2. Deformación direccional sobre el eje y (path), a carga nominal . . .	98
A.3.3. Deformación direccional (eje y) sobre toda la barra	101
A.3.4. Esfuerzos normales (σ_x) a carga de ruptura	103
A.3.5. Esfuerzos normales (σ_y) a carga de ruptura	105
A.3.6. Esfuerzos normales (σ_z) a carga de ruptura	108

A.3.7. Esfuerzos transversales puntuales (σ_y) sobre linea de muestreo . . .	110
A.3.8. Esfuerzos transversales puntuales (σ_z) sobre linea de muestreo . . .	113
B. Estudios eléctricos	117
B.1. Realización de probetas para ensayo de tracking eléctrico	117
Referencias	117

Lista de abreviaturas

ANDE - Administración Nacional de Electricidad
FEM - Finite element method
CSM - Chopped Strand Mat
UD - Unidireccional
ASTM - American Society for Testing and Materials
ABNT - Asociación Brasileña de Normas Técnicas
NBR - Norma Brasileira
BIL - Basic Insulation Level
CAD - Computer-aided design
UTS - Ultimate tensile strength
kV - Kilo voltio
mm - milímetro
 Ω/cm - Ohm por centímetro
 σ - Esfuerzo
 σ_x - Esfuerzo normal en el eje x
 σ_y - Esfuerzo normal en el eje y
 σ_z - Esfuerzo normal en el eje z
 σ_{max} - Esfuerzo máximo admisible
 ε - Deformación unitaria
 δ - Deformación total
 γ - Deformación angular
 E - Módulo de elasticidad
 ρ - Radio de curvatura
 M - Momento flexionante
 M_{max} - Máximo momento flexionante
 I - Momento de inercia
 τ - Esfuerzo cortante
 ν - Coeficiente de Poisson
 \mathbf{q}_v - Fuerzas exteriores de volumen
 \mathbf{q}_s - Fuerzas exteriores de superficie.
 \mathbf{q}_c - Fuerzas de contorno en un elemento finito
 \mathbf{P}_N^e - Fuerzas exteriores puntuales
 \mathbf{K}^e - Matriz de rigidez de un elemento finito
 \mathbf{K} - Matriz de rigidez de la estructura

Glosario de términos

Flecha: Medida del desplazamiento vertical de un punto respecto a su posición original.

Estructuras: Conjunto de elementos fijos compuesto por columnas de hormigón armado, crucetas, soportes y aisladores, sobre la cual se apoyan las líneas aéreas.

Curado: Consiste en propiciar y mantener un ambiente de apropiada temperatura y contenido de humedad en el plástico, de modo que éste desarrolle el potencial de las propiedades que se esperan de él.

Adecentar: Limpiar u ordenar una cosa o lugar.

Polimerización: Proceso mediante el cual las moléculas simples, iguales o diferentes, reaccionan entre sí por adición o condensación y forman otras moléculas de peso doble, triple, etc.

Índice de tablas

2.1. Esfuerzos admisibles en los ensayos mecánicos	9
5.1. Costo total de la investigación	55
6.1. Criterios para la selección de materiales a ser analizados	60
6.2. Composición química de la fibra de vidrio tipo E	61
6.3. Propiedades mecánicas usuales de compuestos fibra y resina polimérica . .	64
7.1. Valores estadísticos de los resultados del ensayo de tracción	68
7.2. Geometrías propuestas	74
7.3. Unidades utilizadas del sistema métrico	75
7.4. Principales resultados del análisis por FEM	77
8.1. Ensayo a muestra 1	81
8.2. Ensayo a muestra 2	81
A.1. Obtención del porcentaje volumétrico	92
A.2. Mediciones de las muestras de CSM	93
A.3. Mediciones de las muestras con refuerzo UD 0°	93
A.4. Mediciones de las muestras con refuerzo UD 90°	94
A.5. Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo CSM)	96

A.6. Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo UD 0°)	96
A.7. Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo UD 90°)	96
B.1. Obtención del porcentaje volumétrico	117

Índice de figuras

2.1. Fuerzas de tensiones presentes en los cables.	6
2.2. Momentos resultantes de las fuerzas dadas en los cables.	6
3.1. Madero sometido a altas tensiones	18
4.1. Sección de la barra adecuada a la carga sometida	22
4.2. Diagrama esfuerzo-deformación	24
4.3. Limite aparente de proporcionalidad	25
4.4. Cuerpo sometido a flexión	27
4.5. Fuerzas que actúan sobre un Elemento de area diferencial de la sección recta	29
4.6. Elemento lineal sometido a flexión	31
4.7. Elemento tridimensional	33
4.8. Plano xy del elemento 4.7	34
4.9. Deformación debido al esfuerzo σ_x	36
4.10. Deformaciones debido a los esfuerzos σ_x y σ_y	37
4.11. Deformaciones angulares	38
4.12. Fuerzas actuantes sobre un elemento finito	41
6.1. Tipos de fibra de vidrio	60
6.2. Método del laminado manual	62

6.3.	Curva esfuerzo-deformación para la matriz, la fibra y el compuesto.	63
7.1.	Dimensiones de las muestras para ensayo de tracción	66
7.2.	Maquina de tracción universal	67
7.3.	Curvas esfuerzo deformación de los compuestos analizados	69
7.4.	Aplicación de las fuerzas flexionantes, modelo equivalente	70
7.5.	Diagrama de momento flector	71
7.6.	Geometría transversal de la cruceta de distribución	72
7.7.	d versus h bajo criterios de deformación y ruptura	73
7.8.	Mallado por el método tetraédrico, corte transversal	76
7.9.	Distribución de esfuerzos normales σ_y	78
8.1.	Esquema del conjunto de ensayo de resistencia al trillamiento	80
A.1.	Pesajes en la fabricación del compuesto UD	91
A.2.	Pesajes en la fabricación del compuesto CSM	91
A.3.	Muestras para ensayos mecánicos	92
A.4.	Rupturas de las muestras en ensayo de tensión	95
A.5.	Modelado geométrico de las crucetas	97
A.6.	Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, CSM-11	98
A.7.	Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, CSM-11.5	98
A.8.	Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-9	99
A.9.	Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-10	99
A.10.	Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-11	100
A.11.	Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, CSM-11 .	101
A.12.	Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, CSM-11.5	101

A.13.	Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-9 . . .	101
A.14.	Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-10 . . .	102
A.15.	Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-11 . . .	102
A.16.	Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), CSM-11	103
A.17.	Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), CSM-11.5	103
A.18.	Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-9	103
A.19.	Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-10	104
A.20.	Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-11	104
A.21.	Distribución de esfuerzos normales σ_x	105
A.22.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), CSM-11	105
A.23.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), CSM-11.5	106
A.24.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-9	106
A.25.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-10	106
A.26.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-11	107
A.27.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), CSM-11	108
A.28.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), CSM-11.5	108
A.29.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-9	108
A.30.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-10	109
A.31.	Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-11	109
A.32.	Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11	110
A.33.	Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11	110
A.34.	Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11.5	111
A.35.	Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-9	111
A.36.	Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-10	112

A.37.Linea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-11	112
A.38.Linea de muestreo (σ_z) respecto a x , CSM-11	113
A.39.Linea de muestreo (σ_z) respecto a x , CSM-11.5	113
A.40.Linea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-9	114
A.41.Linea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-10	114
A.42.Linea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-11	115
B.1. Pesaje de la fibra y el compuesto terminado	118
B.2. Muestras para ensayo NBR-10296	118

Capítulo 1

Introducción

Las estructuras aéreas de distribución de energía eléctrica constan de elementos individualmente indispensables para el funcionamiento del sistema, encontramos materiales como el acero, concreto y madera, este último es utilizado como crucetas que sostienen las líneas. Una problemática yace en la descomposición de este material orgánico bajo efectos de la intemperie, otro dilema son las leyes ambientales que rigen en el país los cuales limitan el uso de especies arbóreas nativas.

La presente investigación analiza materiales alternativos con la finalidad de emplearlas como reemplazos de la madera. Esto mejorará razonablemente el comportamiento del sistema de distribución en base a una política amigable con el ambiente.

Se caracterizaron experimentalmente materiales compuestos, modelándose luego en un escenario de simulaciones como crucetas de media tensión trifásicas.

En la parte I del trabajo se realiza una extensa revisión bibliográfica en donde se consideran temas de estructuras, tipos de crucetas, propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales y conceptos básicos sobre el método de los elementos finitos.

En el capítulo 6 se seleccionan los materiales compuestos con refuerzos de fibra de vidrio en disposición unidireccional y aleatoria cortada, en matriz de poliéster, para la realización de estudios experimentales y numéricos. Esta selección obedece al buen comportamiento de este material como también su bajo costo.

En el capítulo 7 se realizan los experimentos mecánicos, ensayos de tracción conforme norma ASTM-D3039, estos logran caracterizar los mencionados materiales en cuanto a su elasticidad y resistencia, con cálculos basados en ingeniería de materiales, específicamente

de flexión, se llega a proponer cinco geometrías de crucetas, que luego son contrastadas cada una en un análisis numérico en el programa ANSYS Student.

Por último en el capítulo 8 se presentan los resultados de los experimentos eléctricos en laboratorios de alta tensión con lo que se llega a conocer la resistencia al trillamiento eléctrico de estos materiales bajo condiciones de contaminación.

Parte I

Revisión Bibliográfica

Capítulo 2

Estructuras

2.1. Cálculo mecánico de cables

Un cable que cuelga bajo la acción de su propio peso (W) está sometido a fuerzas de tracción dirigidas según la tangente a la curva que forma. Considerando un trozo de cable desde el punto más bajo de la curva C hasta otro punto D (figura 2.1). La tensión en C es una fuerza horizontal T y en D una fuerza T_d tangente al cable en ese punto. Como el trozo de cable está en equilibrio, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él es nula. De aquí se obtienen las siguientes relaciones:

$$T_d = \sqrt{T^2 + P^2} \quad (2.1)$$

$$T_d \cos \phi = T \quad (2.2)$$

$$T_d \sin \phi = P \quad (2.3)$$

$$\tan \phi = \frac{P}{T} \quad (2.4)$$

De estas relaciones se deduce que la tensión horizontal T es constante en todos los puntos, y que la tensión T_d es mínima en el punto más bajo y máxima en uno de los dos soportes.

El cable que cuelga por su propio peso está sometido a una carga distribuida a lo largo de su longitud. Si la carga se considera distribuida a lo largo de una línea horizontal, designando por p el peso por unidad de longitud horizontal y tomando el origen de unos ejes de coordenadas en el punto más bajo C del cable (figura 2.1), la carga total que soporta el cable entre C y otro punto D de coordenadas (x, y) es $P = px$. Las siguientes relaciones definen la tensión y su dirección en D :

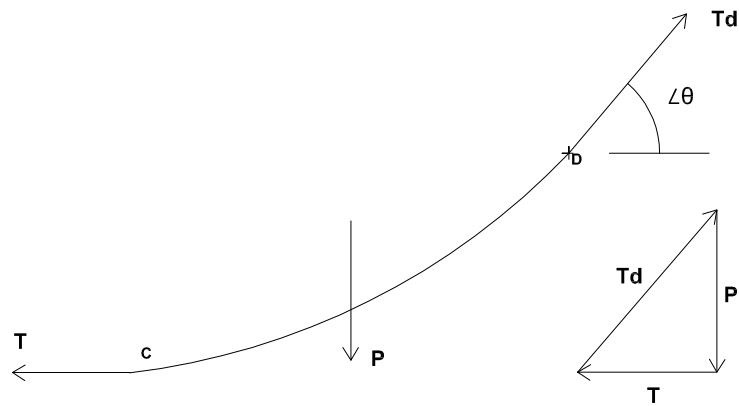


Figura 2.1: Fuerzas de tensiones presentes en los cables.

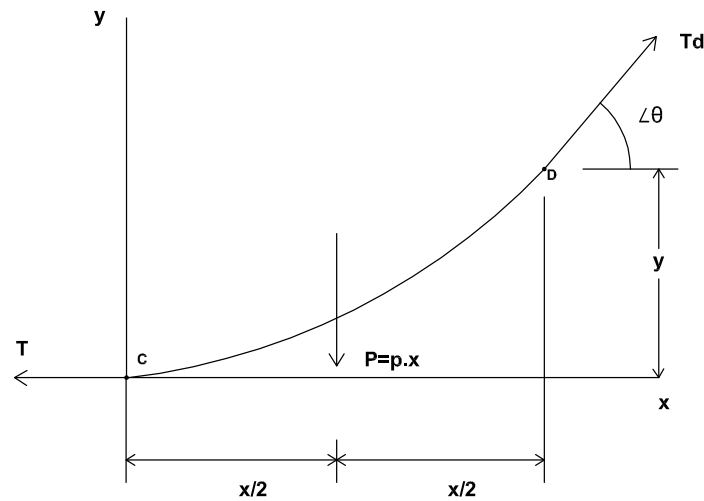


Figura 2.2: Momentos resultantes de las fuerzas dadas en los cables.

$$T_d = T^2 + p^2 x^2$$

$$\tan \phi = \frac{px}{T}$$

Como la porción de cable está en equilibrio la suma de momentos de las fuerzas que actúan sobre él, respecto a un punto debe ser cero. Tomando momentos respecto a D :

$$px \frac{x}{2} - Ty = 0$$

$$y = \frac{px^2}{2T}$$

Esta es la ecuación de una parábola de eje vertical con vértice en el origen de coordenada [28].

Estas expresiones son utilizadas para la elaboración de las normas y especificaciones técnicas de la cruceta de distribución pues describen las acciones de las fuerzas que soportan en servicio.

2.2. Apoyos

Son los elementos de la línea aérea que soportan los conductores y demás elementos de la línea separándolos del terreno.

- Según el tipo de material, pueden ser: a) Madera en algunos casos de eucalipto b) Hormigón armado, fabricado con distintas técnicas, preferentemente vibrado c) Metálicos de acero, de forma tubular. En otros países se utilizan actualmente apoyos de fibra de vidrio.
- Según la función de los apoyos en la línea, estos se clasifican en: a) Apoyo de suspensión, tipo 1 y 2 [2] b) apoyo de amarre con cadena de aislamiento de amarre no es utilizado c) Apoyo de anclaje, con cadena de aislamiento de amarre, que proporciona un punto fijo a la línea, tipo 4, 5 y 6 [2] d) Apoyo de principio y fin de línea, con cadena de aislamiento de amarre, que soportan las tensiones de toda la línea, tipo 5 [2] e) apoyos especiales, de función diferente a los anteriores.
- Atendiendo a su posición relativa, respecto al trazado de la línea: a) apoyo de alineación, usado en tramo rectilíneo de la línea, con aisladores triple campana b) apoyo de ángulo, usado en ángulo del trazado de una línea, con aisladores triple campana de ambos lados.

2.3. Crucetas

Se puede definir como los elementos que generan un soporte horizontal estable al tendido eléctrico sobre el apoyo vertical. Los soportes a los cuales están sujetas las crucetas deberán presentar características satisfactorias de resistencia mecánica y durabilidad, así como facilidad de fijación y de remoción del equipamiento según [3]. Las crucetas podrán ser de concreto, de acero o de madera adecuada y tratada contra acción de la intemperie. Los accesorios de fijación serán de acero.

Las crucetas y accesorios de fijación serán dimensionados para resistir a la resultante de los esfuerzos mecánicos provenientes de la aplicación de los conductores, más el desequilibrio resultante de la ruptura de línea, en el caso más desfavorable [3].

2.4. Crucetas de madera

Según [23] las características de las crucetas de madera admisibles por la ANDE son las siguientes:

- **Dimensiones:** Las dimensiones deberán ser las indicadas en los diseños adjuntos a la especificación técnica y deberán estar dentro de los rangos de tolerancia establecidas en el siguiente ítem. Las dimensiones en pulgadas se especifican a efectos de denominación de las crucetas; para la verificación dimensional deberán ser tenidas en cuenta las dimensiones en milímetros correspondientes establecidas en los diseños.
- **Tolerancias:** Establecidos el formato y las dimensiones de las crucetas, se admitirán las siguientes tolerancias:
 - ± 10mm, en la longitud.
 - ± 3mm, para la distancia entre agujeros, y entre y extremos.
 - ± 5mm, para las dimensiones transversales.
 - ± 1mm, para el diámetro de los agujeros.
- **Agujeros:** Deberán ser cilíndricos y deberán estar totalmente libres de obstrucciones. Los ejes de los agujeros deberán ser perpendiculares a los planos de las caras en las que son practicados, y deberán pasar por el eje longitudinal de la cruceta. Además los ejes de los agujeros deberán ser perpendiculares al eje de la cruceta, y rectilíneos en toda su extensión. Los agujeros deberán ser practicados recién después del proceso de secado, o sea estando la cruceta en estado seco.
- **Terminación superficial:** Las crucetas deberán ser obtenidas por acerrado y cepillado. Las superficies de la cruceta deberán ser planas. No deberán presentar irregularidades superficiales excesivas debido al cepillado, como depresión por cepillado, desgarrado y cepillado ondulado.
- **Defectos relativos a la madera:** Para las definiciones de los defectos relativos a la madera, mencionados a continuación, deberán ser consultadas las Normas NP 35 y 123.

- **Esfuerzos admisibles:** El esfuerzo admisible nominal a la flexión para la madera deberá ser de $120 \frac{kgf}{cm^2}$ ¹, como mínimo.

2.4.1. Ensayos realizados a las crucetas de madera

- **Ensayo de resistencia nominal a la flexión:** Las crucetas deberán ser ensayadas a la flexión según el diseño orientativo N° 4, y deberán tener una resistencia mayor o igual a la indicada en la tabla 2.1. La aplicación de la carga deberá hacerse en forma gradual y creciente, hasta llegar al valor nominal. Durante este ensayo no deberá observarse ningún tipo de rajaduras o grietas causadas por la fuerza aplicada.
- **Ensayo de rotura:** Las crucetas deberán ser ensayadas a la rotura según el diseño orientativo N° 4, y deberán tener una resistencia a la rotura no menor a la indicada en la tabla 2.1. La aplicación de la carga deberá hacerse en forma gradual y creciente, hasta llegar al valor de carga máxima que pueda ser registrada por el dinamómetro [23].

Tipo de Cruceta	Superficie de aplicación de la carga	F_n (daN)	F_r (daN)	b (mm)	d (mm)
2"x 3"x 0,5 m	Canto	390	980	5	10
	Cara	260	650		
2"x 3"x 1 m	Canto	170	420	10	10
	Cara	110	280		
3"x 4"x 1 m	Canto	480	1200	10	15
	Cara	360	910		
3"x 4"x 2,4 m	Canto	150	380	10	15
	Cara	120	290		

Tabla 2.1: Esfuerzos admisibles en los ensayos mecánicos [23]

F_n : Carga Nominal, aplicada según diseño orientativo N° 4

F_r : Carga de rotura, aplicada según diseño orientativo N° 4

b,d: Referirse al diseño orientativo N° 4 en ANEXO I

¹Equivalente aproximadamente a 12 MPa

2.5. Crucetas Poliméricas

Esta sección se refiere a las crucetas de materiales compuestos fibra de vidrio unidireccional y resina de poliéster, las cuales son fabricadas por el método de pultrusión. Al ordenarse las fibras longitudinales a la cruceta, la capacidad mecánica se refleja de manera perpendicular a esta dirección.

Para que estas puedan ser utilizadas en conjunto con las redes de distribución además de cumplir con las dimensiones establecidas coincidiendo en cuanto a largor con las crucetas de madera, deberán pasar varios ensayos de caracterización del material. Son aceptadas otras normas de fabricación o ensayo no establecidas en [14] siempre y cuando aseguren una calidad igual o superior.

El espesor nominal de la cruceta debe estar entre los 4,5 a 10 mm. Las perforaciones deben tener tubos de refuerzo cilíndricos Las superficies debe ser uniformes y no deben presentar cantos vivos, aristas cortantes y rebabas, deben ser biseladas o redondeadas. Las superficies exteriores deben tener protección contra la intemperie.

2.5.1. Características mecánicas

Resistencia a la flexión

Este evalúa por medio del ensayo de resistencia a la flexión descrito en [14]. El ensayo consiste en aplicar una cantidad de fuerza ascendente de manera transversal a la cruceta en la parte media, no se deben observar grietas en la superficie cuando la fuerza en modulo sea la nominal, luego se aplicará la carga excepcional equivalente a 140 % de la carga nominal durante 5 a 10 minutos y no deben presentar flecha residual mayor a lo establecido en las especificaciones. Finalmente para aprobar el ensayo una nueva muestra de la cruceta debe ser sometida a una carga igual al 200 % de la carga nominal y esta no debe mostrar ruptura inminente.

Resistencia a la torsión

Se verifica en el ensayo de resistencia a la torsión establecido en [14]. En el procedimiento para la ejecución de los ensayos deben ser utilizadas crucetas nuevas que no fueron usados en otros ensayos.

La realización consiste en montar la cruceta sobre un poste de 150 mm de espesor, instalar a 100 mm de cada extremidad, un aislador patrón o una pieza equivalente en el cual se deben fijar el sistema de tracción a medida del cuello de los aisladores. Posteriormente se debe estirar el conjunto gradualmente hasta llegar al valor de 100 daN, a los 5 minutos de aplicada la carga, la cruceta no debe presentar grietas.

Ensayo de resistencia a la torsión

Nuevamente se utilizará una muestra nueva de la cruceta para este ensayo, el cual consiste en aplicar esfuerzos de torque con bulón de cabeza cuadrada M16 y dos arandelas cuadradas de 38 mm de lado y 3 mm de espesor en cuatro perforaciones de la cruceta. La aplicación debe reproducir las condiciones de campo lo mas similar posible, siendo así la cruceta debe soportar un torque de 8 daN×m, sin que ocurra alguna deformación permanente o ruptura.

Ensayo mecánico de larga duración

Este ensayo se debe realizar de acuerdo al procedimiento definido en la sección de resistencia a la flexión, se debe aplicar la carga nominal correspondiente, debiendo mantenerse la carga durante 216 horas. En un tiempo de 5 a 10 minutos de retirado la carga se debe medir la flecha residual, no deberá exceder los 20 mm, además las crucetas no pueden presentar grietas.

Ensayo a la tracción antes y después del envejecimiento UV

Este debe ser realizado según la norma IEC 60811-1-1. Para la realización deben ser preparados 10 muestras de prueba uniformes, de lo cual 5 muestras deben ser utilizados en los ensayos de envejecimiento y los restantes en los ensayos mecánicos iniciales, para comparación de estas características antes y después del envejecimiento en la cámara de intemperie artificial.

Los ensayos de elasticidad, en tensión y el alargamiento a la rotura deben tener una variación media menor que 25 %. El material no debe presentar señales de erosión superiores a 0,1 mm.

2.5.2. Ensayo de resistencia a absorción de agua

La absorción de humedad de la cruceta debe tener como máximo un porcentaje de absorción de 3%, y debe ser ensayado conforme a la norma NBR-5310, por el método gravimétrico.

2.5.3. Ensayo de resistencia a la propagación de las llamas

Este ensayo tiene como objeto la verificación del material en cuanto sus propiedades de combustión y extinción. Los procedimientos para la ejecución de los ensayos deben ser realizados de acuerdo a la norma NBR-15956. Se deben escoger tres puntos para la aplicación de la llama. Se conectar el dispositivo para ensayo a una fuente de calor y regular la altura de la llama hasta el punto indicado, una vez regulada, posicionando sobre el primer punto a ser ensayado, se mantendrá la llama aplicada durante 1 minuto. Para concluir se debe aplicar la llama sobre los otros dos puntos tomando cuidado con la distancia entre ellos, de por lo menos 400 mm, la cruceta será aprobada si, después de retirada la fuente de calor la llama se extingue en un periodo menor a 30 segundos.

Capítulo 3

Características eléctricas de materiales aislantes

Un material aislante o dieléctrico es una sustancia pobre en conductancia eléctrica, pueden conducir cierta cantidad de corriente, insignificante para cualquier propósito.

Los buenos conductores, como los metales, tienen un amplio suministro de electrones libres para fluir como corriente eléctrica. ¿Qué determina cuánta corriente fluirá? Consideremos el simple experimento de tomar varias longitudes y espesores de cable de cobre y conectarlos uno a la vez a través de los terminales de una batería. Menos corriente fluye si el cable es más largo, mientras que fluye más corriente si el cable es más grueso. La resistencia del cable es el voltaje a través del cable (entre sus extremos) dividido por la corriente que fluye a través del cable. La resistencia se mide en ohmios, llamada así por Georg Simon Ohm. La resistividad de una sustancia se define como la resistencia medida de la sustancia multiplicada por su área de sección transversal y dividida por su longitud. Con esta definición, la resistividad depende solo de la sustancia. La resistividad se mide en ohmios por metro. Un buen aislante, como el ámbar, tiene una resistividad de $5 \times 10^{14} \Omega/m$. El cuarzo es aún mejor como aislante con una resistividad de $5 \times 10^{16} \Omega/m$. Una resistividad típica para el silicio semiconductor es de $640 \Omega/m$. La resistividad de un aislante muy bueno es más de 1024 veces la de un buen conductor, que es un rango verdaderamente fenomenal para una sola característica.

¿Qué hace que fluya la corriente eléctrica en un conductor? Si se pudieran ver los electrones dentro de un cable, serían un borrón de movimiento, colisionarían con los átomos y entre ellos, a menudo cambiarían las direcciones, pero rara vez cambiarían las velocidades. Normalmente, sus movimientos son aleatorios, con tantos yendo en una dirección como

cualquier otro. Sin flujo neto de carga, no hay corriente. Sin embargo, si el cable está conectado a los terminales de una batería, fluye una corriente. Los electrones pueden verse en el cable como atraídos por el terminal positivo de la batería y repelidos por el terminal negativo.

Si bien esto parece ser un caso simple de carga positiva que atrae electrones y una carga negativa que los repele, uno puede preguntarse cómo los electrones “saben” que esos terminales positivos y negativos de la batería están incluso allí. Una explicación muy fructífera es decir que la presencia de carga eléctrica modifica el espacio a su alrededor al establecer un campo eléctrico. Se puede pensar en el campo eléctrico de una partícula cargada, un protón, por ejemplo, como una serie continua de ondas que se extienden hacia afuera a través del espacio. Supongamos que el campo eléctrico del protón encuentra otra partícula cargada, como un electrón. Al interactuar con el campo, el electrón experimentará una fuerza hacia el protón. Cuando un cable conductor se conecta a través de los terminales de una batería, un campo eléctrico se propaga por el cable. Este campo ejerce una fuerza sobre los electrones, causando que suficientes de ellos se muevan hacia abajo por el cable de modo que fluya una corriente.

Si la carga que causa el campo eléctrico se cambia, es decir, se hace más pequeña o más grande, o se mueve hacia un lado, entonces un cambio en el campo eléctrico debe propagarse hacia afuera de la carga. James Clerk Maxwell demostró que los cambios del campo eléctrico viajan hacia afuera a la velocidad de la luz. Los campos eléctricos pueden existir en el espacio vacío o dentro de los materiales. La velocidad de la luz (la velocidad a la cual los cambios en el recorrido del campo eléctrico) es siempre menor dentro de un material que en el espacio libre. Cuando se establece un campo eléctrico en un conductor, los electrones de conducción experimentan una fuerza y flujos de corriente. ¿Qué sucede cuando se aplica un campo eléctrico a un dieléctrico? Un dieléctrico es un aislante eléctrico y la palabra “dieléctrico” se usa generalmente para enfatizar las propiedades eléctricas que dicho material tiene además de sus propiedades aislantes. Las dos primeras letras de la palabra, “di”, provienen del latín *dia*, que significa «a través». Cuando se aplica un campo eléctrico a través de un dieléctrico, no hay electrones libres para formar una corriente eléctrica, como los hay en un conductor. Los electrones unidos a los átomos intentan moverse según las indicaciones del campo eléctrico; sin embargo, lo mejor que pueden hacer es pasar un poco más de tiempo en el lado cercano del átomo que en el lado opuesto. Cada átomo ahora es ligeramente negativo en un lado y ligeramente positivo en el otro. Se dice que los átomos y el dieléctrico están “polarizados”. Los átomos polarizados configuran su propio campo eléctrico en una dirección tal que reduce el campo que causó la polarización.

3.1. Aplicaciones

Consideremos como ejemplo el dispositivo llamado condensador, ya que tiene la capacidad de almacenar carga eléctrica. Supongamos que dos placas conductoras se colocan una encima de la otra con un espacio entre ellas para que formen un sándwich de aire. Si las placas están conectadas a polos opuestos de una batería, la corriente fluirá momentáneamente. Un plato se volverá positivo y el otro negativo. Cuando el voltaje en las placas sea igual al voltaje de la batería, no fluirá más corriente. Es útil pensar que las cargas en las placas establecen un campo eléctrico entre las placas. Si se coloca un aislante o dieléctrico entre las placas del condensador, entonces el campo eléctrico polariza el dieléctrico en una dirección tal que reduce el campo eléctrico. Se debe colocar más carga en el condensador para devolver el campo a su valor original; es decir, la carga que se puede almacenar en el condensador se incrementa en una proporción llamada K , que se conoce como coeficiente dieléctrico. Los valores de K varían de dos o tres para el aceite a diez o veinte mil para un compuesto llamado titanato de bario. Colocar un dieléctrico sólido entre las placas del condensador logra tres cosas: en primer lugar, proporciona un medio mecánico para mantener separadas las placas; segundo, aumenta la capacitancia por un factor de K ; en tercer lugar, aumenta el voltaje de ruptura del condensador.

En el voltaje de ruptura, el campo eléctrico es lo suficientemente fuerte como para excitar electrones en un estado de conducción o incluso para separar las moléculas del dieléctrico en iones. En cualquier caso, el dieléctrico conducirá electricidad entre las placas y descargará los electrones. El voltaje de ruptura para aire seco ocurre con 3 millones de voltios en placas que están a 1 metro de distancia. Ciertos tipos de vidrio pueden resistir cien veces ese voltaje.

Muchos detectores de humo usan las propiedades aislantes del aire. Cuando existe una tensión entre un espacio de aire, normalmente no fluye corriente. Sin embargo, el fuego produce muchos iones en forma de humo y estos iones provocan que se produzca una corriente en el espacio de aire, haciendo que el detector de humo haga sonar una alarma. Este dispositivo sensible puede detectar un incendio antes de que el humo sea visible al ojo.

Los dieléctricos se usan en condensadores para aumentar tanto su capacitancia como su voltaje de ruptura. De una manera algo similar, los aislantes sólidos se utilizan para soportar grandes bobinas de transformadores, que luego están rodeadas de aceite. El aceite tiene un voltaje de ruptura más alto que el aire, y las corrientes de convección en el aceite ayudan a controlar la temperatura de las bobinas. En resumen, debería ser

obvio que los aisladores son esenciales para el funcionamiento de cada dispositivo eléctrico. Son tan esenciales como los conductores para el funcionamiento de motores, generadores, radios, luces eléctricas, líneas eléctricas, etc. La existencia de esos aislantes parciales, los semiconductores, hicieron posible el transistor y los circuitos integrados, lo que a su vez condujo a la revolución de la computadora. Finalmente, cabe señalar que incluso la naturaleza utiliza un sistema de conductores iónicos y dieléctricos en las células nerviosas y musculares humanas [25].

3.2. Nivel de impulso básico del aislamiento (BIL)

Los niveles de aislamiento están diseñados para soportar las sobre-tensiones de tipo transitorias¹, en lugar de sólo los voltajes de funcionamiento normales. Dado que las líneas y equipos de aislamiento están protegidos por los descargadores de sobre-tensión que drenan las oleadas rápidamente antes de que el aislamiento se dañe, el descargador debe operar por debajo del nivel de aislamiento mínimo que deben soportar las sobre-tensiones [11].

El nivel de tensión en la que se producirá la descarga disruptiva en las estructuras de distribución es el nivel de impulso básico del aislamiento (BIL). BIL también se define como «un nivel de aislamiento específico expresado en kilo voltios de la cresta valor de un impulso de rayo estándar. Está se determina a través de equipos de prueba de aisladores utilizando relámpago generadores de impulsos de sobre-tensión» [17].

El valor de aislamiento por encima de este nivel para las líneas y equipos en el sistema debe ser coordinado de manera que los dispositivos de protección específicos funcionen satisfactoriamente por debajo de ese nivel mínimo.

En el diseño de líneas y equipos se tiene en cuenta el nivel mínimo de aislamiento requerido, es necesario definir las sobre-tensiones en términos de su valor de pico y volver a los valores más bajos en términos de tiempo o duración. Aunque la tensión de pico puede ser considerablemente más alto que el voltaje normal, el esfuerzo eléctrico del aislamiento puede existir sólo durante un período muy corto de tiempo [11].

¹Son picos de tensión de corta duración que se presentan en los sistemas eléctricos o electrónicos, cuyo origen se puede atribuir a descargas atmosféricas.

3.2.1. Obtención del BIL para aislantes y estructuras

El impulso de tensión transmitido por un aislante se define por la tensión de descarga crítica para un impulso de tensión de $1,2 \times 50 \mu S$. El voltaje a través del aislante se incrementa paso a paso hasta que se produzca la descarga disruptiva conocida también como flameo o arco eléctrico. El voltaje se ajusta hasta 50 % de por debajo de la producción del fenómeno, conocida como ensayo de flameo crítico (critical flashover).

Pruebas de flameo de impulso se realizan tanto para los impulsos positivos y negativos. El BIL se determina estadísticamente a partir de los ensayos críticos de flameo y es por lo general alrededor del 10 % por debajo de la descarga disruptiva crítica, ya que la mayoría de los relámpagos son negativos; es necesaria la evaluación para impulsos negativos. Para aisladores pines, por lo general se utilizan en líneas de distribución 7,2/12,47 kV (USA), el BIL es de aproximadamente 100 kV para el impulso negativo. Sin embargo, para las líneas, que utilizan este aislante en las crucetas de acero conectadas a tierra, 300 kV de BIL es necesario para impedir descargas cercanas.

El BIL precisado para una estructura puede ser obtenido a través de generados de impulsos. Sin embargo este puede ser estimado, hay que recordar que el aislador proporciona el aislamiento primario para la línea. En este caso, se utilizan los valores de flameo en húmedo para impulsos negativos. Por ejemplo, para estimar el BIL para una línea de distribución, se añade entonces el valor del impulso de flameo (BIL) de la madera o de otro tipo de aislamiento en el camino de la descarga disruptiva al aislador. El BIL para la madera se diferencia por el tipo de la madera, pero por lo general se puede suponer que es aproximadamente 100 kV/ft seco y aproximadamente 75 kV/ft húmeda. Por lo tanto, para una estructura con un aislador de 100 Kv de BIL y una separación 3 pies de madera, el BIL sería aproximadamente 325 kV para la estructura.

La principal preocupación en el diseño de estructuras es lograr 300 KV o mayor nivel de BIL para garantizar que sólo los ataques directos causarían una combustión súbita (arqueo, flameo, etc.) Esto se consigue normalmente mediante la aislación de la madera en la estructura misma [17].

3.3. Trillamiento o arborescencia eléctrica

¿Qué es la arborescencia eléctrica?

La arborescencia eléctrica es un fenómeno previo a la ruptura dieléctrica de un material

aislante, es un proceso destructivo irreversible provocado por la acción de las altas temperaturas de manera progresiva debido a descargas parciales, que avanza dentro o en la superficie de un dieléctrico cuando se le somete a un prolongado estrés eléctrico de alta tensión [13].



Figura 3.1: Madero sometido a altas tensiones

Como se observa en la figura 3.1, la arborescencia o trillamiento se produce de manera gradual, formando entre los puntos de aplicación de una tensión elevada un patrón semejante a las ramas de un árbol, razón del nombre adjudicado al fenómeno.

En el caso de materiales aislantes el trillamiento es una degradación irreversible que consiste en la formación de caminos conductivos que se inician o desenvuelven en la superficie, mientras este camino se forma, normalmente sobre la superficie del material aparece un pequeño arco eléctrico (centelleo) que recorre hacia el electrodo opuesto. En este proceso el material aislante puede sufrir erosión provocando la pérdida de masa del mismo por las acciones de las descargas superficiales.

Factores ambientales tales como, la contaminación por poluciones industriales, automotivas o del ecosistema pueden reducir drásticamente la resistencia superficial del aislante creando condiciones en donde pueden fluir corrientes eléctricas entre puntos de potenciales diferentes. Estas corrientes superficiales circulando a través de un filme conductor, generado por la polución y la humedad, pueden causar una evaporación no uniforme, formando así las llamadas bandas secas y húmedas. Consecuentemente, el campo eléctrico se torna menos homogéneo, pudiendo provocar la ocurrencia de descargas superficiales que carbonizan el material e inician la formación de trillas eléctricas. La carbonización y el aumento del campo no homogéneo tangente a la superficie, contribuyen a la aceleración

del fenómeno [27].

3.3.1. Ensayos de resistencia al trillamiento eléctrico

Existen varios métodos de ensayos normalizados para verificar la resistencia de un material al trillamiento eléctrico y a la erosión, estos discrepan en los niveles de tensión, formas de aplicar el contaminante y arreglo de las muestras. La elección del tipo ensayo deberá atender a la funcionalidad del material en el campo de aplicación.

En general los ensayos de resistencia al trillamiento son utilizadas para comparación entre materiales. Los primeros ensayos utilizaban goteo de electrolitos para contaminación superficial los cuales datan de 1930 (en Suiza) y 1935 (en los Estados Unidos).

En 1959, el noruego Poppe introdujo como criterio de validación del ensayo, la tensión alcanzada en el momento de la ruptura después de la caída de 50 gotas de una solución de cloruro de amonio al 0,1 % en masa, en intervalos de 30 segundos. Este ensayo sería más tarde normalizado como la Norma IEC 60112 (International Electrotechnical Commission, 2003).

En 1956, Albright y Starr, basándose en observaciones de un material expuesto al aire libre, concluyeron que la humedad y el polvo acumulados forman una película superficial con baja resistividad eléctrica. Este ensayo fue definido como “Dust-and-Fog-Test”, que fue modificado por Sommerman en 1960 para constituir el método recomendado por la ASTM 2132-98 (American Society for Testing and Materials, 2001). La prueba consiste en aplicar una tensión alternada entre los electrodos, con la muestra localizada dentro de una cámara con inyección continua de agua pulverizada y la superficie cubierta con un polvo contaminante.

Mathes y Mc Gowan desarrollaron en 1961 un método de ensayo en el que se colocaba la muestra inclinada en relación a la horizontal y se escurría el líquido contaminante en la superficie inferior, a partir del electrodo superior, esta metodología sirvió de base para el ensayo actualmente estandarizado según la norma IEC 60587 (International Electrotechnical Commission, 2007) [27].

Capítulo 4

Mecánica de sólidos

Galileo en la primera parte del siglo XVII comenzó con trabajos en la disciplina, para la marina italiana aportando en la construcción de cascos de barcos. Mucho ha avanzado desde entonces. Grandes aportes fueron realizados por los franceses Coulomb, Poisson, Navier, St Venant y Cauchy. Uno de los problemas principales de la mecánica de sólidos es la investigación de la resistencia interna de un cuerpo, es decir, «La naturaleza de las fuerzas que se generan dentro de un cuerpo para equilibrar el efecto de las fuerzas aplicadas externamente».

En la mecánica vectorial se estudian los elementos estructurales y las estructuras desde el punto de vista del equilibrio estático externo, es decir de la quietud en que deben estar para que cumplan su función. Se tienen ciertas situaciones en donde se realiza un diagrama de cuerpo libre en el cual se ponían todas las fuerzas externas que actuaban sobre el mismo y a continuación se aplican las ecuaciones de equilibrio con el fin de encontrar las reacciones en los apoyos [29].

4.1. Esfuerzos y deformaciones

4.1.1. Esfuerzo simple

Uno de los problemas básicos de la ingeniería es seleccionar el material más apropiado y dimensionarlo correctamente, de manera que permita que la estructura o máquina proyectada trabaje con la mayor eficiencia. Para ello, es esencial determinar la resistencia, la rigidez y otras propiedades de los materiales.

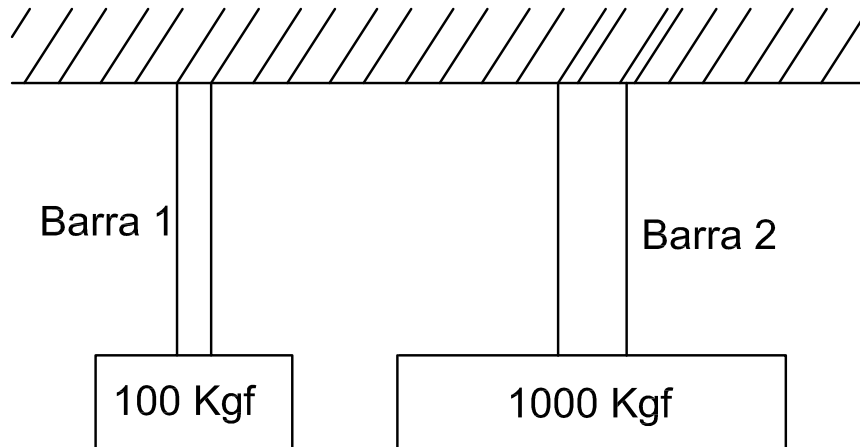


Figura 4.1: Sección de la barra adecuada a la carga sometida

En la figura 4.1 se consideran dos barras prismáticas de igual longitud y distintos materiales, suspendidas de un soporte común.

Si solamente se sabe que las barras pueden soportar las cargas máximas indicadas, no se puede afirmar a priori qué material es más resistente. Por supuesto que la barra 2 está soportando una carga mayor, pero no se pueden comparar las resistencias sin establecer una base común de referencia. En este caso, se necesita conocer el área de la sección transversal de las barras. Supongamos, pues, que la barra 1 tiene una sección de $0,1 \text{ cm}^2$, y la barra 2 de 10 cm^2 de área transversal¹, Ahora si es posible comparar sus resistencias, reduciendo los datos a la capacidad de carga por unidad de área de la sección transversal. En estas condiciones, la resistencia unitaria (por unidad de área) de la barra 1 es:

$$\sigma_1 = \frac{100}{0,1} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 10000 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

y la correspondiente de la barra 2 es:

$$\sigma_2 = \frac{1000}{10} = 100 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 1000 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$$

Por lo tanto, el material de la barra 1 esta soportando una tensión 100 veces mayor que el de la barra 2.

La fuerza por unidad de área que soporta un material se denomina esfuerzo en el material, y se expresa matemáticamente en la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

¹En este ejemplo, y afines de comparación se utilizada la equivalencia simplificada $1 \text{ kgf} = 10 \text{ N}$, en vez del real $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$

En donde σ es el esfuerzo o fuerza por unidad de área, P es la carga aplicada y A es el área de la sección transversal.

Sin embargo, hasta una expresión tan sencilla como la 4.1 requiere un cuidadoso examen. Dividiendo la carga entre el área de la sección no se obtiene el valor del esfuerzo en todos los puntos de aquella, sino solamente el valor medio del esfuerzo. una determinación más exacta de del esfuerzo exige dividir la fuerza diferencial dP entre el elemento de área diferencial sobre el que actúa, entonces:

$$\sigma = \frac{dP}{dA} \quad (4.2)$$

La situación en la que el esfuerzo es constante o uniforme se llama estado de esfuerzo simple [24].

4.1.2. Deformación simple

La resistencia de materiales no es el único criterio que debe tenerse en cuenta para diseñar una estructura. Frecuentemente, la rigidez suele tener la misma o mayor importancia. En menor grado, otras propiedades tales como la dureza, la tenacidad y la ductilidad también influyen en la elección de un material. Estas propiedades se determinan mediante pruebas, comparando los resultados obtenidos con patrones establecidos. Aunque la descripción completa de estas pruebas comprende el ensayo de materiales. Examinaremos una de ellas, la prueba de tensión en el acero, dada su importancia y la inapreciable ayuda que proporciona en la introducción de otros conceptos básicos.

Consideremos una probeta de acero sujeta entre las mordazas de una máquina de pruebas de tensión y observemos simultáneamente la carga y el alargamiento de una determinada longitud de la misma. Los resultados se suelen representar en un gráfico en el que en ordenadas se llevan las cargas y en abscisas los correspondientes alargamientos. En la figura 5.8 se representa un gráfico de esta clase; se puede observar que no aparecen representadas las fuerzas y los alargamientos totales, sino las fuerzas unitarias o esfuerzos y los alargamientos unitarios o deformaciones, ya que solo se pueden comparar las propiedades de una muestra con las de la otra si se reducen los valores observados a unos puntos de referencia comunes. El diagrama de la figura 4.2 se denomina diagrama esfuerzo-deformación, cuyo nombre deriva de las magnitudes que aparecen en sus ejes de coordenadas.

El valor de la deformación (unitaria) ε es el cociente del alargamiento (deformación total) δ y la longitud L en la que se ha producido. Por tanto:

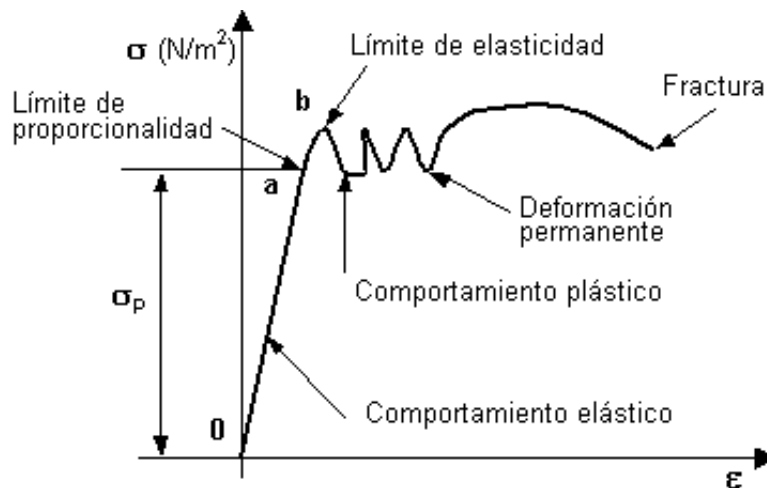


Figura 4.2: Diagrama esfuerzo-deformación

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (4.3)$$

Sin embargo, de este modo solo es obtenido el valor medio de la deformación, para obtener el valor en cualquier punto se debe utilizar la siguiente identidad:

$$\epsilon = \frac{d\delta}{dL} \quad (4.4)$$

En ciertas condiciones, se puede suponer que la deformación es constante y aplicar la expresión 4.3. Estas condiciones son:

1. El elemento sometido a tensión debe tener una sección transversal o recta constante.
2. El material debe ser homogéneo.
3. La fuerza o carga debe ser axial.

Por último, como la deformación representa un cambio de longitud dividido entre la longitud inicial, la deformación es una cantidad sin dimensiones. No obstante, cuando se habla de deformaciones se emplean unidades de metro por metro (m/m). En la práctica es frecuente encontrar deformaciones del orden de $1,0 \times 10^{-3} \frac{m}{m}$ [24].

4.1.3. Esfuerzos límites

En la figura 4.2 se observa que, desde el origen hasta el punto llamado límite de proporcionalidad, el diagrama esfuerzo-deformación es un segmento rectilíneo, de donde se

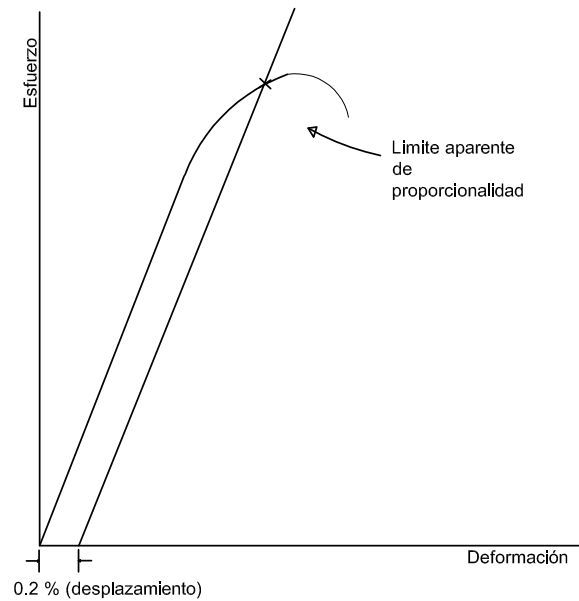


Figura 4.3: Limite aparente de proporcionalidad

deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, enunciada en el año 1678 por Robert Hooke. Esta proporcionalidad no se extiende a todo el diagrama, si no que termina en el límite de proporcionalidad, y más allá de este punto, el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación. El límite de proporcionalidad tiene una gran importancia, ya que toda la teoría subsiguiente al respecto del comportamiento de los sólidos elásticos está basada precisamente en la citada proporcionalidad entre esfuerzos y deformaciones estableciendo, pues, un límite superior al esfuerzo admisible que un material dado puede soportar. También proporciona una primera indicación del por qué debe de ser el límite de proporcionalidad y no el esfuerzo de ruptura el máximo esfuerzo al que un material puede ser sometido.

Otros conceptos interesantes del diagrama esfuerzo-deformación son los siguientes: (i) El límite de elasticidad (o límite elástico) es el esfuerzo más allá del cual el material no recupera totalmente su forma original al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada deformación permanente. (ii) El punto de fluencia es aquel en el que aparece un considerable alargamiento o fluencia del material sin el correspondiente aumento de carga que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia. (iii) El límite aparente de proporcionalidad al 0.2% (o a otro tanto por ciento), está estrechamente asociado al punto de fluencia. Se aplica este concepto en aquellos materiales que no tienen un punto de fluencia bien definido, o que carecen de él, mediante un procedimiento de equiparación con los que sí lo tienen. Consiste en trazar una paralela a la tangente en el origen a la curva partiendo de un valor normalizado (equivalente a la deformación en el límite de proporcionalidad de otros materiales) que suele tomarse del 0.2%, o sea 0.002 m/m .

Como se observa en la figura 4.3, la intersección de esta recta con la curva deformación-esfuerzo define el punto considerado. (iv) El esfuerzo último, o bien el límite de resistencia, es la máxima ordenada de la curva esfuerzo-deformación. (v) El punto de ruptura, debido a que el esfuerzo en este punto de ruptura se mide dividiendo la carga entre el área de la sección de la barra, lo que, aunque más cómodo, es incorrecto. El error es debido al fenómeno denominado estricción. Próximo a tener lugar la ruptura, el material se alarga muy rápidamente y al mismo tiempo se estrecha, en una parte muy localizada de la probeta, por lo que en el instante de la ruptura se distribuye sobre una superficie mucho más pequeña [24].

4.1.4. Ley de Hooke o coeficiente de elasticidad

Considerando nuevamente el diagrama esfuerzo-deformación representado en la figura 4.2, observando la parte lineal. La pendiente de la recta es la relación entre el esfuerzo y la deformación; conocido como módulo de elasticidad (E).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

La expresión 4.5 es la conocida Ley de Hooke, el módulo de elasticidad también se conoce como módulo de Young en honor a Thomas Young quien introdujo la expresión como una constante de proporcionalidad. Otra forma de representar la Ley de Hooke, se obtiene al sustituir σ y ε por sus valores ya obtenidos, de modo que:

$$\frac{P}{A} = E \frac{\delta}{L}$$

Resulta en la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{PL}{AE} = \frac{\sigma L}{E} \quad (4.6)$$

4.2. Flexión

En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. El término «alargado» se aplica cuando una dimensión es dominante frente a las otras. Un caso típico son las vigas, las que están diseñadas para trabajar, principalmente, por flexión. Igualmente, el concepto de flexión se extiende a elementos estructurales superficiales como placas o

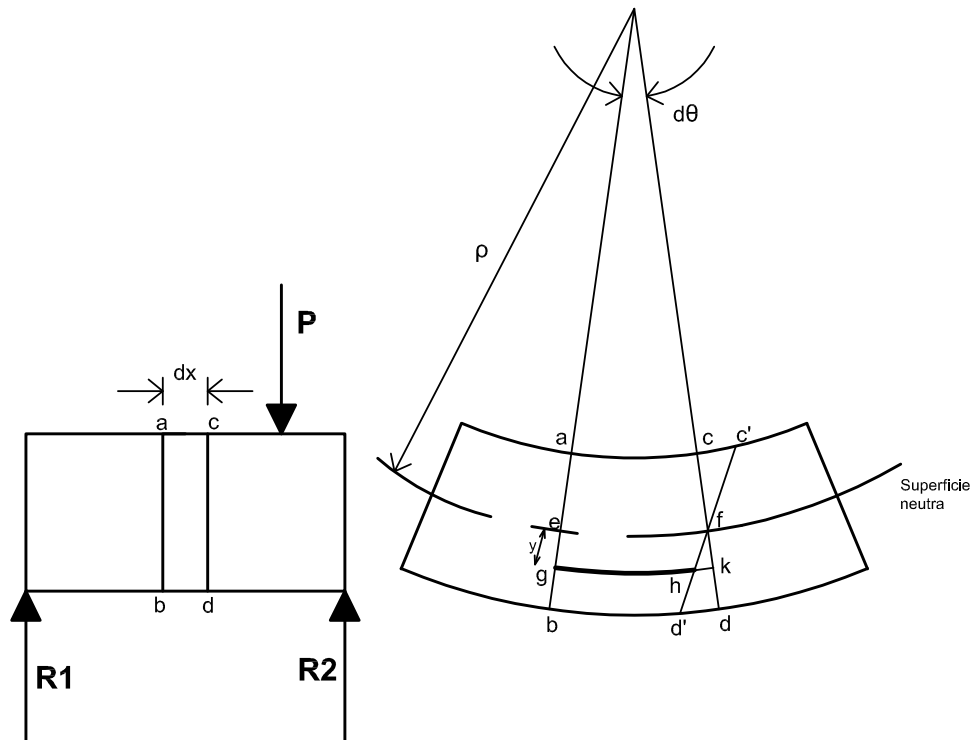


Figura 4.4: Deformaciones producidas por cargas flexionantes

láminas.

El rasgo más destacado es que un objeto sometido a flexión presenta una superficie de puntos llamada fibra neutra tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en ella no varía con respecto al valor antes de la deformación. El esfuerzo que provoca la flexión se denomina momento flector [26].

Para estudiar y deducir las relaciones entre el momento flexionante y los esfuerzos normales por flexión que se producen, se consideran las siguientes hipótesis:

1. Las secciones planas, inicialmente planas, permanecen planas.
2. El material es homogéneo y obedece a la Ley de Hooke.
3. El módulo elástico es igual a tensión que a compresión.
4. Los cuerpos son inicialmente rectos de secciones constantes.

Según la figura 4.4 las secciones ab y cd inicialmente separadas una distancia dx giran un ángulo $d\theta$, una respecto a otra generando un acortamiento en el tramo ac mientras que el tramo bd sufre alargamiento, estas secciones se curvan con respecto al centro O, entre

estas fibra existe una longitud de fibra tal como ef el cual no sufre variación ni esfuerzo alguno (fibra neutra).

Consideremos ahora la deformación de una fibra cualquiera gh situada a una distancia y de la superficie neutra. Su alargamiento hk es el arco de circunferencia de radio y y ángulo $d\theta$ entonces:

$$\delta = hk = y \cdot d\theta$$

La deformación unitaria se obtiene dividiendo la longitud deformada entre la longitud inicial en este caso se puede sustituir por la fibra no deformada ef.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{y \cdot d\theta}{ef} = \frac{y \cdot d\theta}{\rho \cdot d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (4.7)$$

Suponiendo que el material es homogéneo y obedece a la Ley de Hooke entonces el esfuerzo resultante es:

$$\sigma = E\varepsilon = \left(\frac{E}{\rho}\right) y \quad (4.8)$$

Esta expresión 4.8 indica que el esfuerzo en cualquier fibra es directamente proporcional a la distancia de la misma a la superficie neutra y al módulo de elasticidad (igual en tensión y a compresión según la hipótesis 3) y como el radio de curvatura (k) es la inversa de la longitud del radio, podemos afirmar que el esfuerzo es proporcional al radio de curvatura.

$$\frac{1}{\rho} = k \quad \therefore \quad \sigma = E y k$$

Para completar las fórmulas de flexión se deben tener en cuenta las condiciones de equilibrio, teniendo en cuenta la figura 4.5

$$\sum X = 0 \quad \int \sigma_x dA = 0$$

Reemplazando σ_x por su valor en 4.8 se obtiene la siguiente expresión

$$\frac{E}{\rho} \int y dA = 0$$

Los términos ρ y E son constantes por lo que pueden sacarse de la integral, como $y dA$ es el momento estático del área diferencial dA respecto al eje neutro, la integral $\int y dA$ es el momento estático total del área

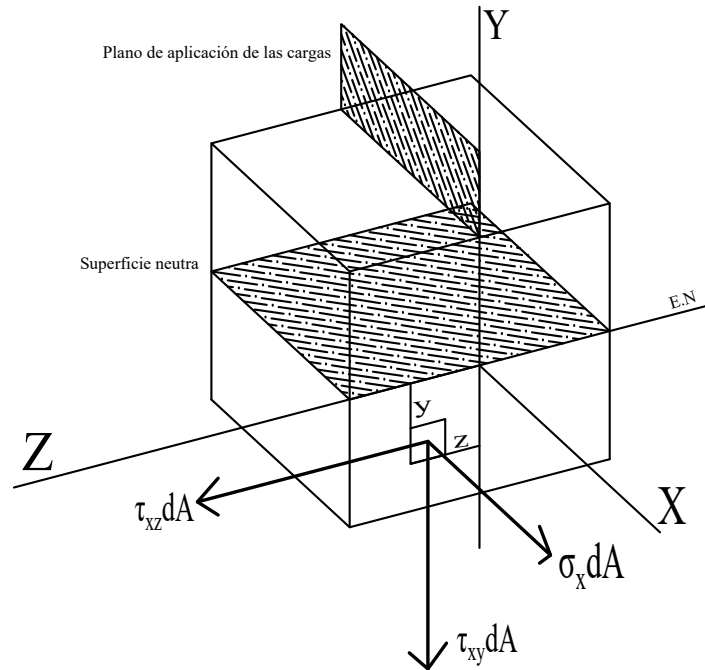


Figura 4.5: Fuerzas que actúan sobre un Elemento de área diferencial de la sección recta

$$\frac{E}{\rho} A \bar{y} = 0$$

En esta expresión solamente \bar{y} puede ser nulo, es decir que la línea neutra pasa por el centroide del área.

La condición $\sum Y = 0$ conlleva a que $V_r = V$, la fuerza cortante V_r es la suma de todas las fuerzas cortantes, es decir $\int \tau_{xy} dA = V_r$.

La condición $\sum Z = 0$ conduce a que $\int \tau_{xz} dA = 0$ puesto que las fuerzas exteriores no tienen componentes sobre el eje Z . En estos casos la carga produce un momento con respecto al eje X que es equilibrado por $\int y(\tau_{xz} dA) - \int z(\tau_{xy} dA)$ para cumplir con la ecuación $\sum M_x = 0$. Esta condición cumple para todos los casos simétricos ya que todo elemento tiene su simétrico y las integrales se anulan.

La condición $\sum M_y = 0$ se cumple ya que las fuerzas exteriores no producen momento con respecto al eje Y , tampoco las fuerzas cortantes interiores. Por tanto,

$$\left[\sum M_y = 0 \right] \quad \int z(\sigma_x dA) = 0$$

Sustituyendo σ_x por $\frac{E y}{\rho}$, resulta,

$$\frac{E}{\rho} \int zy dA = 0$$

$\int zy dA$ es el producto de inercia I_{zy} , nulo solamente si los ejes Y y Z son de simetría o ejes principales de la sección.

La última condición $\sum M_z = 0$ supone el equilibrio del momento flexionante por el momento resistente, es decir, $M = M_r$. El momento resistente con respecto al eje neutro de un elemento cualquiera es $\int y(\sigma_x dA)$ y por tanto el momento total es:

$$M = \int y(\sigma_x dA)$$

sustituyendo σ_x por su valor en 4.8

$$\frac{E}{\rho} \int y^2 dA = M$$

$\int y^2 dA$ es el momento de inercia I del área con respecto al eje de referencia en este caso el eje neutro, que pasa por el centro de gravedad, finalmente se obtiene,

$$M = \frac{EI}{\rho} \tag{4.9}$$

Una forma particular de escribir la expresión 4.9 es:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \tag{4.10}$$

La misma indica proporción directa entre el momento flexionante y la curvatura ($k = \frac{1}{\rho}$) generada en el cuerpo. Ahora bien igualando $\frac{E}{\rho}$ a $\frac{\sigma}{y}$ como se había deducido en 4.8 se puede afirmar que:

$$\frac{E}{\rho} = \frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I}$$

esto conduce directamente a la fórmula de flexión, también conocida como «Fórmula de Escuaría»

$$\sigma = \frac{My}{I} \tag{4.11}$$

La expresión 4.11 indica que el esfuerzo en un punto del cuerpo es directamente proporcional a la distancia del mismo al eje neutro. De esta manera sustituyendo el valor de y

por el valor de la distancia más alejada del eje neutro c obtenemos el esfuerzo máximo [24].

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} \quad (4.12)$$

El cociente $\frac{I}{c}$ es conocido como el módulo de resistencia de la sección o simplemente módulo de sección y se designa comúnmente por la letra S , de esta forma se puede dar otra forma a la expresión 4.12.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S}$$

En este estudio esta fórmula es fundamental pues se estudiarán cuerpos con secciones transversales de formas rectangulares sometidos a flexión.

4.2.1. Curvatura

Para comprender este apartado se tendrá en cuenta la ecuación 4.10 donde ρ es el radio de curvatura (figura 4.6).

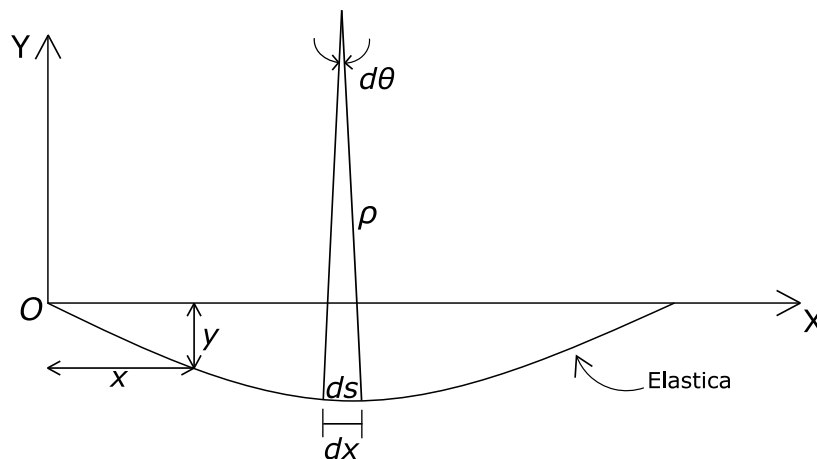


Figura 4.6: Elemento lineal sometido a flexión

Se considera un segmento infinitesimal de arco ds para un cambio de ángulo $d\theta$, además se pueden realizar las siguientes aproximaciones para pequeñas curvaturas:

- $ds \approx dx$, el segmento infinitesimal de arco es recto, entonces $\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \approx \frac{d\theta}{dx}$.
- $\frac{dy}{dx} = \tan \theta \approx \theta$, para valores pequeños de θ , entonces $\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$.

Así la curvatura está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (4.13)$$

igualando 4.10 con 4.13 se obtiene la ecuación diferencial de la elástica de una viga.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (4.14)$$

donde EI es la rigidez a la flexión, según [24] las aproximaciones citadas no tienen influencia en la exactitud de 4.14. Sin embargo su valor real se expresa como sigue:

$$\frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\right)^3} = \frac{M}{EI}$$

$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$, es insignificante por que solo se consideran pequeñas curvaturas.

$$EI \frac{dy}{dx} = \int M(x)dx + C_1 \quad (4.15)$$

Aplicando integración a 4.14 se obtiene la ecuación pendiente 4.15 y permite determinar el valor de la misma $\frac{dy}{dx}$, en cualquier punto, $M(x)$ es la función del momento flector y C_1 una constante a determinar por las condiciones de frontera.

Aplicando una segunda integración a la expresión anterior:

$$EIy = \iint M(x)dx dx + C_1 + C_2 \quad (4.16)$$

Esta es la ecuación de la elástica de una viga (barra), permite hallar el valor de la ordenada en cualquier punto de la abscisa, C_2 y C_1 se determinan por las condiciones de frontera.

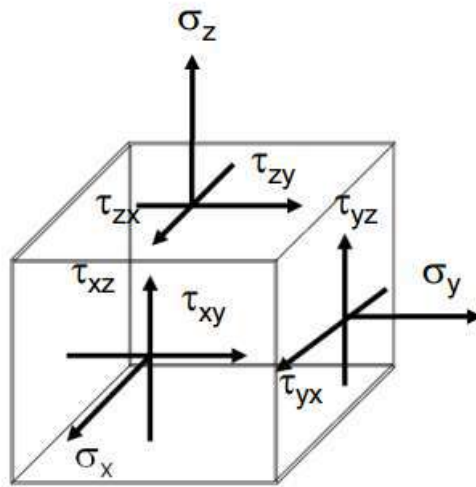


Figura 4.7: Elemento tridimensional

4.3. Análisis de elementos finitos

El método de los elementos finitos conocido por sus siglas en inglés FEM (Finite Elements Method), es una herramienta muy poderosa para un amplio rango de problemas de la ingeniería. Con los avances de los sistemas CAD y las computadoras, hoy en día pueden modelarse problemas muy complejos con relativa facilidad. «En las computadoras se pueden diseñar varias configuraciones alternas de un prototipo para su posterior construcción». Todo esto sugiere la modernización, empleando estos desarrollos para entender la teoría, las técnicas y aspectos computacionales del método de los elementos finitos[30].

En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las ecuaciones gobernantes son considerados sobre esos elementos y expresado como términos desconocidos en los bordes del elemento. Un proceso de ensamble, cuando se consideran correctas las cargas y restricciones, da lugar a un conjunto de ecuaciones. La solución de esas ecuaciones nos da el comportamiento aproximado del continuo.

En la figura 4.7 se muestra un elemento tridimensional de lados Δx , Δy , Δz , sobre cada cara (seis) de este elemento actúan esfuerzos normales perpendiculares al plano de la cara y cortantes sobre los planos de la cara. Una de las consideraciones primordiales para el análisis de elementos finitos consiste en asumir estado de equilibrio por ende, considerando equilibrio de momentos se obtiene $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ simplificando la cantidad de esfuerzos cortantes.

Las fuerzas normales se obtienen del producto entre el área una cara y el esfuerzo normal que actúa sobre ella.

$$F_{nx} = \sigma_x \Delta y \Delta z \quad F_{ny} = \sigma_y \Delta x \Delta z \quad F_{nz} = \sigma_z \Delta x \Delta y$$

Cada esfuerzo cortante multiplicado por el área a la cual es paralela corresponden a las fuerzas cortantes.

$$V_{xy} = \tau_{xy} \Delta x \Delta y \quad V_{yz} = \tau_{yz} \Delta y \Delta z \quad V_{xz} = \tau_{xz} \Delta x \Delta z$$

4.3.1. Traslación

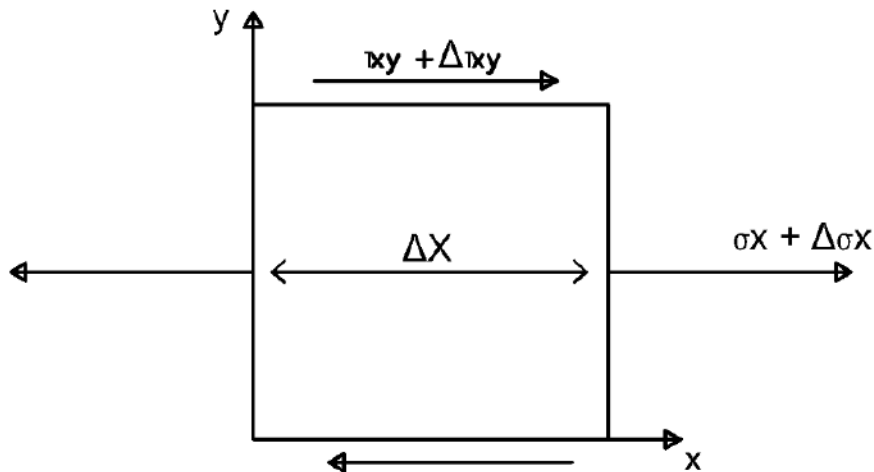


Figura 4.8: Plano xy del elemento 4.7

Considerando los esfuerzos que actúan paralelos al eje x como se muestra en la figura 4.8. Al aplicar una fuerza externa se producen los cambios en los esfuerzos normales y cortantes, por lo que se puede escribir según la expansión de Taylor:

$$\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \Delta x + O.T$$

$O.T$ corresponde a otros términos según la expansión de Taylor y como $(\Delta x)^2 \approx 0$ se cancela en la expresión, recordemos que Δx y Δy son elementos diferenciales. Aplicando la misma expansión al esfuerzo cortante obtenemos:

$$\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \Delta y + \mathcal{O}(\mathcal{T})$$

Ahora consideremos las condiciones de equilibrio sobre el elemento

$$\left(-\cancel{\sigma_x} + \cancel{\sigma_x} + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z + \left(-\cancel{\tau_{xy}} + \cancel{\tau_{xy}} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z + f_x \Delta x \Delta y \Delta z = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x = 0$$

f_x corresponde a la densidad de la fuerza gravitacional sobre el eje x , extendiendo al elemento en la figura 4.7, obtenemos las ecuaciones gobernantes.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + f_y = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + f_z = 0 \quad (4.19)$$

se observan 3 ecuaciones y 6 incógnitas por lo que necesariamente se deberán plantear otras para resolver el sistema.

4.3.2. Deformación normal

En la ecuación 4.5 se relaciona la deformación del material y el esfuerzo normal. En la figura 4.9 se aprecia esta deformación en el elemento, ΔLx es el cambio en la longitud Δx por lo tanto la deformación $\varepsilon_x = \frac{\Delta Lx}{\Delta x}$, ΔLy es el cambio en la longitud Δy , negativo por la compresión del mismo, por lo tanto $\varepsilon_y = \frac{\Delta Ly}{\Delta y}$.

La relación entre estas deformaciones se conoce como «coeficiente de Poisson»

$$\nu = \frac{-\varepsilon_{trans}}{\varepsilon_{long}} \quad (4.20)$$

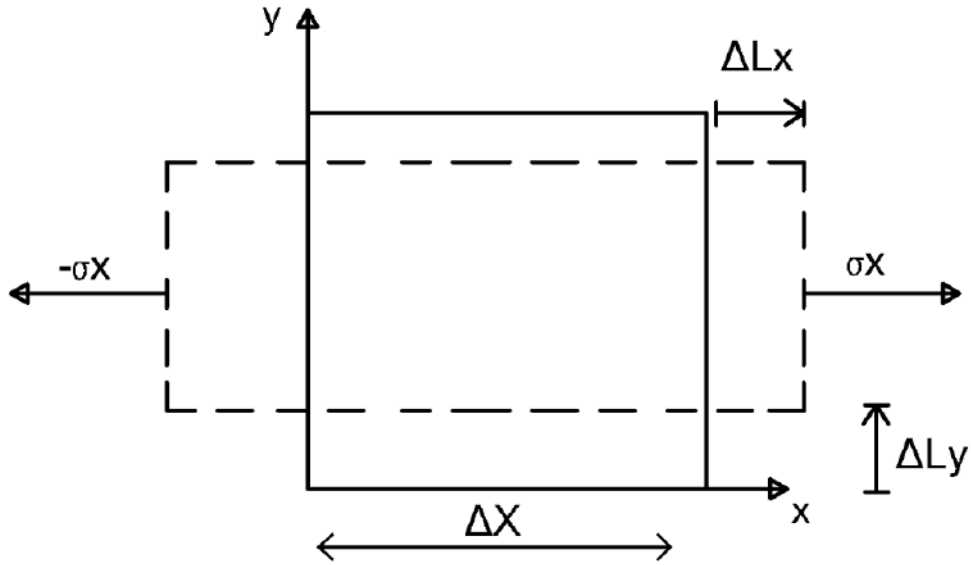


Figura 4.9: Deformación debido al esfuerzo σ_x

de esta manera, atendiendo nuevamente a la expresión 4.5 se puede escribir las deformaciones producidas por σ_x como:

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

En la figura 4.10 se suponen los efectos de los esfuerzos sobre ambos ejes, por lo que se puede plantear las deformaciones producidas por cada una de ellas, por ejemplo las deformaciones producidas por el nuevo esfuerzo σ_y son:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$$

$$\varepsilon_x = -\nu \frac{\sigma_y}{E}$$

Entonces las deformaciones, sobre cada eje y considerando las tres dimensiones del elemento, vendrían dadas por las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad (4.22)$$

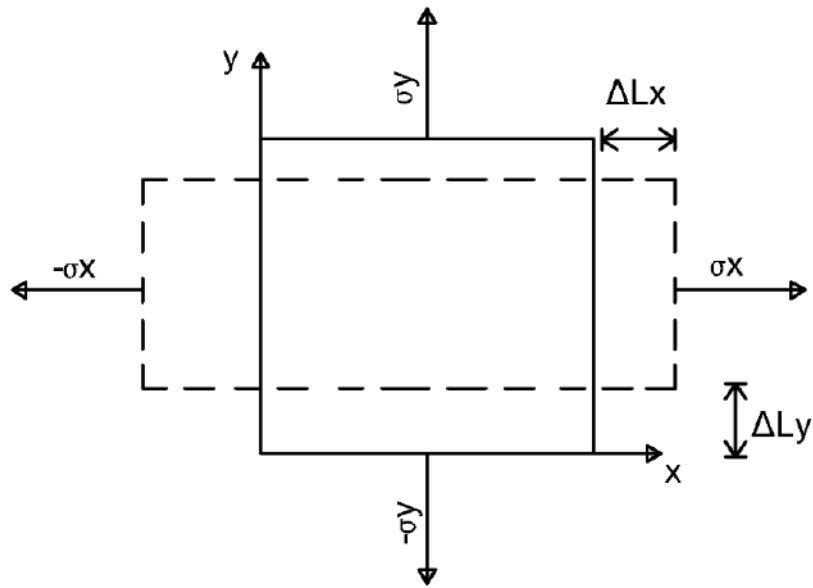


Figura 4.10: Deformaciones debido a los esfuerzos σ_x y σ_y

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad (4.23)$$

4.3.3. Deformación angular o cortante

De la misma forma que los esfuerzos normales generan deformaciones longitudinales, los esfuerzos cortantes producen deformaciones angulares como se observa en la figura 4.11.

El elemento de control sufre una deformación angular, formando un rombo (abcd) el desplazamiento se mide mediante los ángulos α y β . La deformación ingenieril cortante es conocida por la suma de estos ángulos.

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta$$

mientras que la deformación tensorial cortante

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2}$$

Ahora bien, la Ley de Hooke se puede reescribir para esta situación de la siguiente manera:

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (4.24)$$

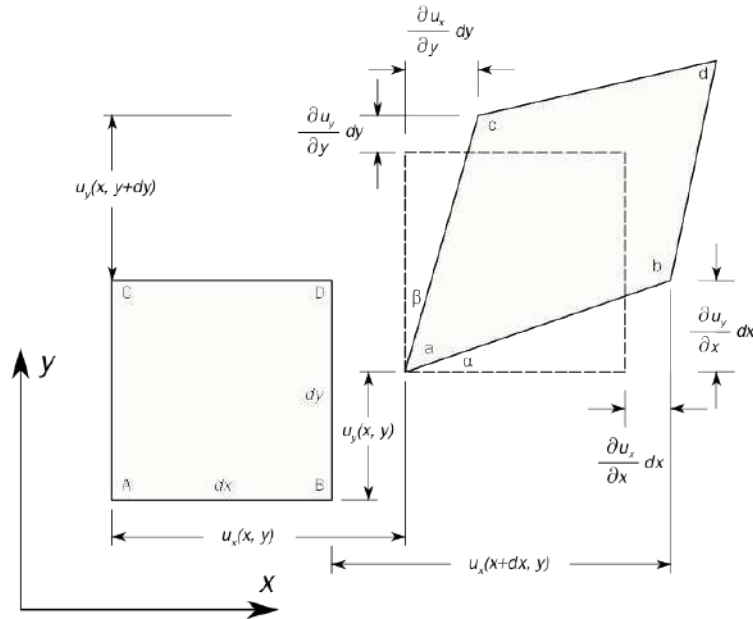


Figura 4.11: Deformaciones angulares

en materiales isotrópicos: $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$, también conocida como módulo cortante. Ahora bien, reemplazando esta expresión en 4.24 y despejando los valores de esfuerzos de 4.21, 4.22 y 4.22 se obtiene la ecuación constitutiva del material y puede ser representada por la igualdad 4.25.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{pmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix}$$

o bien.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.25)$$

Volviendo a la figura 4.11, Δx es una arista del elemento estudiado, al aplicar una fuerza externa, el punto u se desplaza Δu a lo largo de la abscisa, se plantea a consecuencia la siguiente expresión: $\varepsilon_x = \frac{\Delta u}{\Delta x}$; nuevamente aplicando la expansión de Taylor, las deformaciones unitarias están dadas como se muestra en 4.26.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.26)$$

Así también el desplazamiento angular esta dado por $\tan \alpha = \frac{\Delta v}{\Delta x + \Delta u}$, siguiendo la teoría de pequeñas deformaciones se adopta $\tan \alpha = \alpha$ y $\frac{\Delta u}{\Delta v} \ll 1$ por lo que $\alpha = \frac{\partial v}{\partial x}$, análogamente $\beta = \frac{\partial u}{\partial y}$, se reescribe la expresión de las deformaciones tensoriales cortantes como se muestra en la expresión 4.27.

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad (4.27)$$

Finalmente la cantidad de ecuaciones coincide con el número de incógnitas (15 ecuaciones y 15 incógnitas), por ende este sistema continuo es resoluble.

4.3.4. Campo de deformaciones e interpolación

Como ya se indicó en las secciones anteriores el campo de deformaciones en un punto cualquiera del dominio está definido por un vector \mathbf{u} que tiene tantas componentes como deformaciones existen en el dominio. Para el caso de un problema espacial es:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} \quad (4.28)$$

Si se considera un elemento finito cualquiera, el campo de deformaciones en su interior se aproxima, haciendo uso de la hipótesis de interpolación, como un promedio ponderado de las deformaciones en cada uno de los n nudos del elemento, siendo los factores de ponderación las funciones de interpolación:

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i \quad w = \sum N_i W_i \quad (4.29)$$

Esta interpolación puede ponerse en forma matricial:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\boldsymbol{\delta}^e \quad (4.30)$$

donde δ^e es el vector de todas las deformaciones nodales del elemento.

$$\delta^e = [U_1 \quad V_1 \quad W_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad W_2 \cdots \quad U_n \quad V_n \quad W_n]^T$$

La matriz de funciones de interpolación \mathbf{N} tiene tres filas y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nudos del elemento. La estructura de esta matriz siempre es del tipo:

$$\mathbf{N} = \left[\begin{array}{ccc|ccc|ccc} N_1 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \cdots & \cdots & & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \cdots & \cdots & & 0 & 0 & N_n \end{array} \right] \quad (4.31)$$

Las deformaciones unitarias en un punto cualquiera del elemento, con la suposición de pequeñas deformaciones como ya se definió en 4.26 y 4.27, se pueden poner en su forma matricial siguiente:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left\{ \begin{array}{c} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} u \\ v \\ w \end{array} \right\} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u} \quad (4.32)$$

En esta expresión se identifica el operador matricial $\boldsymbol{\partial}$ que permite pasar de las deformaciones de un punto \mathbf{u} a las deformaciones unitarias $\boldsymbol{\varepsilon}$. Este operador tiene tantas filas como deformaciones unitarias haya en el problema y tantas columnas como componentes tenga el campo de desplazamientos \mathbf{u} .

Sustituyendo las deformaciones \mathbf{u} en función de las deformaciones nodales, mediante las funciones de interpolación, se obtiene:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N} \delta^e \quad (4.33)$$

En esta relación se identifica la matriz $\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N}$, tal que se cumple:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \delta^e \quad (4.34)$$

Esta matriz \mathbf{B} relaciona las deformaciones de los nudos del elemento δ^e con las deformaciones unitarias en un punto interior cualquiera del elemento. Por lo tanto \mathbf{B} representa el campo de deformaciones unitarias que se supone existe en el interior del elemento finito, como consecuencia de la hipótesis de interpolación de deformaciones efectuada, y juega un papel fundamental en el método de los elementos finitos.

4.3.5. Ecuación de equilibrio de un elemento

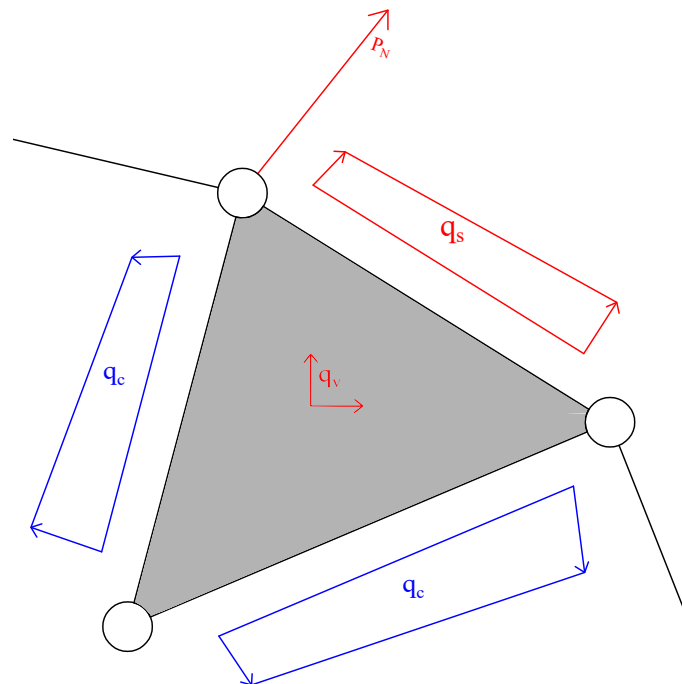


Figura 4.12: Fuerzas actuantes sobre un elemento finito

Una vez que han quedado establecidas las expresiones que relacionan los desplazamientos, las deformaciones unitarias y las tensiones, en función de los desplazamientos de los nudos, se está en condiciones de calcular las ecuaciones de equilibrio de un elemento finito. Si se considera un elemento finito cualquiera, las fuerzas que actúan sobre él, en el caso más general, son las siguientes (figura 4.12):

- Fuerzas exteriores de volumen aplicadas en el interior del elemento \mathbf{q}_v , que son en general variables dentro del elemento, y tienen tantas componentes como desplazamientos haya en cada punto.
- Fuerzas exteriores de superficie aplicadas en el contorno libre del elemento \mathbf{q}_s , que son en general variables a lo largo del contorno, y tienen tantas componentes como desplazamientos tenga cada punto del contorno. Al contorno sobre el que actúan las fuerzas de

superficie se le denomina s .

- Fuerzas interiores \mathbf{q}_c , aplicadas en la superficie del contorno de unión del elemento con los elementos vecinos, que son desconocidas. A dicho contorno de unión se le denomina c .
- Fuerzas exteriores puntuales aplicadas sobre los nudos del elemento \mathbf{P}_N^e

El trabajo virtual que producen estas fuerzas es:

$$\delta W^e = \int_v \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_v dv + \int_s \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_s ds + \int_s \delta \mathbf{u}^T \mathbf{q}_c ds + \delta \delta^{eT} \mathbf{P}_N^e \quad (4.35)$$

Donde $\delta \mathbf{u}$ es una variación virtual del campo de deformaciones \mathbf{u} y es la variación correspondiente a los grados de libertad de los nudos. Durante estas variaciones, las fuerzas exteriores se mantienen constantes. Aplicando el principio de los trabajos virtuales se obtiene que, para que haya equilibrio, el trabajo virtual de las fuerzas debe ser igual a la variación de la energía elástica U acumulada en el elemento, para cualquier $\delta \mathbf{u}$.

$$\delta W^e = \int_v \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dv \equiv \delta U^e \quad (4.36)$$

Donde $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$ es la variación en las deformaciones unitarias producida por la variación en las deformaciones $\delta \mathbf{u}$. Aplicando la hipótesis de interpolación de deformaciones (4.30), la variación virtual del campo de deformaciones es $\delta \mathbf{u} = \mathbf{N} \delta \boldsymbol{\delta}^e$, mientras las variaciones de las deformaciones unitarias se relaciona con la variación de las deformaciones nodales a través de la matriz \mathbf{B} como se indica en (4.34), queda $\delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \delta \boldsymbol{\delta}^e$. Igualando y sustituyendo se obtiene la ecuación de equilibrio aproximada mediante la hipótesis de interpolación de deformaciones:

$$\delta \delta^{eT} \left[\int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_c ds + \mathbf{P}_N^e \right] = \delta \delta^{eT} \left[\int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv \right] \quad (4.37)$$

O bien, como esta se cumple para cualquier variación arbitraria de las deformaciones, se obtiene:

$$\int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_c ds + \mathbf{P}_N^e = \int_v \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dv \quad (4.38)$$

Esta ecuación representa el equilibrio del elemento finito. Antes de seguir desarrollándola, la integral debida a las fuerzas distribuidas \mathbf{q}_c sobre el contorno de unión (desconocidas)

se sustituye por:

$$\int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_c ds = \mathbf{P}_c^e \quad (4.39)$$

Donde \mathbf{P}_c^e son unas fuerzas que están aplicadas sobre los nudos del elemento, y que son equivalentes a las fuerzas distribuidas aplicadas sobre los contornos de unión con los elementos vecinos. Ambas fuerzas producen el mismo trabajo virtual. La ecuación de equilibrio del elemento, sustituyendo en ella el valor de la tensión mediante la ecuación constitutiva² (4.25), queda finalmente:

$$\int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} dv \quad (4.40)$$

Sustituyendo a continuación el valor de la deformación unitaria en función de la matriz \mathbf{B} se obtiene:

$$\int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv \boldsymbol{\delta}^e = \int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v dv + \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e \quad (4.41)$$

Esta es la ecuación final de equilibrio del elemento finito considerado. En ella se identifican los siguientes términos:

- Matriz de rigidez del elemento finito. Se trata de una matriz cuadrada simétrica de tamaño igual al número de grados de libertad del elemento.

$$\mathbf{K}^e = \int_v \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dv \quad (4.42)$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes debido a las fuerzas actuantes por unidad de volumen.

$$\mathbf{P}_v^e = \int_v \mathbf{N}^T \mathbf{q}_v dv \quad (4.43)$$

- Vector de fuerzas nodales equivalentes a las fuerzas exteriores de superficie.

$$\mathbf{P}_s^e = \int_s \mathbf{N}^T \mathbf{q}_s ds \quad (4.44)$$

La ecuación de equilibrio del elemento puede ponerse en forma compacta como:

$$\mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e = \mathbf{P}_v^e + \mathbf{P}_s^e + \mathbf{P}_c^e + \mathbf{P}_N^e \quad (4.45)$$

²En esta ecuación no se plantean los esfuerzos residuales ni las deformaciones iniciales.

Esta ecuación de equilibrio está referida al sistema de ejes en el que se hayan definido las coordenadas y las deformaciones de los nudos, y al que lógicamente también se habrán referido las distintas fuerzas actuantes. En ella son conocidos todos los términos de carga salvo el debido a las fuerzas distribuidas interiores \mathbf{P}_c^e que se producen en el contorno de unión con los elementos vecinos.

4.3.6. Ecuación de equilibrio del conjunto

La ecuación de equilibrio obtenida para un elemento puede aplicarse a todos y cada uno de los elementos en que se ha dividido el sistema continuo. De esta manera se garantiza el equilibrio de todos y cada uno de ellos individualmente, apareciendo en dichas ecuaciones las fuerzas de conexión entre unos y otros elementos.

Para obtener la ecuación de equilibrio de toda la estructura es necesario además imponer el equilibrio de las fronteras de unión entre los elementos. En estas fronteras se han introducido las fuerzas de conexión entre los elementos \mathbf{q}_c , que a su vez han dado lugar a las fuerzas nodales equivalentes correspondientes \mathbf{P}_c , y que como se ha visto son energéticamente equivalentes a ellas. Por lo tanto el considerar el equilibrio de las fronteras es equivalente a considerar el equilibrio de los nudos de unión entre los elementos.

Si se plantean conjuntamente las ecuaciones de equilibrio de todos los nudos de unión entre todos los elementos, se obtiene un conjunto de ecuaciones que representa el equilibrio de toda la estructura. Estas ecuaciones se obtienen por ensamblado de las ecuaciones de equilibrio de los distintos elementos finitos que la forman:

$$\bigcup_e \mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e = \bigcup_e [\mathbf{P}_v^e + \mathbf{P}_s^e + \mathbf{P}_N^e] + \bigcup_e \mathbf{P}_c^e \quad (4.46)$$

Donde se ha empleado el símbolo \bigcup_e para indicar el ensamblado de las distintas magnitudes según los grados de libertad de la estructura.

En este proceso de ensamblado se cancelan todas las fuerzas de conexión entre unos elementos y los vecinos, pues se trata de fuerzas iguales y de signo contrario:

$$\bigcup_e \mathbf{P}_c^e = 0 \quad (4.47)$$

Al ser el sistema lineal, el término de la izquierda puede ponerse siempre como:

$$\bigcup_e \mathbf{K}^e \boldsymbol{\delta}^e = \mathbf{K} \boldsymbol{\Delta} \quad (4.48)$$

Siendo:

\mathbf{K} la matriz de rigidez de la estructura completa, obtenida por ensamblaje de las matrices de los distintos elementos según los grados de libertad correspondientes a cada uno.

Δ es el vector de grados de libertad de toda la estructura, que agrupa a los grados de libertad de todos los nudos.

De esta manera, la ecuación de equilibrio del conjunto de la estructura queda:

$$\mathbf{K}\Delta = \mathbf{P}_v + \mathbf{P}_s + \mathbf{P}_N \quad (4.49)$$

4.3.7. Aplicaciones

El método de los elementos finitos se utiliza para aproximar la solución de modelos matemáticos que surgen en casi todas las ramas de la ciencia y la ingeniería. En cada aplicación, el proceso físico ocupa una región del espacio conocido como el dominio del problema. Este es dividido en una malla. Para una cadena unidimensional, la malla se compone de segmentos de línea. Para una aplicación de dos dimensiones, tales como un modelo para la superficie de un tambor, la malla se suelen construirse a partir de pequeños triángulos o rectángulos. En una aplicación tridimensional, como un modelo para un edificio, la malla consiste a menudo en pequeñas tetraedros o cajas. Sobre los diferentes componentes de la malla, la solución para el proceso físico se aproxima por diferentes polinomios. Estas colecciones de polinomios están parcheadas juntos para obtener un polinomio en partes aproximación para la solución a lo largo de todo el dominio. Para construir estos polinomios, un sistema de ecuaciones se resuelve en un ordenador, dando el valor de los polinomios en los nodos de la malla.

El método de elementos finitos desempeña papeles cruciales en la modelización de estructuras elásticas. Un ejemplo de una estructura elástica es un edificio alto. Como el viento sopla durante una tormenta o como la Tierra vibra durante un terremoto, el edificio se inclina. Un ingeniero diseña el edificio para ser lo suficientemente fuerte para soportar el viento de una determinada velocidad y movimientos de la tierra que de una determinada magnitud. A fin de determinar si el diseño es lo suficientemente fuerte como para resistir el viento prescrito y movimiento de tierra, el ingeniero formula un modelo matemático para la construcción, por el viento y por un terremoto. Al estudiar la solución de elementos finitos para el modelo, el ingeniero puede determinar si el diseño del edificio es bastante robusta.

En la industria aeroespacial, el método de elementos finitos es utilizado para modelar el flujo de aire alrededor de las alas y las tensiones a lo largo de la aeronave. En el diseño de aeronaves, es importante para minimizar las fuerzas de arrastre en el avión: si el arrastre aumenta, el avión se ralentiza y más combustible es gastado durante un vuelo. Mediante el examen de los elementos finitos se obtienen soluciones correspondientes a diferentes diseños, un ingeniero puede mejorar la eficiencia de la aeronave.

Asimismo, en la industria automotriz, los ingenieros usan los elementos finitos para estudiar el arrastre en un automóvil que se desplaza en la carretera. De nuevo, mediante el estudio de las soluciones, un ingeniero puede determinar qué formas del automóvil son más aerodinámicas. Una mejor forma aerodinámica conduce a una mejor economía de combustible.

En algunas aplicaciones, es importante determinar cómo el proceso físico evoluciona en el tiempo. Por ejemplo, supongamos que una barra de acero en caliente se coloca en una tina de agua. Con el tiempo, el perfil de temperatura en la barra cambia. La ecuación diferencial que describe la conducción del calor se llama la ecuación de calor. El método de elementos finitos puede utilizarse para determinar el perfil de temperatura en cualquier momento dado. Así, para cada instante de tiempo, hay una solución de elementos finitos diferentes correspondientes a la distribución de la temperatura a lo largo de la varilla [19].

Parte II

Resumen Ejecutivo

Capítulo 5

Resumen Ejecutivo

5.1. Descripción del trabajo

En la presente investigación se realiza un análisis numérico y experimental de materiales alternativos a la madera para la elaboración de crucetas del sistema de distribución de energía eléctrica de media tensión de la ANDE, buscando determinar la mejor alternativa desde el punto de vista ambiental, técnico y económico.

5.1.1. Métodos y Técnicas utilizadas

Se adopta una metodología con enfoque descriptivo y experimental puesto que se realizaron ensayos mecánicos y eléctricos conforme normas establecidas [14].

A partir de una extensa revisión y obedeciendo a la existencia de las especificaciones técnicas [14] se escogen como material a estudiar los materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio.

Este material fue caracterizado mecánicamente por medio de ensayos de tracción según la norma ASTM D-3039, para ello se fabricaron las probetas teniendo en cuenta las recomendaciones de la citada norma, luego se realizaron en una máquina universal de ensayos, para la presentación de los resultados se procedió a realizar una distribución t de student para pequeñas muestras. Con los parámetros estadísticamente evaluados se propusieron modelos geométricos de crucetas a partir de teoría de flexión de vigas y las condicionantes establecidas [14]. Las geometrías propuestas se modelaron y simularon con el programa ANSYS 18.2 que utiliza el método de los elementos finitos como eje principal en dichas

simulaciones.

Por último conforme lo establecido nuevamente en [23], se realiza según la norma NBR-10296, ensayos de resistencia al trillamiento eléctrico a probetas fabricadas atendiendo a las recomendaciones de dicha norma, de los materiales seleccionados en primera instancia.

5.2. Justificación

La Misión de la ANDE es satisfacer las necesidades de energía eléctrica del país y actuar en el sector eléctrico regional, con responsabilidad social y ambiental como también excelencia en la administración y el servicio, para contribuir al desarrollo del Paraguay y al bienestar de su población [4].

Con el presente proyecto, al investigar materiales alternativos que cumplan con las exigencias de la ANDE, en cuanto a requerimientos de las crucetas, estos podrán suplir a las de madera en el sistema eléctrico de distribución acarreado varios beneficios a los usuarios y a la ANDE. Uno de ellos es la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico ya que se estudiarán y propondrán materiales con una mayor o igual resistencia mecánica pero más tolerantes a las acciones de la intemperie, con lo cual las fallas por crucetas rotas o consumidas disminuirán.

Otro beneficio es contar con una alternativa que evite el uso de madera, lo cual es una contribución con el medio ambiente en especial con los bosques del Paraguay, ayudando a que recuperen su inmensidad y las especies más valoradas del bosque atlántico del Paraguay. La ANDE logrará gracias a lo mencionado una mejor imagen referente a su responsabilidad con el medio ambiente y por brindar una mejor calidad en su servicio.

No se propondrá un cambio drástico para el sistema de distribución, por consiguiente la utilización de un nuevo material podrá realizarse de manera gradual, cambiando las existentes por las crucetas de materiales propuestos en este proyecto conforme la madera se desgasta y ya no puedan cumplir su función en la red de distribución de media tensión.

5.3. Finalidad del proyecto

Con el desarrollo de este Proyecto Final de Grado se busca conocer las características eléctricas y mecánicas de materiales alternos a la madera, modelando en un ambiente de

simulación las crucetas de distribución de media tensión fabricadas con estos materiales se pretende obtener datos que aprueben los ensayos mecánicos de flexión.

A través de experimentación se busca conocer las propiedades eléctricas de dichos materiales.

Este estudio abarca los ensayos más preponderantes con los cuales se puede asumir que los materiales bien pueden ser utilizados como crucetas de distribución.

5.4. Metas

Analizar al menos dos materiales alternativos a la madera para su utilización como crucetas del sistema de distribución de la ANDE.

5.5. Objetivos

5.5.1. Objetivos generales

Analizar materiales alternativos a la madera para la construcción de crucetas en el sistema de distribución de media tensión de la ANDE.

5.5.2. Objetivos específicos

- Determinar criterios para la sustitución de las crucetas de madera.
- Seleccionar materiales a estudiar para suplir a la madera.
- Realizar una simulación computacional para predecir la resistencia a fuerzas mecánicas de los materiales seleccionados.
- Realizar estudios, pruebas mecánicas y eléctricas a los materiales seleccionados.
- Evaluar económicamente los materiales seleccionados.

5.6. Beneficiarios

El beneficiario directo de esta investigación es la empresa proveedora de energía eléctrica ANDE. Por otro lado la fabricación de crucetas en el país beneficiará al mercado local proveyendo fuentes de trabajo y un producto de posible exportación.

5.7. Producto

Conocimiento científico sobre materiales compuestos, específicamente para la construcción de crucetas.

5.8. Especificaciones de actividades y tareas realizadas

En este Proyecto Final de Grado se llevarón a cabo las siguientes actividades:

- Revisión de materiales bibliográficos, artículos y trabajos científicos para la selección de materiales a estudiar.
- Fabricación de probetas según normas ASTM D-3039 y NBR-10296.
- Ensayos mecánicos (tracción).
- Análisis de datos del ensayo mecánico con herramientas estadísticas.
- Propuesta geométrica de la cruceta a través de cálculos de flexión.
- Simulaciones a base de procesos computacionales.
- Ensayos eléctricos (trillamiento).

5.9. Recursos necesarios

5.9.1. Recursos humanos

Para la realización de esta investigación fue de vital importancia la colaboración de asesores científicos y técnicos calificados en el campo de las ciencias de los materiales tales como:

- Personal especializado en fabricación de compuestos poliméricos, para la confección de las probetas experimentales.
- Operario de máquina universal de ensayos mecánicos, en este caso se contó con la participación del físico encargado del laboratorio de materiales de la FP-UNA, con vasta experiencia en dichos procedimientos.
- Experto en el análisis de datos, específicamente de distribuciones estadísticas que tuvo lugar posterior a la obtención de resultados en los ensayos de tracción.
- Plantel de profesionales de los laboratorios LACTEC que intervinieron en los ensayos eléctricos.
- Experimentado en simulaciones computacionales por el método de los elementos finitos.
- El encargado de tesis y el tutor son importantes actores como consultores en el cause del PFG.

5.9.2. Recursos materiales

Para la ejecución del presente proyecto final de grado fueron necesarios los siguientes materiales:

- Biblioteca virtual CICC0.
- Normas y especificaciones técnicas.
- Resina de poliéster y catalizador mek.
- Manta unidireccional de fibra de vidrio.

- Manta cortada de fibra de vidrio.
- Rodillo metálico.
- Brocha.
- Algodón y alcohol isopropílico.
- Guantes de látex y tapabocas.
- Molde de cerámica.
- Cera convencional.
- Calibre digital.
- Balanza digital con precisión de 1 gramo.
- Sierra de corte manual.
- Máquina universal de ensayos.
- Computadora.
- Licencia académica ANSYS 18.2.
- Lijas de carburo de silicio granulado 400.
- Solución salina.
- Fuente de tensión variable de 1Kv a 5Kv.

5.10. Factibilidad económica

5.10.1. Costos

En el país la fibra de vidrio industrialmente más utilizada es la manta cortada, chopped strand mat, una de las empresas que la importa es Quimaflex S.A. La misma viene en una presentación de 60 kg en un rollo de 1,4 metros de longitud, el espesor promedio de la manta es de 0,4 mm con una densidad superficial de 0,030 kg/cm², el precio de adquisición del material es de 18500 Gs/kg. Cabe destacar que el obrero debe utilizar protecciones como tapabocas y guantes al momento de manipular este tipo de fibra por su volatilidad.

Mientras que la fibra de vidrio en formato unidireccional, es un material escaso en el mercado local, debido a esto para la realización de este proyecto, se importó el mismo desde el mercado Chino; presentación en rollo de 17 kg, consiste en hilos continuos de fibra de vidrio adyacentes entre sí formando un tejido, se estima un precio de adquisición de 21800 Gs/kg. La matriz de poliéster utilizada es de la marca Blascor fabricada en Brasil, también es un producto de fácil adquisición en el mercado local a un precio de 23000 Gs/lt.

En cuanto a infraestructuras, se utilizaron los laboratorios de materiales de la FP-UNA la cual se consiguió a través de un convenio entre las instituciones. Se contrató a la empresa LACTEC ubicado en la ciudad de Curitiba, Brasil, para los ensayos eléctricos, los cuales se llevaron a cabo con todas las regulaciones establecidas.

En la tabla 5.1 se estima el costo total de la investigación para ser replicado en próximas ejecuciones.

Actividades	Costos (Gs.)
Contratación de investigador junior	8.000.000
Contratación de investigador tutor	4.000.000
Compra de normas NBR y ASTM	390.000
Compra de manta de fibra de vidrio unidireccional	500.000
Compra de mata de fibra de vidrio cortada	400.000
Compra de resina de poliéster	250.000
Fabricación de probetas para ensayo de tracción	600.000
Realización de ensayos de tracción mecánica	1.840.000
Procesamiento de datos y presentación	0
Análisis por MEF	0
Fabricación de probetas para ensayo de resistencia al trillamiento eléctrico	600.000
Envío de las probetas a laboratorio de AT	400.000
Realización de ensayos de resistencia al trillamiento eléctrico	4.896.000
Análisis y reporte de los ensayos eléctricos	0
Divulgación	1.500.000
Sub-total	23.376.000
Imprevisto	2.337.600
Total	25.713.600

Tabla 5.1: Costo total de la investigación

Parte III

Ingeniería de Diseño

Capítulo 6

Materiales Compuestos

Para el análisis propuesto, de todos los materiales considerados ingenieriles [26], se optó por los compuestos, resina de poliéster con refuerzos de fibra de vidrio en dos disposiciones, por las buenas cualidades en cuanto a:

- A. Disponibilidad en el mercado nacional e internacional.
- B. Resistencia mecánica.
- C. Aislación eléctrica.
- D. Resistencia a los efectos de la intemperie.

El criterio A obedece a la búsqueda de proponer un material que pueda fabricarse a partir de materias primas económicamente accesibles dentro de los límites territoriales. Se optó por los criterios B, C y D debido a su estrecha relación con las características y los ensayos básicos que deben cumplir las crucetas de distribución según las especificaciones técnicas.

En la tabla 6.1 se contemplan los diferentes grupos de materiales, además se le asigna a cada material puntuaciones entre baja, media y alta de acuerdo a cada característica de importancia.

En particular los materiales compuestos pueden contener a los demás grupos y aprovechar de ellos sus propiedades, se componen de una o más fases discontinuas envueltas en una fase continua que actúa como ligante, normalmente la fase discontinua suele tener más rigidez y resistencia por ello se le conoce como refuerzo, mientras la fase continua es conocida como matriz [21]. Las propiedades del compuesto deben interpretarse como un sistema en donde ambas fases enmarcan dichas propiedades, así también la geometría del

refuerzo (forma, tamaño y distribución) y su concentración [1].

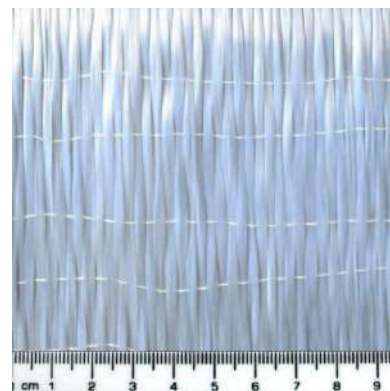
GRUPO DE MATERIALES	CALIFICACION DE LAS CARACTERISTICAS			
	A	B	C	D
METALES	ALTA	ALTA	MUY BAJA	MEDIA
CERAMICOS Y VIDRIOS	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA
POLIMEROS	ALTA	MEDIA	ALTA	ALTA
MATERIALES COMPUESTOS	MEDIA	ALTA	ALTA	ALTA
SEMICONDUCTORES	BAJA	ALTA	BAJA	MEDIA

Tabla 6.1: Criterios para la selección de materiales a ser analizados

De los materiales compuestos específicamente se estudiaron los reforzados con fibras de vidrio, laminadas en capas simples, continuas y discontinuas. Se caracterizaron los compuestos con matrices de resina de poliéster y refuerzos de manta de fibra de vidrio unidireccional (continuas) y cortada (discontinuas). Esta elección obedece a la existencia de la norma de Crucetas Poliméricas [14]. La manta de fibra de vidrio cortada es conocida como Chopped Strand Mat (CSM), consiste en fibras cortadas y dispuestas de manera aleatoria (figura 6.1-a), por esa razón, en conjunto con la matriz, este material se considera isotrópico¹, la fibra de vidrio en disposición unidireccional (figura 6.1-b), integrándose con la matriz es considerado un material ortotrópico².



(a) Chopped Strand Mat



(b) Unidireccional

Figura 6.1: Tipos de fibra de vidrio

Siendo la misma matriz en ambos materiales, estos compuestos varían uno de otro en la concentración, geometría y arreglo del refuerzo. En cuanto a composición ambos refuerzos son fibra de vidrio tipo E, el cual es la más utilizada en la fabricación de materiales

¹Las características mecánicas del material son constantes en todas las direcciones ortogonales

²Las propiedades y las características mecánicas del material varían en función a los ejes ortogonales

Constituyente	% en peso
Sílice (SiO ₂)	53-54
Alúmina (Al ₂ O ₃)	14-15,5
Cal (CaO)	20-24
Óxido de magnesio (MgO)	6,5-9
Óxido de boro (B ₂ O ₃)	0-0,7
Flúor (F)	< 1
Óxido de sodio (Na ₂ O)	
Óxido de circonio (ZrO ₂)	
Óxido de potasio (K ₂ O)	
Óxido de hierro	

Tabla 6.2: Composición química de la fibra de vidrio tipo E [5]

compuestos, abarcando un 90 % del mercado, pues ofrece la suficiente resistencia mecánica a un bajo precio. En la tabla 6.2 se detalla la composición química de la mencionada fibra.

Las resinas de poliéster forman el grupo más importante de las resinas termoestables utilizadas en la fabricación de materiales compuestos; en concreto se encuentran presentes en el 90 % de los laminados comerciales [10], se pueden clasificar de acuerdo a su constituyente base (ácido o anhídridos insaturados, ácido o anhídrido saturados, glicoles o monómeros). La resina utilizada en este trabajo es de base anhídrida insaturada de baja viscosidad reactiva con catalizador de peróxido mek.

Existen varios métodos de fabricación del compuesto fibra de vidrio y resina de poliéster, entre ellos la laminación manual, laminación en vacío y la pultrusión, la última es utilizado para la fabricación directa de barras continuas. Cada método, en el orden citado, provee al material de mejores características mecánicas [9].

Laminación manual (Hand lay up). La técnica del laminado manual utilizada para la realización de las diferentes muestras en este proyecto, es sin duda la mas antigua de todas las técnicas conocidas en la fabricación de piezas de materiales compuestos. Con la misma se aprovechan las ventajas de los sistemas de matrices de poliéster y viniléster en su procedimiento de curado: que no necesitan la aportación de calor externo para su polimerización al completo ni la alta presión de moldeo para su estratificación. A pesar de ser una técnica sencilla y artesanal, con mucha dependencia de la habilidad del operario, continua siendo, a lo largo de los años, la más difundida, por su bajo coste como por su adecuación a piezas de diferentes tamaños y formas sin excesivos problemas. El proceso de laminado manual consiste en la aplicación de sucesivas capas de material (fieltros, tejido y ensamblados) impregnadas con una resina, y consolidadas mediante la acción de un

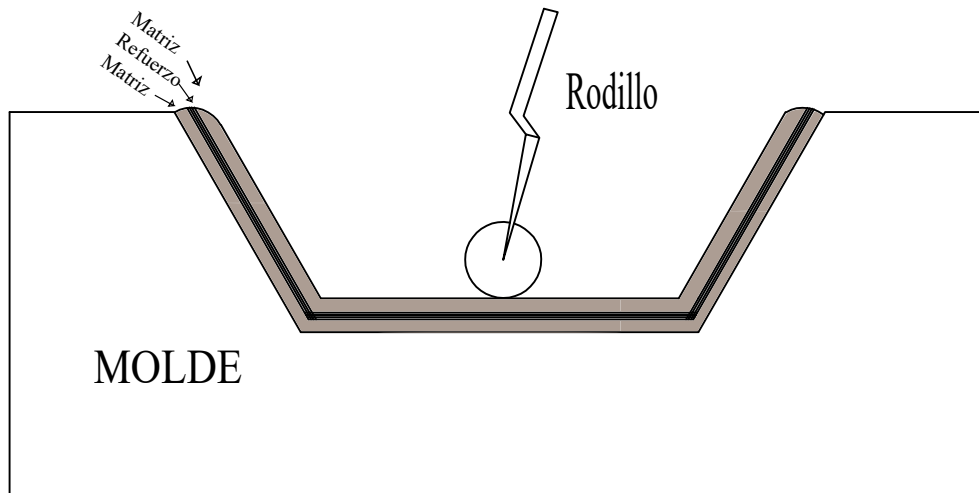


Figura 6.2: Método del laminado manual

rodillo o brocha sobre la superficie de un molde. La acción de pasar el rodillo sobre la superficie tiene dos razones fundamentales: la primera es ayudar a la impregnación del refuerzo, y la segunda, intentar evitar que queden burbujas de aire atrapadas entre las sucesivas capas del estratificado. La presión de compactación no será otra, entonces, que la ejercida por la mano sobre el rodillo [7].

El método de laminación manual es empírico comparado con los métodos modernos (pultrucción, laminado en vacío, etc.), su principal ventaja frente a estos radica en su bajo costo de inversión para iniciar una producción, por esta razón se opta por la utilización de este método en la ejecución de este proyecto.

6.1. Propiedades mecánicas

Con materiales compuestos, las combinaciones de propiedades son la clave para lograr lo que no podía lograrse con materiales individuales debido a la inclusión de material de refuerzo en una matriz. Diferentes disposiciones geométricas de las fibras son posibles, las fibras pueden estar alineadas unidireccionalmente, alineadas en 90° entre sí en una tela tejida, u orientadas aleatoriamente, las fibras pueden ser muy largas o troceadas en segmentos cortos para una fácil fabricación.

El refuerzo es utilizado para impartir rigidez a la matriz (mayor módulo de elasticidad). Las deformaciones deben ser las mismas en ambos materiales, matriz y la fibra, $\epsilon_f = \epsilon_m$.

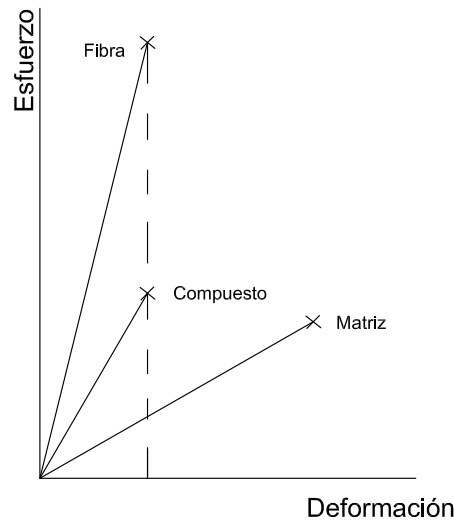


Figura 6.3: Curva esfuerzo-deformación para la matriz, la fibra y el compuesto.

Para cargas paralelas a las fibras unidireccionales, el módulo de elasticidad es [20]:

$$E = E_f V_f + E_m V_m$$

donde E_f y E_m son los módulos de elasticidad de la fibra y de la matriz respectivamente, y V_f y V_m son las fracciones de volumen correspondientes a la fibra y la matriz respectivamente, esto a menudo es llamada regla de la mixtura. El módulo es mucho más bajo para la carga perpendicular a las fibras. Las capas cruzadas o las fibras orientadas aleatoriamente dan rigidez en otras direcciones. Una aproximación de ingeniería útil para alineación aleatoria de fibras es [20]:

$$E \approx (3/8)E_{\perp} + (5/8)E_{\parallel}$$

Para compuestos donde las fibras se disponen de manera uniaxial en la matriz, la regla de la mixtura no satisface, por lo que se deben considerar ambos módulos de elasticidad, perpendicular (E_{\perp}) y paralela (E_{\parallel}).

Como se observa en la figura 6.3, las fibras alcanzan límites de ruptura mucho antes que la matriz. Por lo tanto, la resistencia a la tracción del compuesto es $UTS < V_m \cdot UTS_m + V_f \cdot UTS_f$. Por lo general, la carga transportada por las fibras es mayor que la carga de rotura de la matriz, por lo que el material compuesto fallará cuando las fibras se rompan. El último esfuerzo del compuesto (UTS) está dado por:

$$UTS = V_m \sigma_m + V_f (UTS)_f$$

Donde $\sigma_m = (E_m/E_f)(UTS)_f$ es el esfuerzo acarreado por la matriz cuando las fibras rompen[20].

6.1.1. Fracción volumétrica de fibra

La rigidez y la resistencia del compuesto deben incrementar con el aumento del porcentaje de fibra, pero en la práctica existen limitaciones al tratar de aumentar por demasía esta fracción del volumen. Las fibras deben separarse unas de otras, a menudo se pre-cubren para asegurar esta separación, y para controlar la unión entre fibras y matriz. La variabilidad en el espaciado de las fibras, resulta de la infiltración de las resinas líquidas sobre las disposiciones de fibras, este es aproximadamente 55 a 60 %, límite superior práctico para las fibras en alineación unidireccional. En refuerzos de tipo tejido es incluso más bajo[20].

Los límites de rotura y módulos de elasticidad según la fuente [20] de cada tipo de disposición de fibra con su respectivo volumen fraccional se aprecian en la tabla 6.3.

Fibra (disposición)	Vol. %	Módulo de young (GPa)		UTS (MPa)	
		Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
E-glass (UD)	60	40	10	780	28
E-glass (Bidireccional)	35	16,5	16,5	280	280
E-glass (CSM)	20	7	7	100	100

Tabla 6.3: Propiedades mecánicas usuales de compuestos fibra y resina polimérica [20]

Las propiedades presentadas en la tabla 6.3, se obtienen normalmente con el porcentaje mostrado y con métodos diferentes al laminado manual, puesto que en la laminación manual este porcentaje es menor, se buscaron los mismos parámetros para los compuestos fabricados por dicho método con materiales adquiridos en mayor parte del mercado local, los valores de la tabla 6.3 fueron utilizados únicamente como referencia para determinar cuan bueno fue el método y la calidad de los materiales. Las actividades para llegar a estos valores se presentan en el siguiente capítulo.

Capítulo 7

Cálculos mecánicos

En este capítulo se estudiarán los efectos mecánicos en los materiales propuestos bajo ensayos de flexión establecidos en [14], esto obedece al trabajo que la cruceta realiza en servicio. A través de cálculos de mecánica de sólidos revisados en el Capítulo 4 se proponen cambios en la sección transversal de estas crucetas, además se comparan estos resultados con un análisis de elementos finitos; para el mismo se utilizó el software ANSYS student 18.2 con licencia académica. Para la realización de estos cálculos fue indispensable la caracterización de los compuestos por medio de ensayos de tracción con el cual se obtuvieron las siguientes propiedades:

- Esfuerzo máximo a la rotura (UTS).
- Última deformación a la rotura.
- Módulo de elasticidad (Young).

7.1. Ensayos de tracción

Los cálculos de flexión requieren de ciertos valores como los mencionados en la tabla 6.3 que se obtienen de la caracterización mecánica de los materiales; para ello se realizaron ensayos de tracción, conforme norma *ASTM-D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, el cual establece todos los requerimientos, parámetros y tolerancias para la realización de este tipo de ensayos a materiales compuesto. Con este fin se fabricaron las muestras según las recomendaciones de la norma citada, como ya se mencionó el método de fabricación escogido fue la laminación manual.

Recordemos, las crucetas estudiadas en este proyecto son las que se pueden fabricar con los compuestos; fibra de vidrio (manta cortada) y fibra de vidrio tipo tejido unidireccional en matriz de poliéster, el curado se consiguió a temperatura ambiente durante 48 horas utilizando catalizador de peróxido (comercialmente incluido con la resina) la proporción definida fue de 1000:12, el cual provee un efecto exotérmico. Se realizaron placas de estos compuestos sobre una superficie previamente adecentada con algodón y alcohol isopropílico, posteriormente fue impregnada de cera para el desmolde favorable, con la ayuda de un rodillo metálico se compactaron las capas de refuerzo una a la vez en la matriz de poliéster (véase apéndice A.1). Luego estas placas fueron cortadas con sierra, en segmentos rectangulares con dimensiones aproximadas a las que se muestran en la figura 7.1.

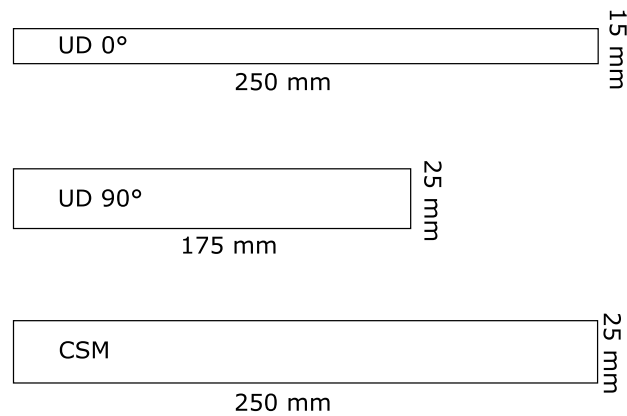


Figura 7.1: Dimensiones de las muestras de materiales compuestos para ensayo a tracción según recomendaciones de la norma ASTM D3039

Recordando que el compuesto unidireccional es un material ortotrópico, se realizaron dos conjuntos de ensayos de tracción con disposición de las fibras de manera longitudinal 0° y transversal 90° , sin embargo solo fue necesario la realización de un conjunto de ensayos al compuesto con refuerzos de fibra cortada. La fracción volumétrica de las probetas se obtuvieron al pesar, la fibra de vidrio antes de la laminación, y el compuesto resultante después del acabado. Se obtuvieron porcentajes de 39.4 % de refuerzo para las muestras con disposiciones unidireccionales y 25 % de refuerzo para las muestras reforzadas con fibra cortada (tabla A.1). La forma rectangular de los especímenes fue adoptado de la norma ASTM D3039 (figura 7.1), según la cual pueden ser admitidas otras dimensiones, siempre y cuando sean de forma rectangular. Por cada conjunto de ensayos se realizaron 6 muestras que fueron etiquetadas para discriminar el material e individualizar la probeta, totalizando 18 la cantidad de probetas fabricadas, se midió con calibre 6 veces en puntos centrales el ancho y el grosor de cada muestra, de esta manera se obtuvo individualmente el área transversal promedio (véase apéndice A.1), dato indispensable para obtener el esfuerzo máximo de rotura (ecuación 4.12).



Figura 7.2: Máquina de tracción universal

7.1.1. Procedimientos y resultados

Se utilizó una máquina de tracción universal tipo servo¹ con dimensiones de $800\text{mm} \times 650\text{mm} \times 2200\text{mm}$ capaz de generar un máximo de 10kN de carga (figura 7.2), esta máquina se encuentra ubicada en la Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción. Cuenta con agarres de tipo dentado ($0\text{--}7\text{ mm}$ de apertura), con una distancia máxima entre pinzas de 1420mm . La exactitud de la medición de la fuerza es de $0,5\%$ y del desplazamiento es de $\pm 0,5\%$ de la indicación. La velocidad puede ser regulada entre 0.05 a 500 mm/min , la velocidad estipulada por la norma y configurada en la elaboración de los respectivos ensayos fue de 2 mm/min . La temperatura del ambiente fue regulada a $22 \pm 1\text{ C}^\circ$.

En el software controlador de esta máquina se cargaron por cada ensayo el ancho y el grosor de la probeta (véase apéndice A.1) y la distancia entre las pinzas, se realizó la medición manualmente con calibre, se recabaron datos tabulados de fuerza, elongación, esfuerzo, y deformación porcentual.

Finalmente descartando los ensayos con desviaciones considerables, los cuales se pudieron generar por casos fortuitos. Se realizaron 5 ensayos válidos a probetas reforzadas con

¹Las máquinas de tracción tipo servo, son accionadas por motores eléctricos.

CSM descartándose 1 por desviación alta, 5 ensayos válidos a probetas reforzadas con UD 90° (1 probeta falló a destiempo), 2 ensayos válidos a probetas reforzadas con UD 0° (se sobrepasó los límites de la máquina y 2 pruebas tuvieron desviaciones muy altas del promedio). Las averías de los materiales con refuerzos CSM y UD 90°, fueron puntuales de manera que posterior a la falla quedaron divididas en dos partes, los puntos de rotura se produjeron en variadas zonas de las muestras siendo frecuente las cercanas a los extremos. Las fallas de las muestras reforzadas con UD 0° fueron de manera escalonada en forma de rasgaduras, exponiéndose las fibras fuera de la matriz (véase figura A.4).

Se analizaron los datos tabulados obtenidos de los respectivos ensayos de tracción, la muestra fue considerada pequeña, por lo que se utilizó la distribución t de Student para la presentación de los resultados con un nivel de confianza del 95 %, la presentación de estos resultados se aprecia en la tabla 7.1.

CSM	\bar{X}	S	t	$\bar{X} \pm t \frac{S}{\sqrt{n}}$
Tensión de rotura (MPa)	112,05	6,49	2,13	112,05±6,19
deformación unit.(mm/mm)	0,043	0,0037	2,13	0,043±0,0036
Elasticidad (MPa)	2854,21	121,84	2,13	2854±116,17
UD 0				
Tensión de rotura (MPa)	457,59	1,43	2,35	457,59±1,69
deformación unit.(mm/mm)	0,053	0,001	2,35	0,053±0,0011
Elasticidad (MPa)	10395,68	244,58	2,35	10385,68±287,75
UD 90				
Tensión de rotura (MPa)	12,19	2,018	2,13	12,19±1,93
deformación unit.(mm/mm)	0,014	0,0028	2,13	0,014±0,0027
Elasticidad (MPa)	1325,24	173,11	2,13	1325,24±165,05

Tabla 7.1: Valores estadísticos de los resultados del ensayo de tracción

Las medidas del esfuerzo máximo fueron totalmente los esperados; dando a conocer una relación entre la fracción volumétrica del refuerzo y el esfuerzo a rotura. En cuanto a la medida del modulo de Young (elasticidad) existe un decremento respecto a la tabla 6.3; estos fueron de 59,9 % en manta cortada, 74 % en UD 0° y 86,7 % en UD 90°. Estos decrementos pueden ser debido a los siguientes factores:

- Método de fabricación.
- Calidad de los materiales utilizados.
- Método de curado.

Este decremento afectará directamente al índice de deformación de las crucetas fabricadas con estos compuestos, las cuales deben ser sometidas a ensayos que requieren aplicaciones de fuerzas considerables.

En la figura 7.3 se observan tres curvas esfuerzo-deformación correspondientes a los ensayos cuyos resultados son próximos al promedio. Para obtener las rectas tangentes cuyas pendientes representan la elasticidad del material, se tomaron dos puntos de la curva por debajo del 25 % del punto de falla en donde la linealidad es evidente; cabe destacar que en las primeras partes de las curvas no se observa dicha linealidad. Este criterio para obtener la elasticidad fue adoptado de la norma ASTM D-3039.

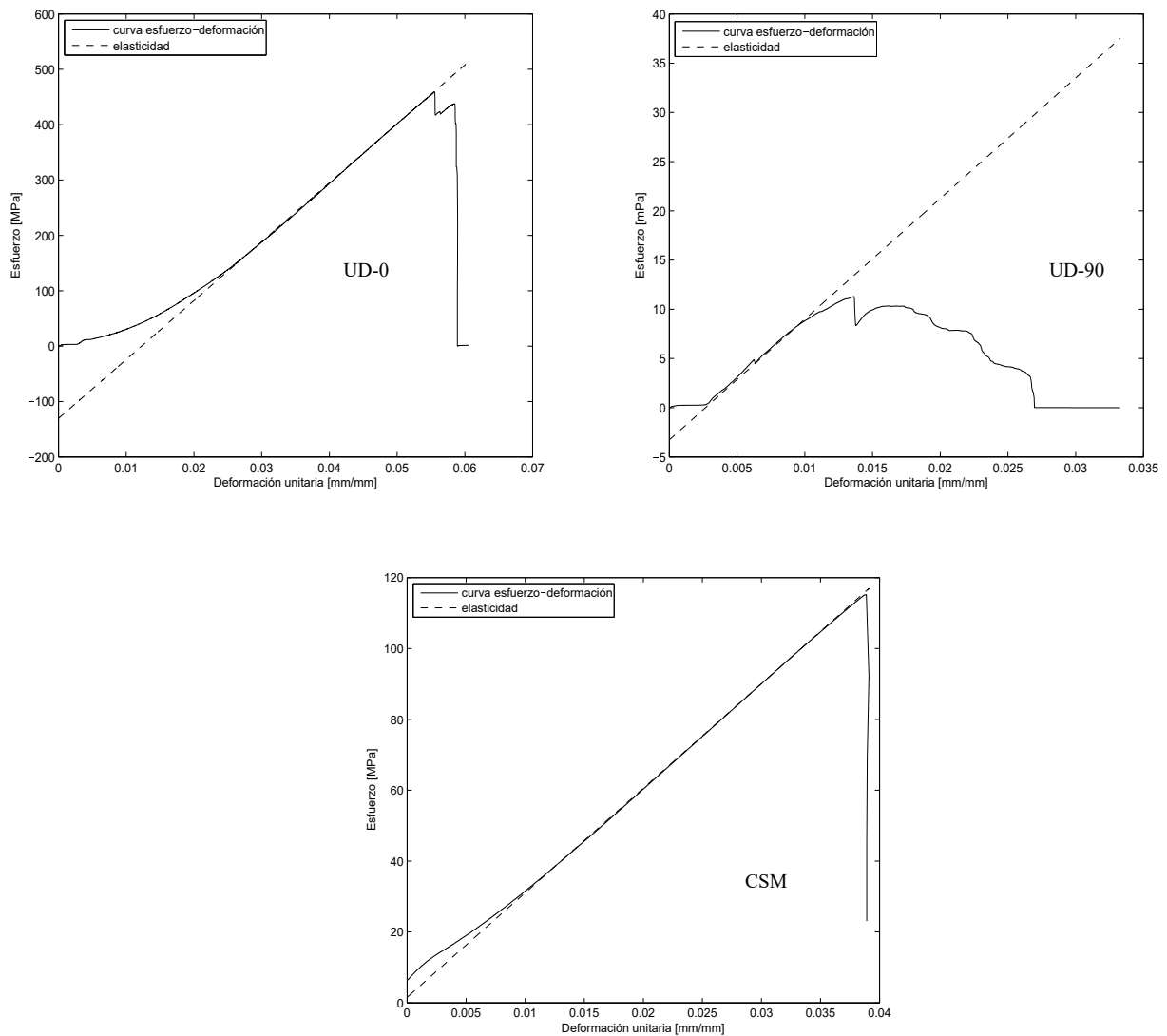


Figura 7.3: Curvas esfuerzo deformación de los compuestos analizados

7.2. Cálculos de flexión

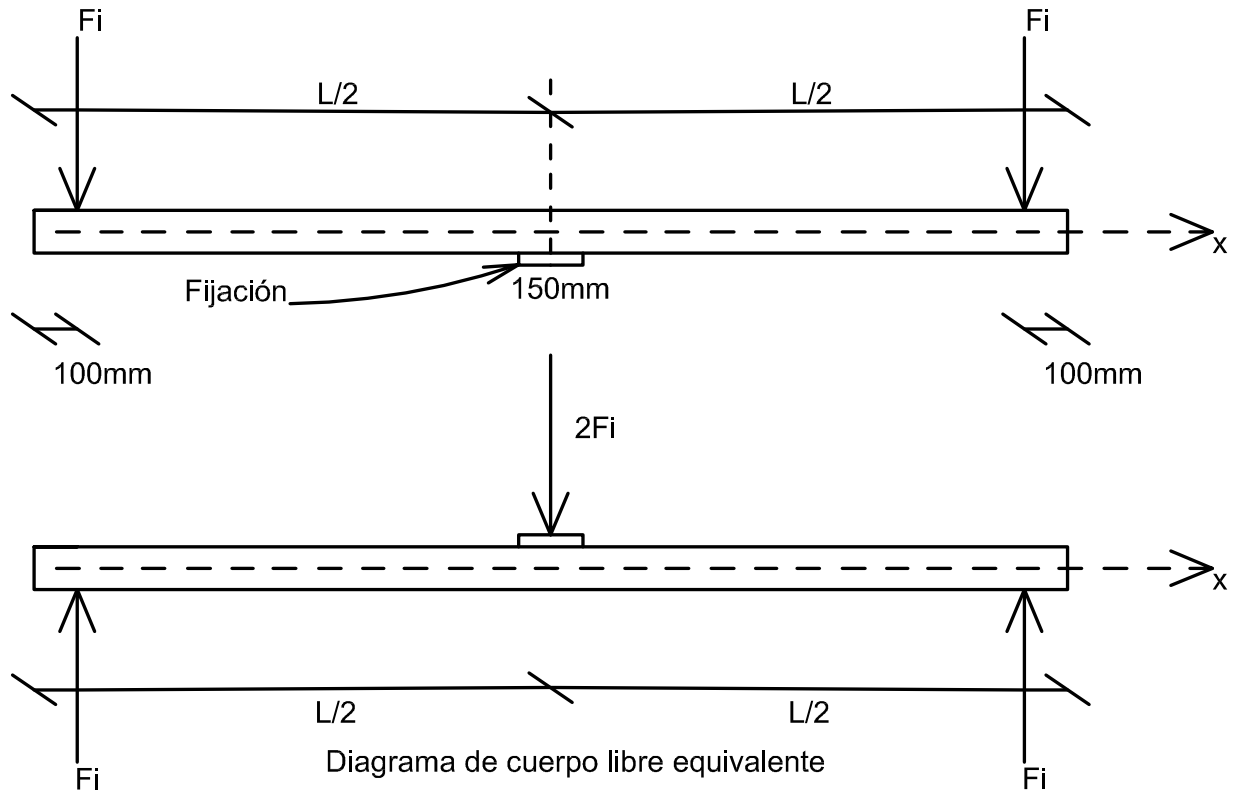


Figura 7.4: Aplicación de las fuerzas flexionantes, modelo equivalente

Según las especificaciones técnicas de crucetas poliméricas [14], la aprobación del ensayo de flexión depende del comportamiento de la cruceta frente a las cargas aplicadas como se muestra en la figura 7.4, se utilizó el arreglo equivalente (flexión cóncava) por ser más sencillo al análisis. Se estimaron los siguientes escenarios de ensayo; las fuerzas (F_i) aumentan de manera gradual de modo que al llegar al valor de 4000 N (considerada fuerza nominal), en este caso la cruceta no debe presentar una flecha mayor a 60 mm medida en el centro de la misma, criterio al que se denominó en el presente como **criterio de deformación**. Cuando F_i sea igual a 8000 N (fuerza de rotura) no debe presentar grietas o averías visibles, **criterio de rotura**. Para realizar un ensayo de flexión real a una cruceta de los materiales anteriormente caracterizados a tracción, se obtuvieron las funciones de la fuerza cortante y momento flexionante respecto a la coordenada longitudinal (x) de

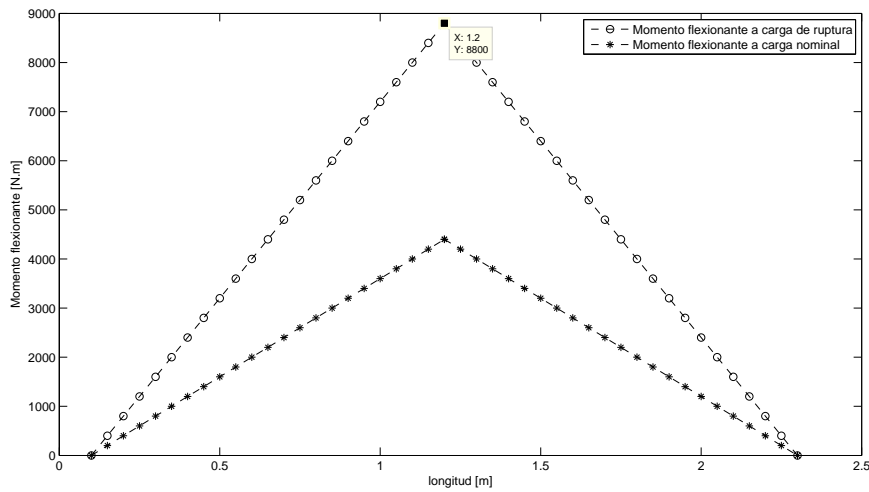


Figura 7.5: Diagrama de momento flector

la cruceta, para ello se despreció el peso de la barra pues es considerablemente pequeño comparado con las fuerzas soportadas que generan una fuerza cortante igual a F_i positiva desde un extremo hasta el centro de la cruceta y negativa desde este punto hasta el otro extremo (según la convención de signos usualmente adoptadas). La figura 7.5 muestra la representación del momento flexionante, debido a la configuración de cargas presentadas en el diagrama equivalente. También se obtuvo por este medio el valor del máximo momento flexionante a rotura ($8800[\text{N/m}]$).

Posteriormente se utilizaron las ecuaciones 4.12 y 4.16 que condicionan la deformación y el esfuerzo máximo respectivamente, de un cuerpo bajo flexión, se escudriñaron las mencionadas expresiones percibiendo los siguientes puntos:

1. El momento de inercia del área transversal de la cruceta influye en la flecha y punto de falla de manera inversa.
2. Se puede escribir la función que describe la flecha (y) en cualquier punto x , teniendo en cuenta que F_i es la fuerza aplicada (figura 7.4) como:

$$y = \frac{1}{EI} \left[\frac{F_i}{6} \langle x - 0, 1 \rangle^3 - \frac{F_i}{3} \langle x - 1, 2 \rangle^3 - 0,605F_i x + 0,0605F_i \right] \quad (7.1)$$

3. La sección transversal de la cruceta de cada material se verá condicionada por una de estas expresiones.

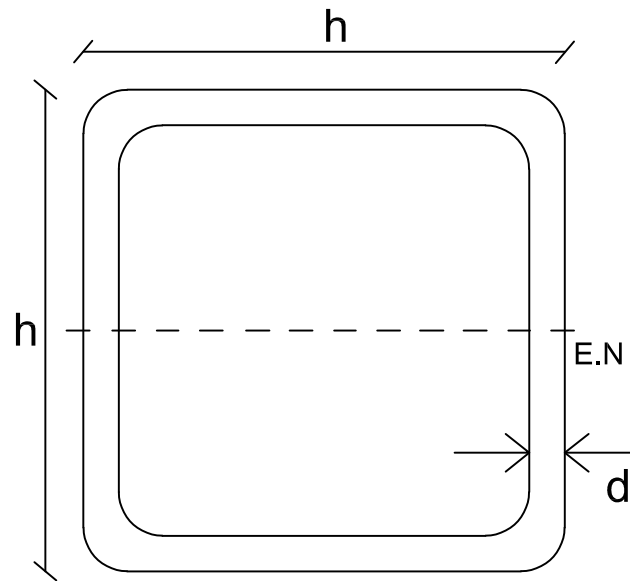


Figura 7.6: Geometría transversal de la cruceta de distribución

Las especificaciones técnicas, proponen una sección transversal de la cruceta con forma cuadrada sin cantos visibles, o bien, biselado de 1 cm de radio. En la figura 7.6 se observa la forma de esta área transversal, donde h corresponde al lado de dicho cuadrado y d al grosor, en este trabajo se propone un cambio de estos parámetros sin interferir en la versatilidad y utilidad de la cruceta. Trazando el eje neutro, se estableció el momento de inercia respecto a dicho eje como:

$$I = \frac{1}{12} [h^4 - (h - 2d)^4] \quad (7.2)$$

Esta ecuación se estableció sin tener en cuenta los cantos biselados, porque no presentan influencia sobre dicho parámetro. Ahora bien, planteando como criterio la deformación de la cruceta en el ambiente de flexión. En la ecuación 7.1 se reemplazaron las siguientes igualdades; $F_i = 4000N$, $y = -0,06m$ deformación dada para $x = 1,2m$, de la tabla 7.1 se utilizaron los valores medios de la elasticidad de cada material, por ende se obtuvieron dos formulaciones: 7.3a para el material con refuerzo de fibra de vidrio tipo manta y 7.3b para el material con refuerzo de fibra de vidrio unidireccional². Restringiendo los valores de h y d según el criterio de deformación, las mismas se observan trazadas en la figura 7.7.

$$d = 0,5h - 0,0087379\sqrt[4]{10721250h^4 - 1331} \quad (7.3a)$$

²Como la cruceta se fabricará de manera que las fibras unidireccionales se acomoden a lo largo de la misma para estos cálculos se utilizaron las propiedades del material UD-0°.

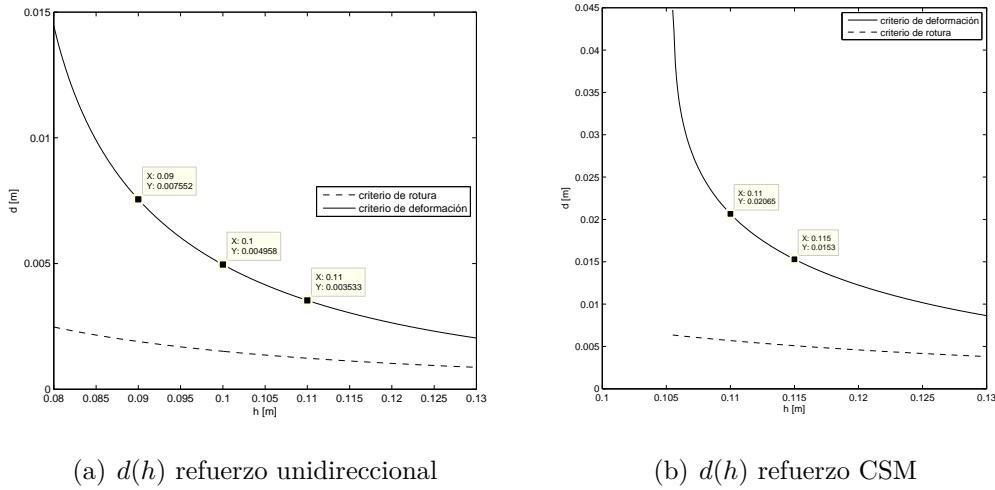


Figura 7.7: d versus h bajo criterios de deformación y ruptura

$$d = 0,5h - 0,011524\sqrt{3543750h^4 - 121} \quad (7.3b)$$

Por otro lado teniendo en cuenta el criterio de rotura, se introdujeron en la ecuación 4.12 los valores del esfuerzo máximo admisible de cada material (tabla 7.1), el momento flexionante máximo (figura 7.5) y la expresión del momento de inercia 7.2. Se obtuvieron las formulaciones: 7.4a para el material reforzado con fibra de tipo manta y 7.4b para el material con refuerzos de fibra de vidrio unidireccional, obviamente restringiéndose h y d bajo el criterio de rotura. Como se observa en la figura 7.7 el criterio de deformación es más exigente, por ende como condición principal para la determinación del área transversal se establece el cumplimiento del criterio de deformación para ambos materiales.

$$d = 0,5h - 0,5\sqrt{h^4 - 0,00047121h} \quad (7.4a)$$

$$d = 0,5h - 0,5\sqrt{h^4 - 0,000115385h} \quad (7.4b)$$

Para adoptar medidas de h y d se tomaron como guías las curvas obtenidas en la gráfica 7.7. La tabla 7.2 plasma estos valores propuestos, y el volumen de la cruceta al adoptar dichas medidas, totalizando cinco modelos bajo el criterio de deformación. No se pudieron establecer grosores de la cruceta fabricada con compuesto reforzado con CSM, para valores de h menores a $10,55\text{cm}$ pues la ecuación 7.3a posee un dominio en donde h no se define para valores de grosor (d) entre $-0,1055\text{ m}$ y $0,1055\text{ m}$.

El volumen de los cuerpos es directamente proporcional al costo de materiales, por lo que a priori, será ventajoso adoptar el menor volumen, en ambos casos se observó disminución en

	CSM		UD		
h[mm]	110	115	90	100	110
d[mm]	21	16	7,7	5,2	3,8
V[m ³]	0,005544	0,004416	0,001663	0,001248	0,001003
Asig.	CSM-11	CSM-11.5	UD-9	UD-10	UD-11

Tabla 7.2: Geometrías propuestas

el volumen debido al aumento del parámetro h , los modelos tridimensionales se observan en la figura A.5.

7.3. Comprobación por el método de los elementos finitos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelado numérico de las crucetas propuestas en el apartado anterior (tabla 7.2), de manera tridimensional bajo flexión (bi-apoyadas) utilizando el programa comercial ANSYS 18.2 en su versión académica (Student), esta licencia limita el uso de nudos para análisis estructurales a 32000. Los resultados obtenidos son aproximaciones matemáticas al sistema real [12], pero suficientes para comparar y comprobar la confiabilidad de los cálculos manuales utilizados para determinar las geometrías. El programa utiliza el método de los elementos finitos para la solución física del problema, corre convencionalmente con sistemas operativos de arquitectura de 64 bits, utilizando el poder de procesamiento de la CPU, se utilizó una de 4 núcleos a 3.2 GHz. Se siguieron los siguientes pasos:

- Declaración de las características del material
- Modelado tridimensional
- Mallado del modelo
- Aplicación de las condiciones de fronteras y cargas
- Obtención de los resultados deseados (deformación y esfuerzo)

Se repitieron estos pasos para cada prototipo propuesto en la tabla 7.2; de esta manera se pudo comparar las condiciones utilizadas para determinar las dimensiones de las crucetas con resultados de esfuerzo y deformación obtenidos por este método (MEF), análogamente a una comprobación matemática.

Unidades	Sistema métrico
Densidad	$g \cdot cm^{-3}$
Longitud	cm
Fuerza	N
Esfuerzo	MPa
deformación	mm
deformación unit.	1
Modulo de young	MPa
Radio de poisson	1

Tabla 7.3: Unidades utilizadas del sistema métrico

Primeramente se establecieron las unidades físicas a manipular siendo estas del sistema métrico, como se observa en la tabla 7.3.

Con los datos obtenidos en los ensayos de tracción (tabla 7.1), utilizando los valores promedios se completaron los campos requeridos para establecer el tipo de material en análisis. ANSYS posee una librería con datos de materiales conocidos, entre ellos algunos compuestos poliméricos reforzados. Como algunos campos exigían datos no obtenidos, estos fueron completados con valores de la librería, específicamente el módulo de Poisson y la densidad, los cuales no interfieren de sobremanera con los criterios de flexión adoptados. Finalmente se crearon los archivos de datos ingenieriles: *Epoxy E-glass CSM LM* y *Epoxy E-glass UD LM* haciendo referencia a la matriz, el refuerzo y el método de fabricación. Los datos obtenidos en el ensayo de tracción al material compuesto reforzado a 90° sirvieron para complementar los datos del material ortótropo *Epoxy E-glass UD LM*.

Se utilizó el complemento DesingModeler para la creación de los modelos geométricos (véase figura A.5), creándose las cinco crucetas propuestas en la tabla 7.2, a estas se añadieron superficies para las aplicaciones de las fuerzas y los puntos de fijación, sin afectar el modelo original (figura A.5).

Se ubicó sobre el plano YZ el area transversal y sobre el eje X el largor de la cruceta, por esa razón en la declaración del material *Epoxy E-glass UD LM* se introdujeron las propiedades a 0° sobre el eje X , mientras que las propiedades a 90° fueron introducidas sobre los ejes transversales Y y Z . Luego de asignar material a cada modelo geométrico se procedió a realizar el mallado del cuerpo dividiéndolo en nudos y elementos (figura 7.8). Se escogió el método tetraédrico recomendado por el programa, el cual divide el cuerpo en tetraedros, generando nudos en los vértices y en los puntos medios de las aristas (10 nudos por elemento). Con el comando *Size Funtion* se limitó entre 24 a 25 mm el tamaño promedio de los elementos, con lo cual no se sobrepasaron las limitaciones de la licencia.

Con el comando *Construction Geometry - Path* se creó un segmento de 50 puntos de muestreo, sobre la cara superior de la cruceta a 100 mm de cada extremo con el fin de obtener en cada punto la deformación (flecha a carga nominal) teniendo como referencia el plano de las fuerzas.

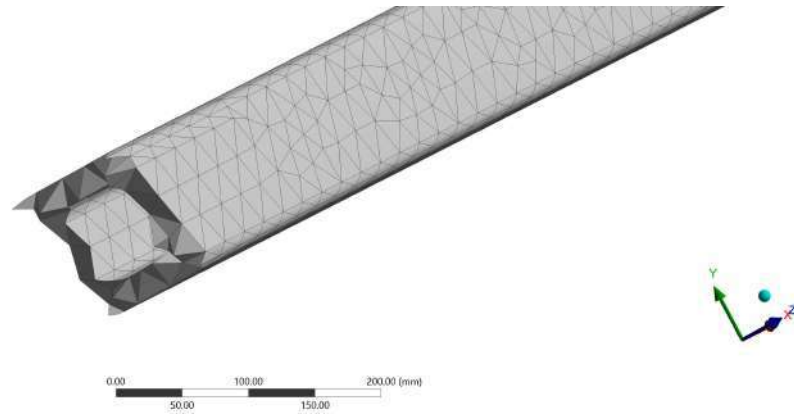


Figura 7.8: Mallado por el método tetraédrico, corte transversal

Se dividió el análisis en dos pasos (steps), aplicándose la carga nominal en el primer paso donde $t = 1s$ y la carga de rotura en el siguiente paso ($t = 2s$), estas se aplicaron a 100 mm de los extremos como se indica en la figura 7.4, paralelos al eje Y con sentido positivo. El soporte fijo se ubicó en el centro de la superficie contraria a la aplicación de las fuerzas, sobre una área rectangular de 150 mm de largor emulando el calce utilizado en una máquina de flexión real.

En cuanto a la deformación direccional a lo largo del eje Y, los resultados obtenidos muestran dicha deformación con referencia al punto de fijación (véase apéndice A.3.3). Según las EE.TT. [14], se debe medir la flecha, como la deformación a partir del plano de aplicación de las cargas. Para ello, se solicitó al programa, los resultados de la deformación a través de la línea de muestreo creada, la cual une los puntos de aplicación de las fuerzas, estos resultados muestran la flecha de la cruceta al aplicarse la carga nominal (Véase Apéndice A.3.2). Esperándose una flecha de 60 mm; estos resultados muestran para cada cruceta estudiada valores menores a 60 mm pero aproximadas, por lo que se puede aceptar sin ajustes las dimensiones tomadas en los cálculos de deformación de la sección anterior.

7.4. Criterios de falla

En los ensayos a tracción, se observa que la deformación unitaria máxima fue de 5% en el material reforzado con fibras longitudinales, y menores en los otros materiales. Se

Cruceta	Flecha (mm) a carga nominal	σ_x (MPa) a carga de ruptura	σ_y (Mpa) a carga de ruptura	σ_z (MPa) a carga de ruptura
CSM-11	55,056	42,32/-68,478	0,101/-0,064	-0,887
CSM-115	54,308	42,902/-80,388	0,0142/-0,016	-1,1296
UD-9	54,469	120/-202,96	0,43/-0,27	-5,45
UD-10	51,962	134,9/-218,5	3,84/-1,014	-9,77
UD-11	46,242	265,7/-288,7	0,86/-4,7	-23,09

Tabla 7.4: Principales resultados del análisis por FEM

consideró al conjunto como materiales frágiles [6]. Se supone que la falla de un material frágil se presenta cuando este sufre separación de sus partes (fractura). Una teoría válida es la *Teoría del máximo esfuerzo normal*³, la misma enuncia: *La falla se producirá cuando el esfuerzo normal máximo en la pieza sea igual o mayor al esfuerzo normal máximo de una probeta sometida a un ensayo de tensión en el momento en el que se produce la fractura.*

Se analizaron los esfuerzos normales ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), se obtuvieron valores tanto a compresión como a tracción (véase apéndices A.3.4, A.3.5 y A.3.6), por analogía al material ya dispuesto en la librería de ANSYS el cual consiste en el compuesto reforzado con fibra de vidrio unidireccional se consideró el esfuerzo máximo a compresión del material UD caracterizado, como el 60 % del esfuerzo a tensión para las fibras dispuestas de manera longitudinal (274,56 MPa), y 140 % para el sentido transversal (17,06 MPa). Se consideró para el material reforzado con fibras cortadas CSM el esfuerzo máximo a compresión igual a 75,33 MPa [8].

En el análisis de los esfuerzo transversales σ_y y σ_z se recurrió al principio de Saint-Venant, este permite analizar diferentes formas de aplicación de carga de una misma manera, sosteniendo que en una situación de carga concentrada, no se considere la distribución de las tensiones en la inmediata vecindad del punto de aplicación de la fuerza [6]. Cuando un elemento estructural contiene una discontinuidad como un agujero o un cambio repentino en su sección transversal, también pueden ocurrir grandes esfuerzos localizados, razón por la cual en el modelo geométrico se prescindieron de las pequeñas perforaciones de la cruceta.

En el caso de una viga, los esfuerzos y deformaciones se vuelven uniformes a una distancia igual al canto de la misma y a ambos lados desde el punto de aplicación de la carga. En consecuencia para un análisis de estos esfuerzos principalmente los perpendiculares a la barra, se creó una línea de muestro (path) con 60 puntos de muestra⁴ centrada sobre la

³Enunciada por W. Rankine

⁴La cantidad de puntos de muestra es definido de manera automática por el programa, teniendo en

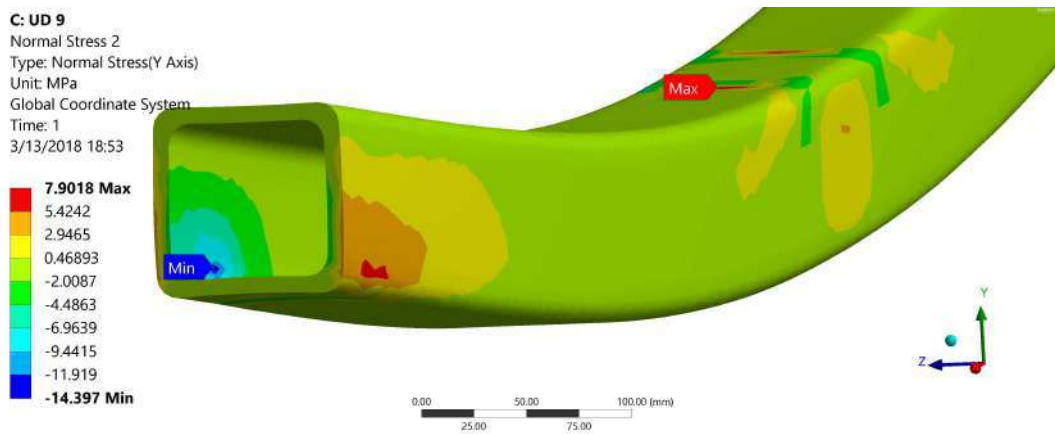


Figura 7.9: Distribución de esfuerzos normales σ_y

superficie de aplicación de dichas cargas, obteniéndose resultados de esfuerzo σ_y , σ_z a lo largo de la barra (véase apéndices A.3.7 y A.3.8), atendiendo al principio de Saint-Venant se obtuvieron los valores de los esfuerzos promedios, los cuales a simple inspección no sobrepasaron los límites de rotura.

En la tabla 7.4 se pueden apreciar los principales resultados del análisis de elementos finitos. Las flechas obtenidas se pueden examinar de manera detallada en el apéndice A.3.2. Los esfuerzos normales fueron analizados de manera minuciosa, filtrando las magnitudes a través del principio de Saint-Venant, por lo que se tomaron las medidas dispuestas a una distancia igual al lado del cuadrado que representa el área transversal de la cruceta, estos son los valores plasmados en la tabla 7.4. En los resultados de σ_y sobre la línea de muestreo inferior estas muestran una distorsión cercana a los de aplicación de las fuerzas (véase apéndice A.3.7). Los esfuerzos normales σ_z se presentan totalmente a compresión, además se observa otro punto de aumento de esfuerzo en la zona central de la cruceta (véase apéndice A.3.8). También se miden concentraciones para esfuerzos normales σ_x cercanos a la superficie de fijación, en este paso las crucetas modeladas como UD-11 y CSM-115 acarrean medidas de esfuerzos a compresión que sobrepasan los valores admisibles adoptados, por lo que se asume la falla a compresión de estas crucetas, por otro lado los esfuerzos a tensión son satisfactorios para todas las crucetas (véase apéndice A.3.4).

cuenta la longitud de la línea

Capítulo 8

Resistencia al trillamiento eléctrico y erosión bajo condiciones ambientales severas

Es bien sabido que los materiales utilizados en los sistemas de distribución eléctrica deben ser resistentes a las acciones de la radiación solar, humedad, polución y agentes biológicos, normalmente cuando estos factores llegan a puntos críticos se produce la falla en el elemento del sistema, el cual en la mayoría de los casos se trata de trillamiento eléctrico, esta descarga disruptiva produce un arco centelleante que además de estropear el material puede ocasionar pérdidas por falta de servicio de la red.

Para validar la resistencia al trillamiento eléctrico de materiales aislantes existen varios tipos de ensayos que difieren en sus métodos de ejecución, por ejemplo el ensayo establecido por la norma IEC-60112 consiste en hacer gotear entre dos electrodos apoyados sobre la muestra una solución contaminante. La norma ASTM D 2132-98 establece un ensayo en donde la muestra es sometida a una contaminación superficial bajo altos niveles de humedad que se generan dentro de una cámara donde las muestras se conectan directamente a los electrodos. En este caso se usó la norma brasileña **ABNT-NBR-10296: Material isolante eléctrico - Avaliação da resistência ao trilhamento e erosão sob condições ambientais severas**, pues las especificaciones técnicas de crucetas poliméricas [14] indica la misma como guía. Este método también es conocido como ensayo en plano inclinado.

La norma fue elaborada por la Comisión de Estudios de Aislantes para Líneas Aéreas y Subestaciones. El ensayo comprende actividades desde la elaboración de las muestras hasta la obtención de resultados. Como no se dispone de laboratorios de esta índole en

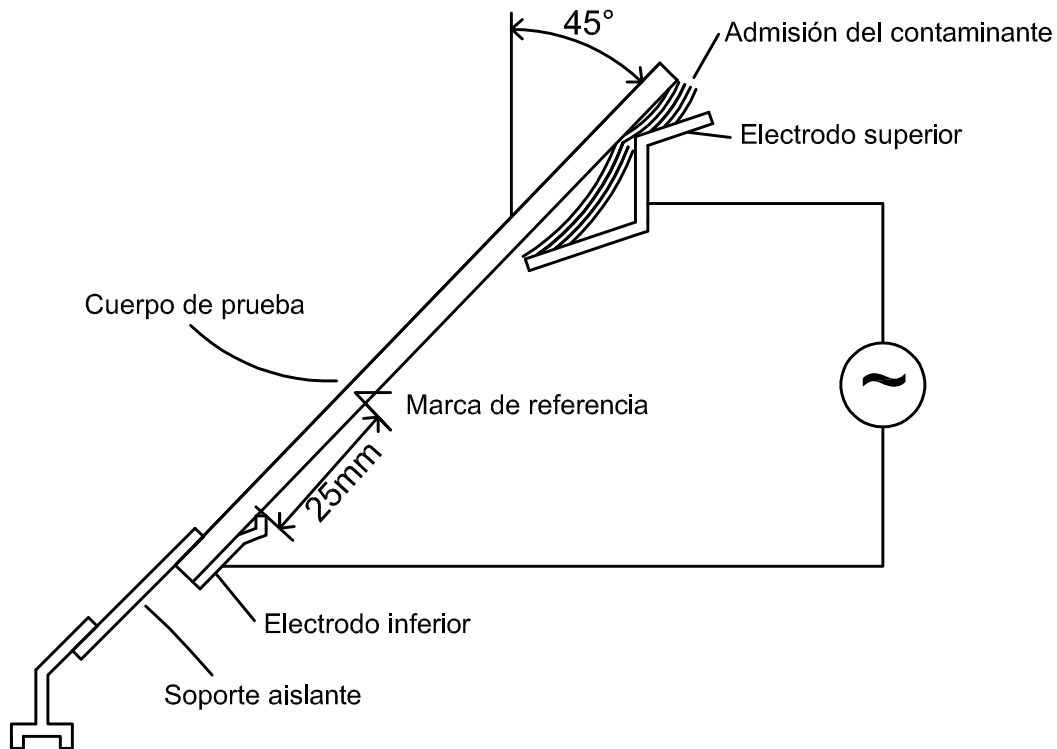


Figura 8.1: Esquema del conjunto de ensayo de resistencia al trillamiento

el país, los ensayos fueron realizados en los laboratorios especializados en alta tensión LACTEC ubicado en la ciudad de Curitiba, Brasil.

8.1. Procedimientos y resultados

Se elaboró un total de veinte muestras (véase apéndice B.2), diez de cada material estudiado, considerándolos distintos por las disposiciones de los refuerzos en la matriz. Nuevamente se utilizó el método de la laminación manual para la fabricación de los especímenes con dimensiones de $120\text{mm} \times 50\text{mm}$, según la norma NBR-10296 el grosor recomendado es de 6mm , se pueden utilizar otras medidas de grosor mientras sea indicado en el reporte final, como el caso dado, donde el método de fabricación depende de las cantidades de capas y no se puede dar exactitud al grosor.

Se utilizaron las siguientes herramientas para la fabricación de las muestras: Un calibre

digital, una balanza con precisión de 1g y un rodillo metálico. Se obtuvieron las fracciones volumétricas del refuerzo; pesando la fibra de vidrio antes de su utilización y pensando el material compuesto una vez concluido (véase apéndice B.1), suponiendo una densidad volumétrica para la fibra de vidrio y la resina de $2,5g/cm^3$ y $1,1g/cm^3$ respectivamente[18]. Resultó una fracción de 22% para el compuesto con refuerzos de fibra cortada (man-ta), mientras la fracción correspondiente al compuesto con refuerzo unidireccional fue de 39,2%.

Se llevaron a ensayo 5 muestras de cada material, antes de proceder los cuerpos fueron lijados levemente con agua destilada y lijas de carburo de silicio granulado 400 (gramos/cm²), limpiados con alcohol isopropílico.

Se tuvo como base el método 2, criterio A, tensión de 1,5 Kv aplicada de manera gradual y por lapsos establecidos de tiempo, mientras la solución salina es inyectada emulado la contaminación del material, para ello la composición utilizada fue de $0,01 \pm 0,002\%$ en masa de NH₄Cl (cloruro de amonio), $0,02 \pm 0,002\%$ en masa de iso-octil fenoxipolietoxietanol agente humidificante no ionico. En la figura 8.1 se muestra el esquema de la ejecución del ensayo, la solución es proveída indirectamente desde el electrodo superior a razón de 0,075 mL/min. La temperatura del laboratorio se mantuvo en $23 + 1$ °C.

Los resultados de las aplicaciones de los niveles de tensión eléctrica en los cuerpos de prueba de las muestras 1 (CSM) y muestra 2 (UD), durante o prueba de selección de la resistencia al trillado eléctrico están mostradas en las tablas 8.1 y 8.2.

Estado Final: S-Soportó P-Actuó protección C-Combustionó T-Trilló										
Tensión kV	Cuerpos de prueba									
	1		2		3		4		5	
	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado
1,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
1,50	—	—	—	—	01 min.	TP	—	—	—	—
1,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Obs.:	Método 2, resistencia de la solución contaminante de $392 \Omega \cdot cm$									

Tabla 8.1: Ensayo a muestra 1

Estado Final: S-Soportó P-Actuó protección C-Combustionó T-Trilló										
Tensión kV	Cuerpos de prueba									
	1		2		3		4		5	
	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado	tiempo	estado
1,25	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S	60 min.	S
1,50	—	—	—	—	15 min.	TP	—	—	—	—
1,75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Obs.:	Método 2, resistencia de la solución contaminante de $392 \Omega \cdot cm$									

Tabla 8.2: Ensayo a muestra 2

Los materiales de las muestras 1 y 2 no soportaron los niveles de tensión solicitados en los métodos aplicados y conforme a los ítems 8.1.3.2 y 8.3.2 de la norma ABNT NBR 10296 no pueden ser clasificados.

Parte IV

Capítulo 9

Resultados y Discusión

No se han encontrado estudios similares que hayan analizado los mismos materiales para su uso como crucetas, sin embargo es común las caracterizaciones de los materiales compuestos con amplias variedades de refuerzos o arreglos del mismo. En esta caracterización realizada a tracción bajo los criterios de la norma ASTM-D3039, se aprecia una diferencia considerable entre los materiales analizados, el compuesto reforzado con el arreglo unidireccional, axialmente presentó resistencia superior que el compuesto reforzado con la manta de fibras cortadas (véase tabla 7.1). Desde otra perspectiva esta ventaja solo es de carácter axial, las propiedades en el sentido transversal de las fibras del compuesto unidireccional fueron menores pero nimias influencias en la simulación del ensayo a flexión. En cuanto al método de fabricación otros autores mencionan mejores resultados de resistencia a tracción y densidad superficial utilizando métodos como inyección en molde y laminación en vacío [9] [22] [15].

Para llevarse a cabo la simulación computacional de las crucetas a flexión se tuvieron en cuenta los valores medios obtenidos en los ensayos de tracción, posteriormente se llevaron a cabo cálculos de flexión de vigas para proponer geometrías de las crucetas a modelar por FEM. En este análisis, con el aumento del lado (h) del cuadrado que representa el área transversal de la cruceta se puede disminuir el espesor (d) del mismo, sin embargo los esfuerzos a compresión poseen otro comportamiento que no fue analizado profundamente, este aumenta conforme se aumenta h y disminuye d (véase figura 7.6).

En el marco de la simulación se observó mayor eficiencia de las cruceta con refuerzo unidireccional frente a las reforzadas con manta cortada, pues logran igual flecha a menor volumen. Las crucetas modeladas se asignaron según el material¹ y canto de la cruceta

¹UD: Fibra de vidrio unidireccional. CSM: Manta de fibras de vidrio cortadas (chopped strand mat)

en centímetros, de esta manera las crucetas UD-9, UD-10 y UD-11 en ese orden presentaron disminución de volumen, sin embargo los esfuerzos transversales y longitudinales aumentaron, CSM-11 y CSM-115 también disminuyeron en volumen sin presentar grandes cambios en medidas de esfuerzos. Los valores admisibles de esfuerzo a compresión en las crucetas UD-11 y CSM-115 fueron sobrepasados por lo que se supone falla de los mismos a cargas de rotura.

El ensayo de resistencia al trillamiento eléctrico no es concluyente pues no se cumple con el criterio A (resistencia a 1,5Kv durante 60 minutos) de la norma NBR-10296, por fallencias de 0,25kV en los 5 ensayos. Específicamente la tercera muestra de ambos materiales soportan por lapsos cortos de tiempo la tensión de 1,5kV, el compuesto unidireccional soportó por mayor tiempo está tensión. Comparando estos resultados con los obtenidos por [16], en donde se analiza un compuesto con matriz de polipropileno reforzado con fibra de coco concentrado a 20 % y fabricado por inyección en molde, esta configuración aprobó el criterio B (resistencia a 5kV durante 60 minutos) de la citada norma, el cual es más riguroso con respecto al criterio adoptado.

Capítulo 10

Conclusiones

Se recurrieron a las especificaciones técnicas de crucetas poliméricas [14] como directrices para el contraste de los materiales analizados, específicamente a los apartados de flexión y trillamiento eléctrico, por esta razón de los materiales considerados ingenieriles se seleccionaron los compuestos (matriz de poliéster reforzados con fibra de vidrio). Se optó por la laminación manual como método de fabricación por su ventaja en cuanto baja necesidad de inversión.

Los valores de flecha de las crucetas a flexión en todos los casos fueron menores a 60 mm, así también los esfuerzos a tracción no superaron los límites de rotura cumpliendo con las necesidades de [14]. No obstante, los resultados de esfuerzo a compresión fueron superiores a los límites establecidos para las crucetas CSM-115 y UD-11, por lo que se descartan estas opciones para su utilización como crucetas.

Se logró caracterizar eléctricamente ambos materiales compuestos, no cumpliendo con el criterio establecido. Por esa razón no se realizó un estudio de factibilidad económica de las crucetas propuestas, a pesar de ello se efectuó un planteamiento financiero de la investigación (sección 5.10) como propuesta a la continuación del mismo.

Capítulo 11

Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos y los trabajos similares consultados se plantean las siguientes recomendaciones:

- Repetir los ensayos de trillamiento eléctrico, con diferente método de fabricación, por ejemplo la inyección en molde o pultrusión que mejoran la densidad superficial del material [9], estos modificarían la concentración del refuerzo por lo que debería de repetirse los ensayos de tracción y análisis numérico. La porosidad del material puede ser medida a través de ensayos gravimétricos de flotación.
- Repetir los ensayos de trillamiento, cambiando la matriz o añadiendo aditivos que mejoren la capacidad dieléctrica del material, por ejemplo agregando polvo de cuarzo. El laminado manual mantendría la concentración del refuerzo, por lo que no será necesario repetir los ensayos mecánicos.
- Luego de resolver los problemas eléctricos, se recomienda construir las crucetas y realizar todos los ensayos especificados en [14].

Apéndice A

Estudios mecánicos

A.1. Fabricación de probetas

En las figuras A.1 y A.2 se aprecian los resultados del pesaje de los compuestos fabricados, y en la tabla A.1 la obtención de las fracciones volumétricas. Los cortes finales y los promedios de dimensiones de las muestras se observan en la figura A.3 y en las tablas A.2, A.3 y A.4 respectivamente.



(a) Peso de la tela unidireccional



(b) Peso del compuesto

Figura A.1: Pesajes en la fabricación del compuesto UD

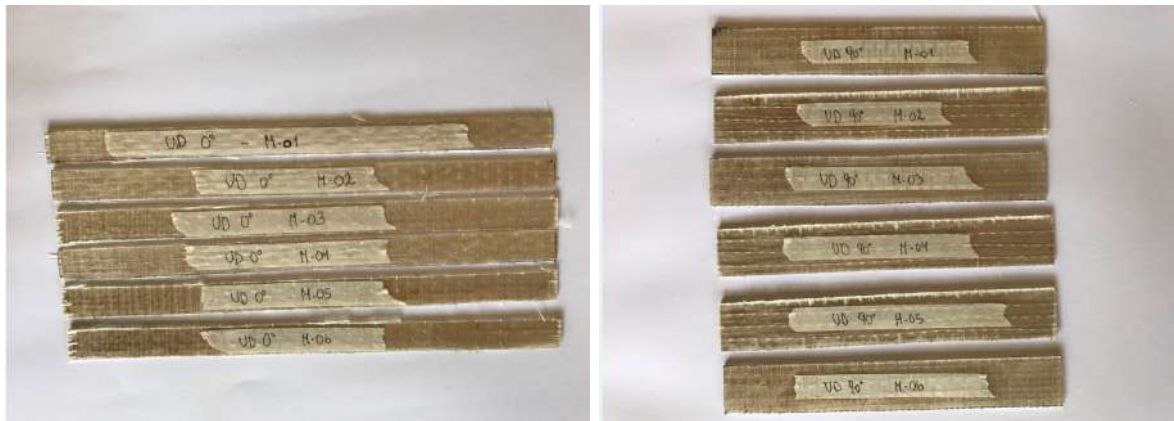


(a) Peso la manta cortada CSM



(b) Peso del compuesto

Figura A.2: Pesajes en la fabricación del compuesto CSM



(a) Muestras UD 0°

(b) Muestras UD 90°



(c) Muestras CSM

Figura A.3: Muestras para ensayos mecánicos

Compuesto	Peso FV (g)	Peso terminado (g)	Vol. FV (cm^3)	Vol. Resina (cm^3)	Porcentaje %
UD	37	62	14,8	22,72	39,4
CSM	124	285	49,6	146,36	25,3

Tabla A.1: Obtención del porcentaje volumétrico considerando $2,5 g/cm^3$ la densidad de la FV y $1,1 g/cm^3$ densidad de la resina epoxi

Dimensión	Iteraciones	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06
Ancho	1	25,050	25,110	25,180	24,930	24,590	25,220
	2	24,700	24,970	25,420	24,830	24,690	25,170
	3	25,620	24,960	25,750	25,040	24,570	25,000
	4	24,690	25,140	25,560	24,950	24,120	25,190
	5	24,610	25,170	25,120	25,120	23,650	25,230
	6	25,550	25,200	25,060	25,050	23,640	25,270
	Promedio		25,037	25,092	25,348	24,987	24,210
Desviación Tip.		0,452	0,103	0,274	0,104	0,480	0,095
Grosor	1	3,210	3,390	3,380	3,640	3,260	3,100
	2	3,240	3,540	3,400	3,750	3,290	3,270
	3	3,280	3,440	3,400	3,540	3,260	3,220
	4	3,260	3,500	3,340	3,600	3,020	3,370
	5	3,070	3,280	3,210	3,430	3,240	3,420
	6	2,970	3,560	3,050	3,470	3,280	3,370
	Promedio		3,172	3,452	3,297	3,572	3,225
Desviación Tip.		0,124	0,105	0,140	0,117	0,102	0,119
Prom. área trans.		79,408	86,608	83,565	89,244	78,077	82,884

Tabla A.2: Mediciones de las muestras de CSM

Dimensión	Iteraciones	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06
Ancho	1	14,890	15,200	15,560	14,040	15,450	15,470
	2	14,770	15,090	15,380	15,730	15,580	15,450
	3	14,860	14,970	15,580	15,830	15,600	15,440
	4	14,780	15,300	15,520	15,700	15,490	15,520
	5	14,710	15,100	15,560	15,650	15,570	15,760
	6	15,130	15,140	15,550	15,570	15,600	15,580
	Promedio		14,857	15,133	15,525	15,420	15,548
Desviación Tip.		0,149	0,111	0,074	0,682	0,063	0,121
Grosor	1	1,290	1,390	1,400	1,240	1,330	1,280
	2	1,350	1,260	1,430	1,290	1,300	1,270
	3	1,360	1,310	1,400	1,300	1,350	1,250
	4	1,380	1,330	1,400	1,220	1,310	1,340
	5	1,390	1,360	1,350	1,190	1,330	1,360
	6	1,380	1,320	1,390	1,250	1,290	1,310
	Promedio		1,358	1,328	1,395	1,248	1,318
Desviación Tip.		0,037	0,044	0,026	0,042	0,022	0,043
Prom. área trans.		20,180	20,102	21,657	19,249	20,498	20,224

Tabla A.3: Mediciones de las muestras con refuerzo UD 0°

Dimensión	Iteraciones	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06
Ancho	1	25,480	25,530	25,810	25,510	25,700	25,800
	2	25,430	25,260	25,890	25,380	25,640	25,710
	3	25,480	25,330	25,810	25,530	25,480	25,500
	4	25,400	25,390	25,620	25,710	25,560	25,460
	5	25,350	25,710	25,520	25,870	25,610	25,680
	6	25,160	25,750	25,420	25,790	25,500	25,840
	Promedio	25,383	25,495	25,678	25,632	25,582	25,665
	Desviación Tip.	0,120	0,203	0,187	0,188	0,084	0,155
Grosor	1	2,030	2,060	2,180	2,070	2,030	2,090
	2	1,980	2,100	2,080	2,010	2,100	2,110
	3	2,030	2,100	2,080	2,010	2,080	2,100
	4	2,010	2,120	2,060	2,020	2,170	2,140
	5	2,100	2,090	2,070	2,030	2,120	2,160
	6	2,010	2,120	2,030	2,080	2,080	2,100
	Promedio	2,027	2,098	2,083	2,037	2,097	2,117
	Desviación Tip.	0,040	0,022	0,051	0,031	0,047	0,027
Prom. área trans.	51,444	53,497	53,497	52,203	53,636	54,324	

Tabla A.4: Mediciones de las muestras con refuerzo UD 90°



(a) Muestras CSM

(b) Muestras UD 0°



(c) Muestras UD 90°

Figura A.4: Rupturas de las muestras en ensayo de tensión

A.2. Análisis de los datos

Las extensas planillas en formato xla, se redujeron a tres pequeñas tablas, las cuales presentan los resultados de cada ensayo y además un promedio obtenido al evaluar el conjunto de parámetros.

Probeta	Esfuerzo Max. (Mpa)	Elongación a la rupt. (mm)	Elasticidad (MPa)
M-01	115,016	8,15	2771,108
M-02	104,794	8,45	2607,536
M-03	104,291	6,627	2745,789
M-04	120,953	7,586	2914,419
M-05	115,203	6,607	2869,498
Promedios	108,673	7,309	2743,237167

Tabla A.5: Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo CSM)

Probeta	Esfuerzo Max. (Mpa)	Elongación a la rupt. (mm)	Elasticidad (MPa)
M-01	459,037	9,444	10640,265
M-02	456,16	9,101	10151,095
Promedios	457,5985	9,21825	10395,68

Tabla A.6: Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo UD 0°)

Probeta	Esfuerzo Max. (Mpa)	Elongación a la rupt. (mm)	Elasticidad (MPa)
M-01	11,295	1,755	1225,913
M-03	9,99	1,349	617,152
M-04	14,29	1,838	1517,959
M-05	14,907	1,52	1505,494
M-06	10,478	6,434	1060,167
Promedios	12,192	2,579	1185,337

Tabla A.7: Resultados obtenidos en ensayo de tracción (refuerzo UD 90°)

A.3. Resultados de ANSYS

A.3.1. Modelado geométrico

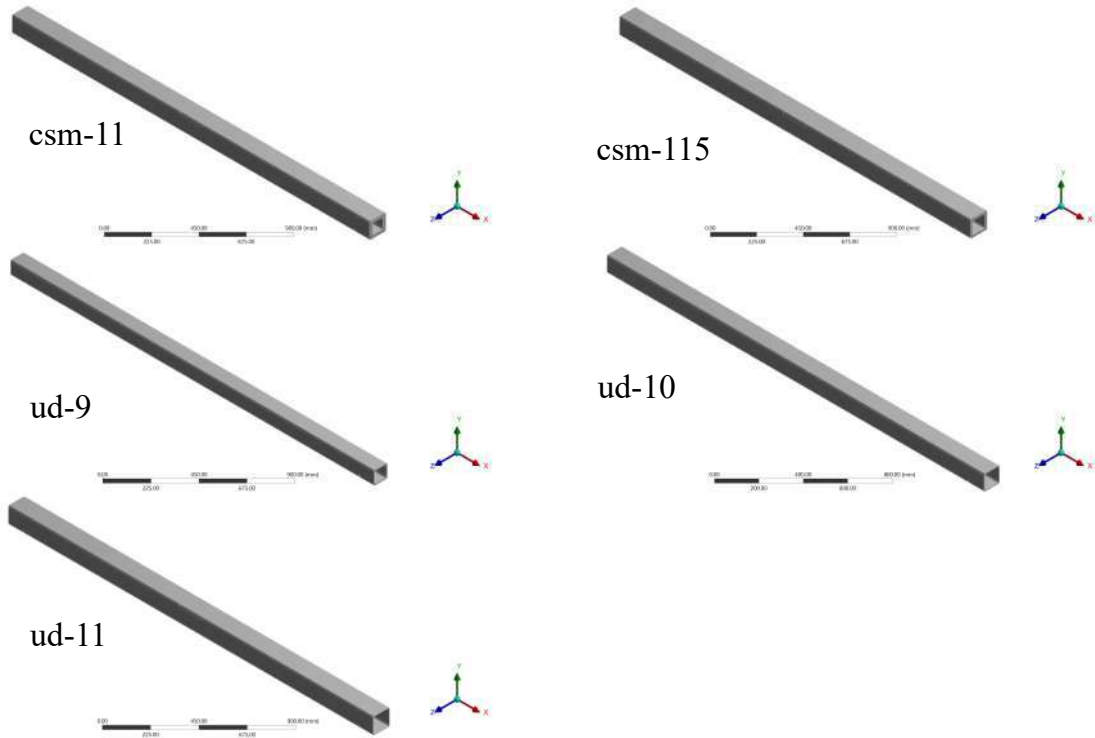


Figura A.5: Modelado geométrico de las crucetas

A.3.2. Deformación direccional sobre el eje y (path), a carga nominal

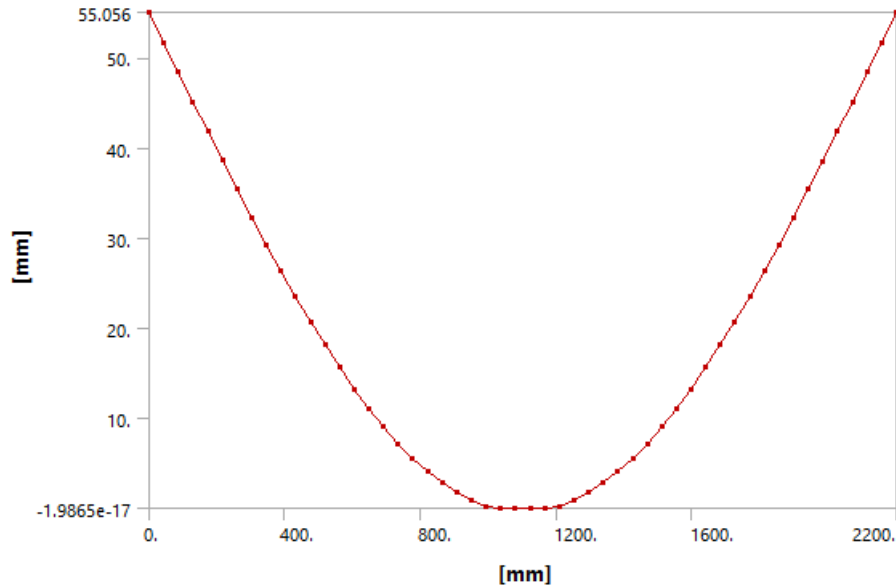


Figura A.6: Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, CSM-11

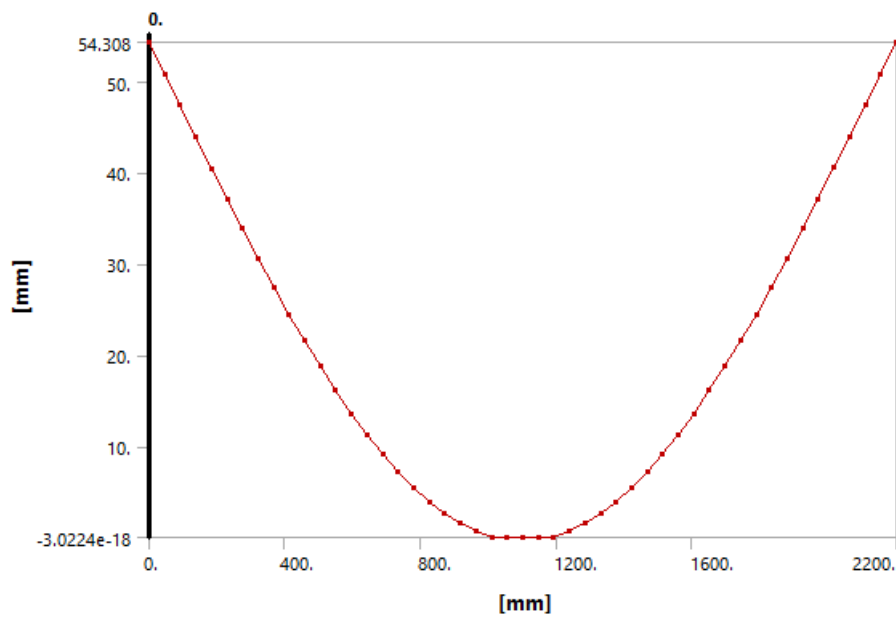


Figura A.7: Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, CSM-11.5

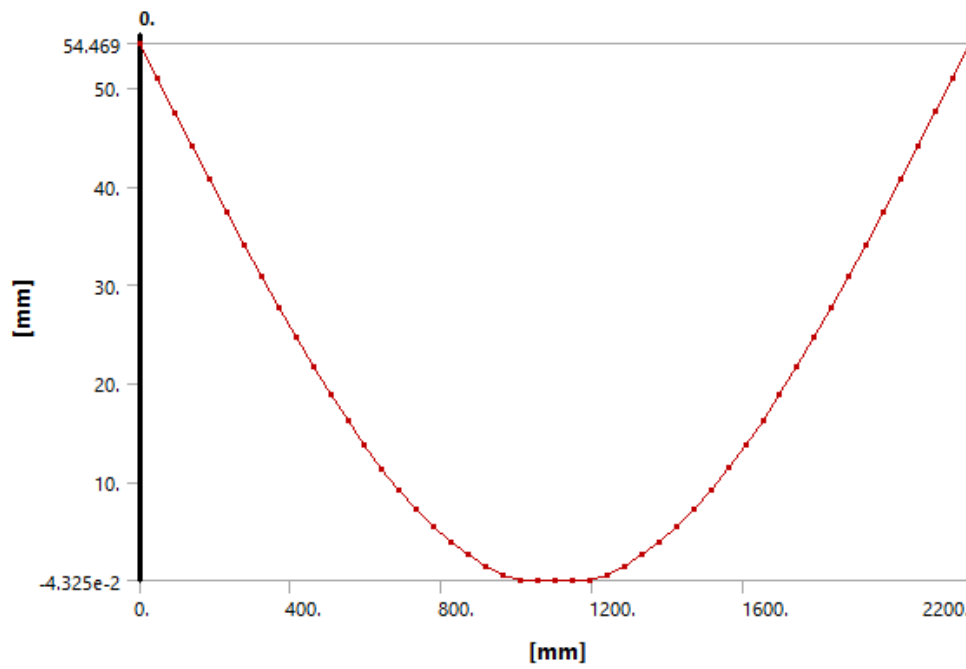


Figura A.8: Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-9

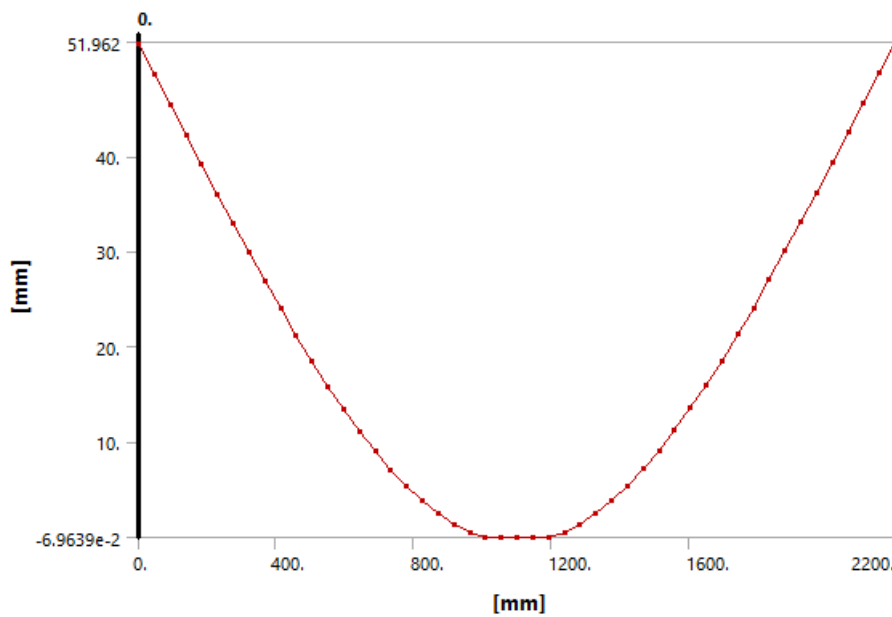


Figura A.9: Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-10

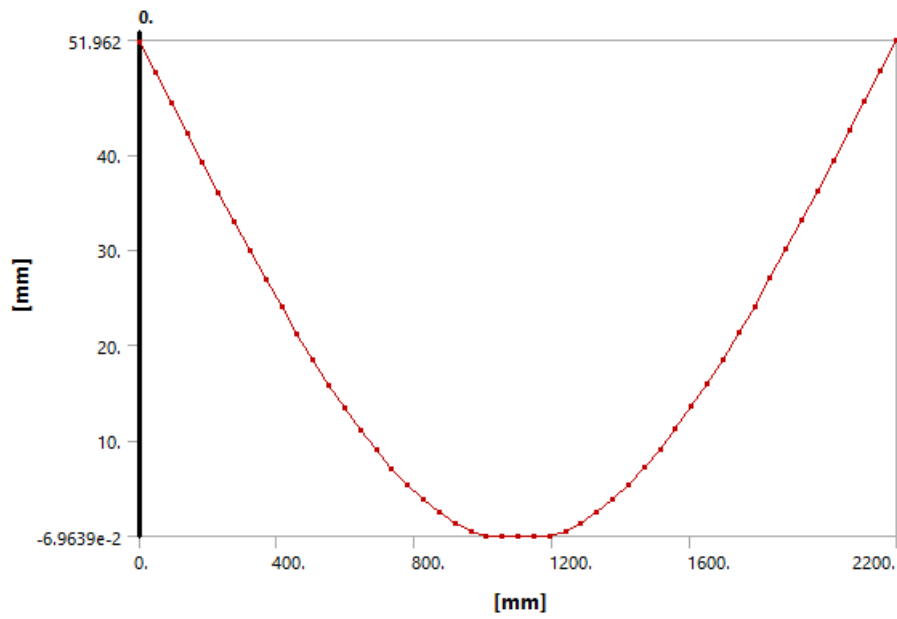


Figura A.10: Deformación direccional (δ_y) a carga nominal, UD-11

A.3.3. Deformación direccional (eje y) sobre toda la barra

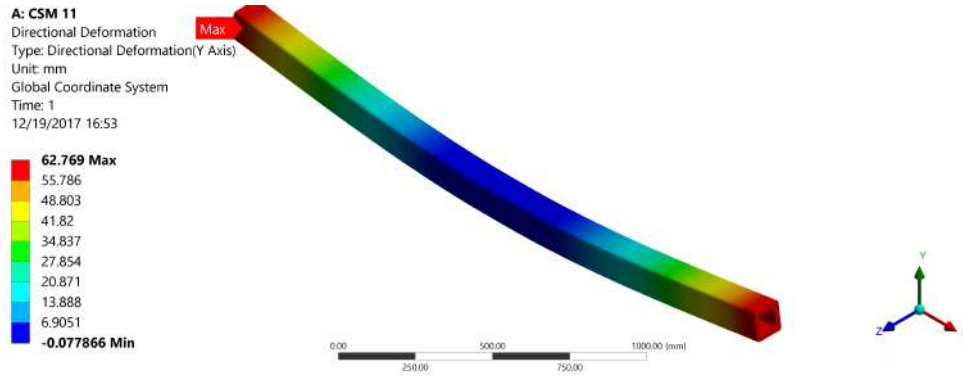


Figura A.11: Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, CSM-11

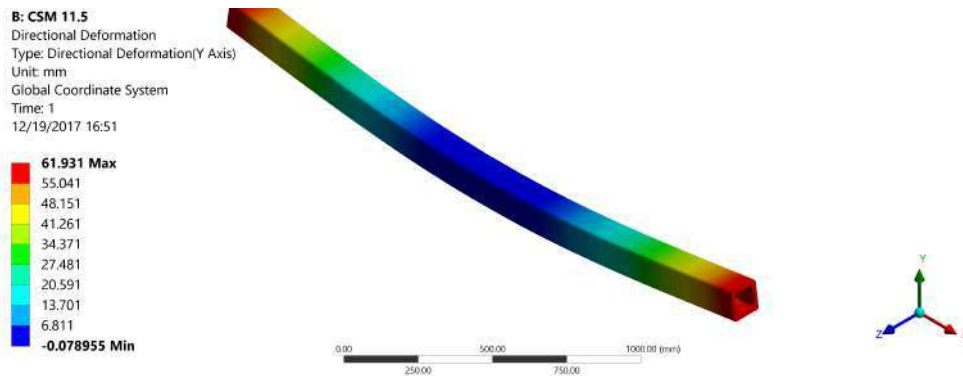


Figura A.12: Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, CSM-11.5

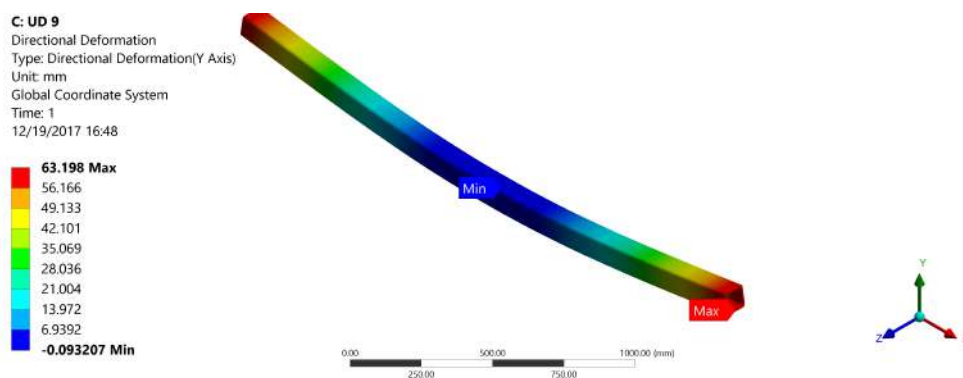


Figura A.13: Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-9

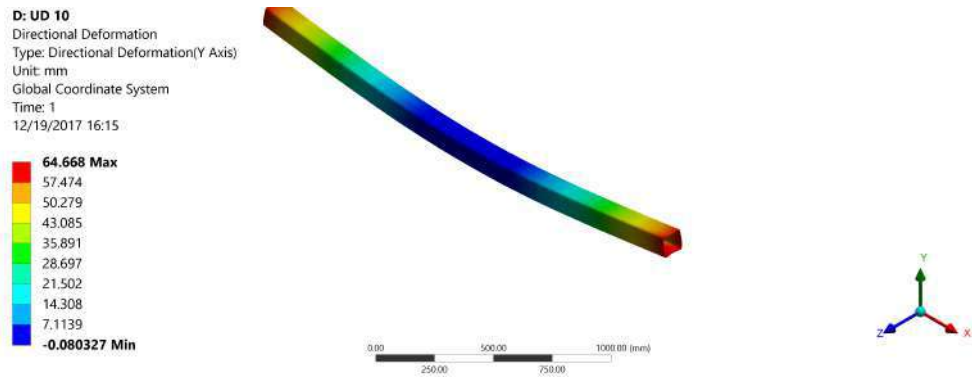


Figura A.14: Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-10

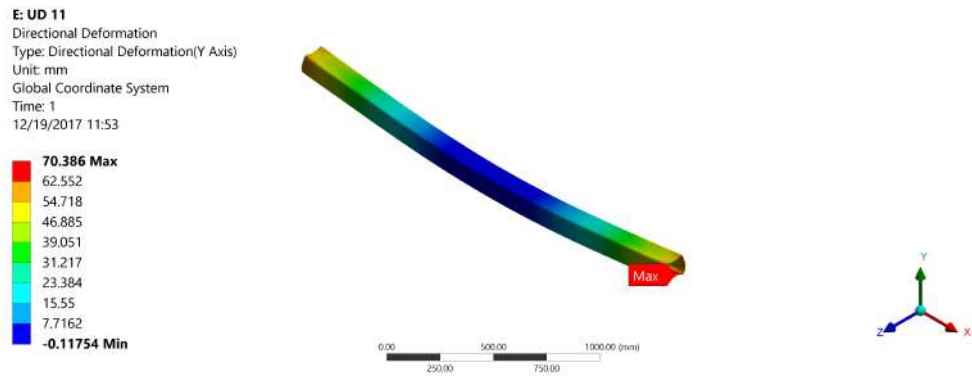


Figura A.15: Deformación direccional (δ_y) en todo el cuerpo a carga nominal, UD-11

A.3.4. Esfuerzos normales (σ_x) a carga de ruptura

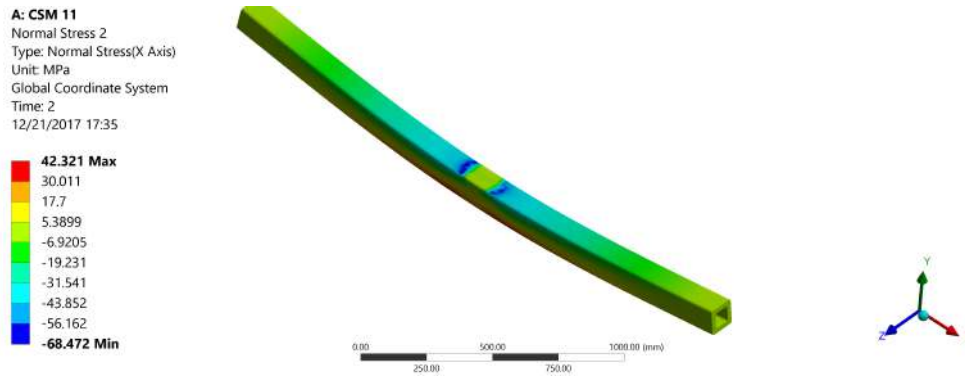


Figura A.16: Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), CSM-11

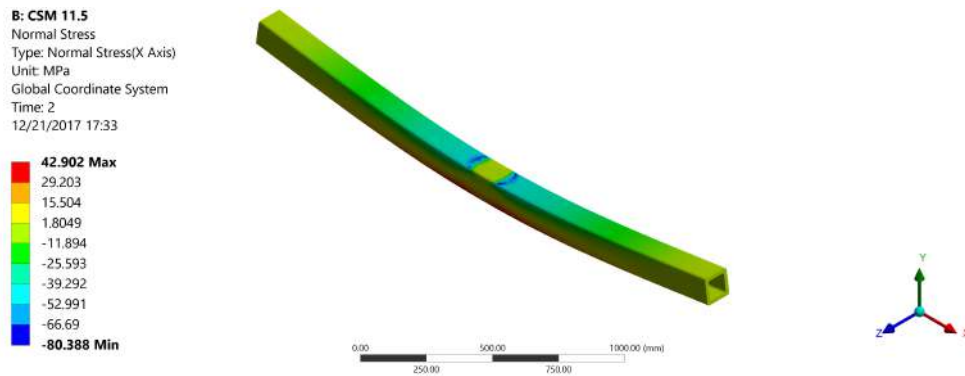


Figura A.17: Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), CSM-11.5

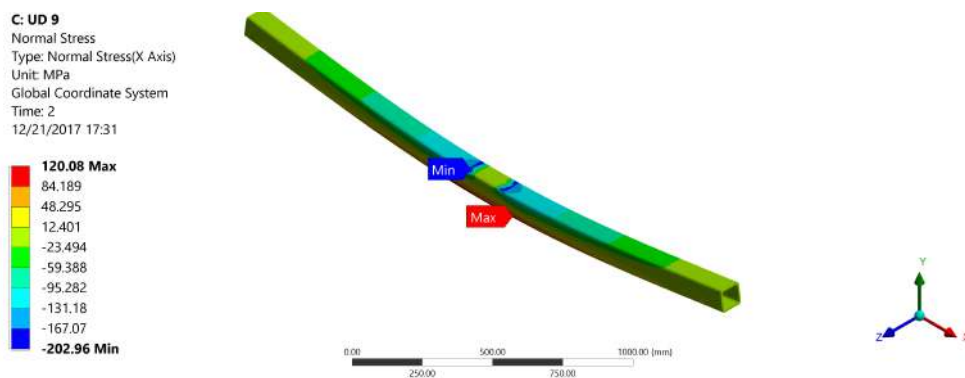


Figura A.18: Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-9

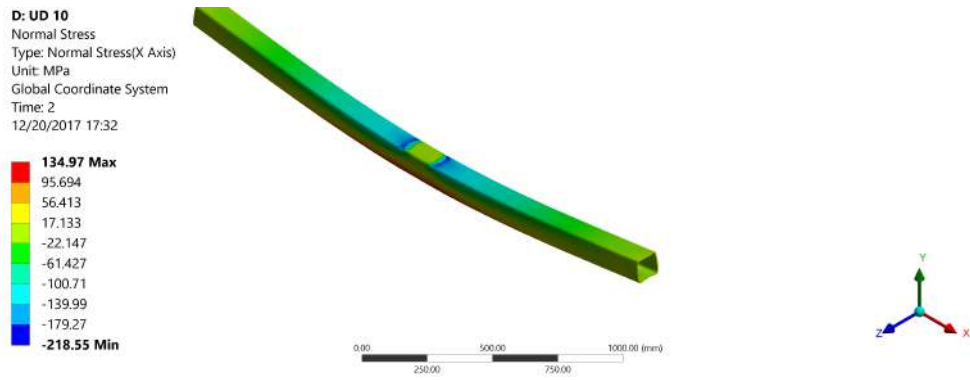


Figura A.19: Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-10

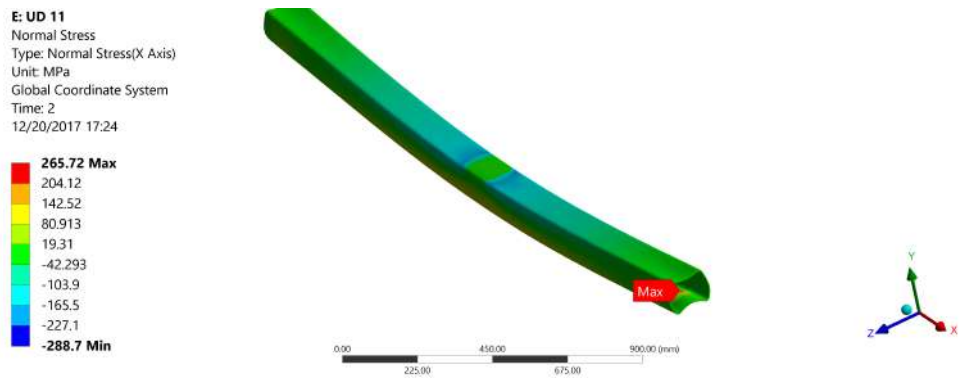


Figura A.20: Esfuerzos longitudinales a la cruceta (σ_x), UD-11

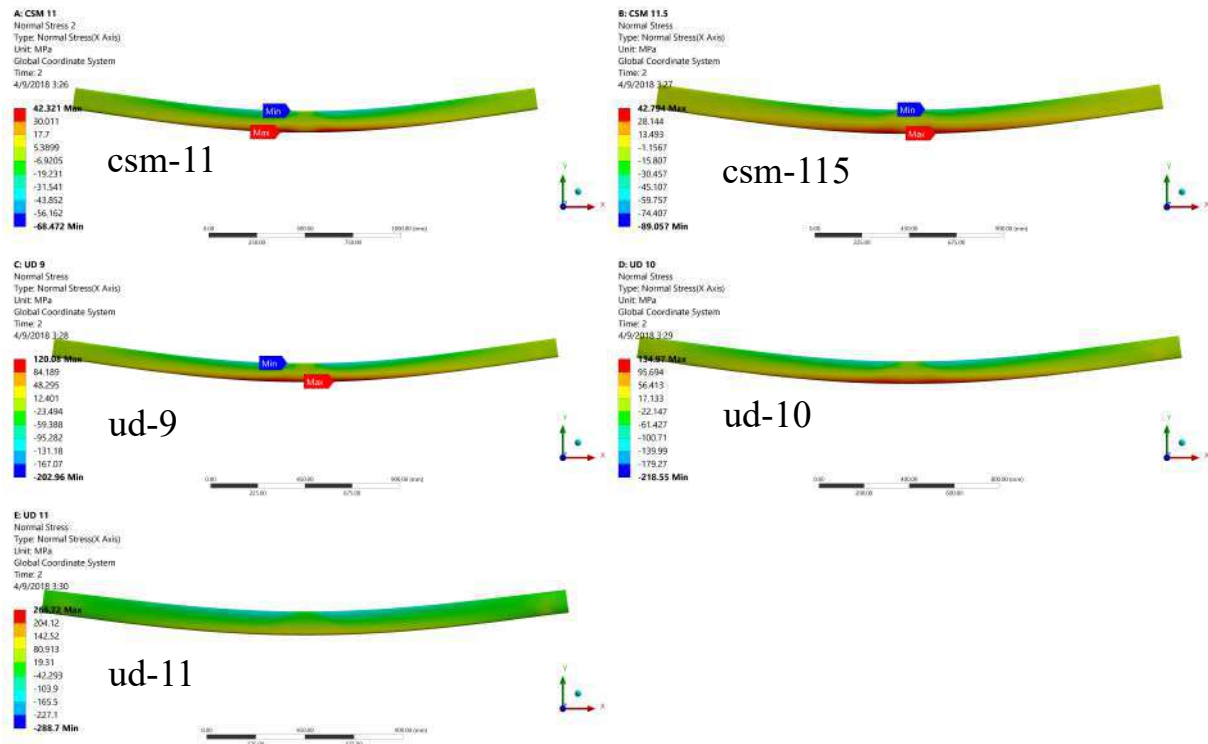


Figura A.21: Distribución de esfuerzos normales σ_x

A.3.5. Esfuerzos normales (σ_y) a carga de ruptura

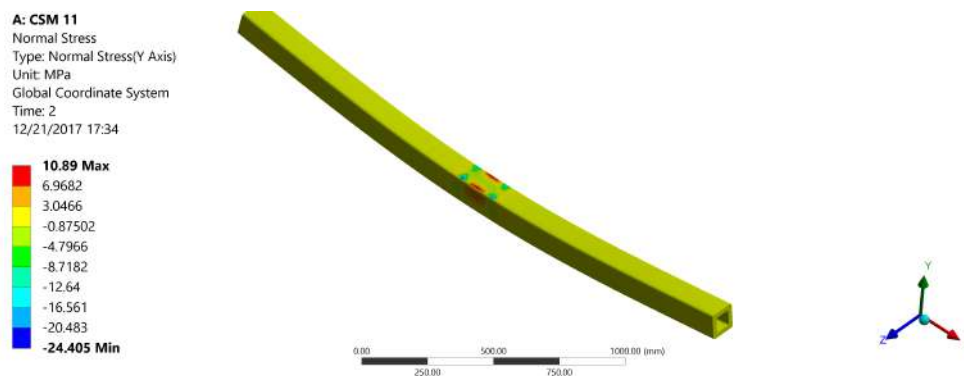


Figura A.22: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), CSM-11

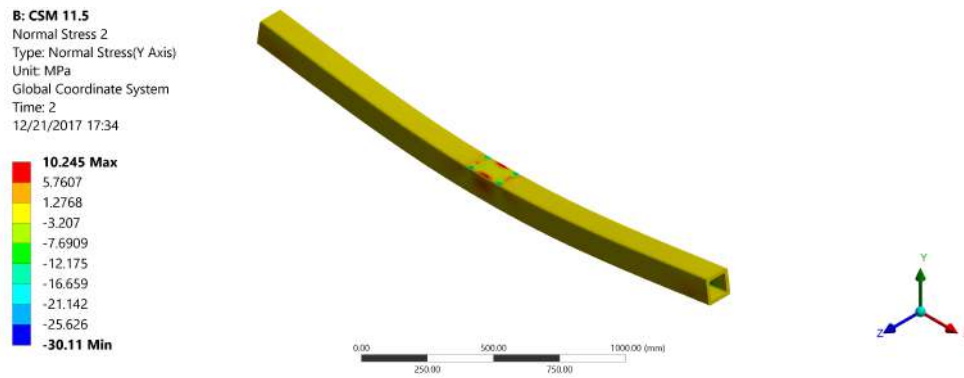


Figura A.23: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), CSM-11.5

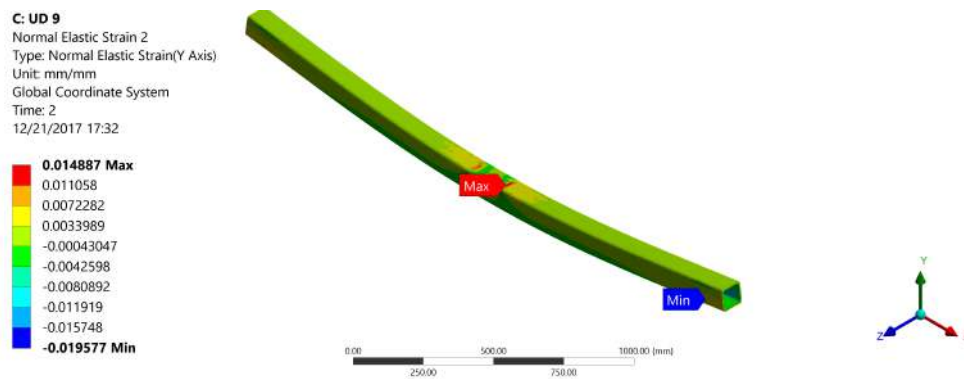


Figura A.24: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-9

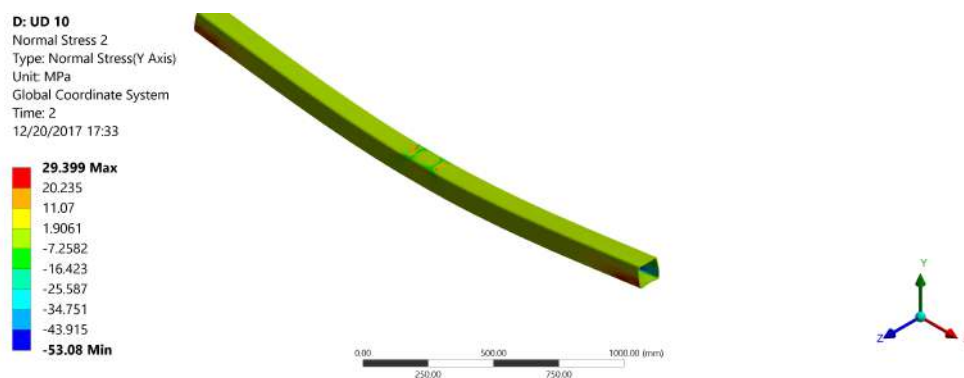


Figura A.25: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-10

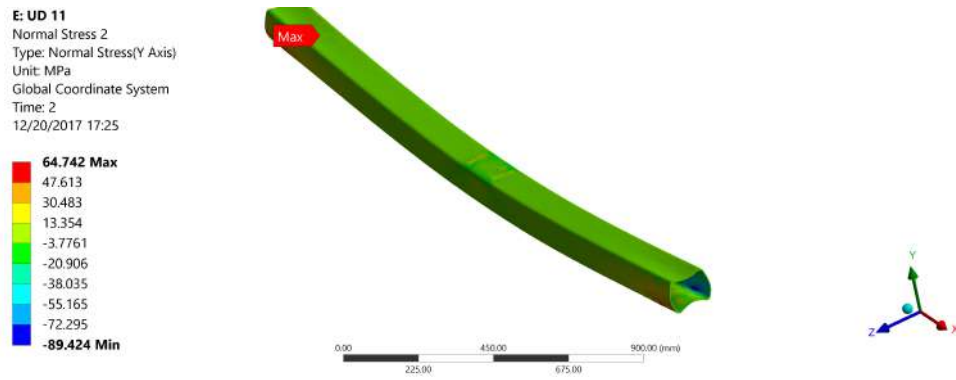


Figura A.26: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_y), UD-11

A.3.6. Esfuerzos normales (σ_z) a carga de ruptura

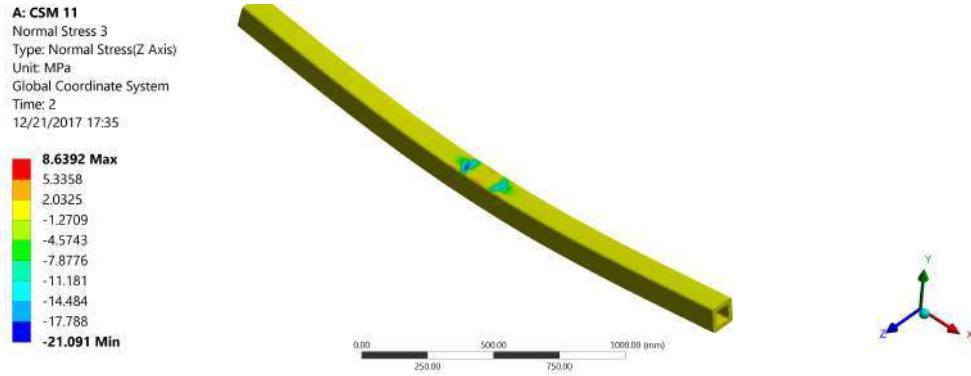


Figura A.27: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), CSM-11

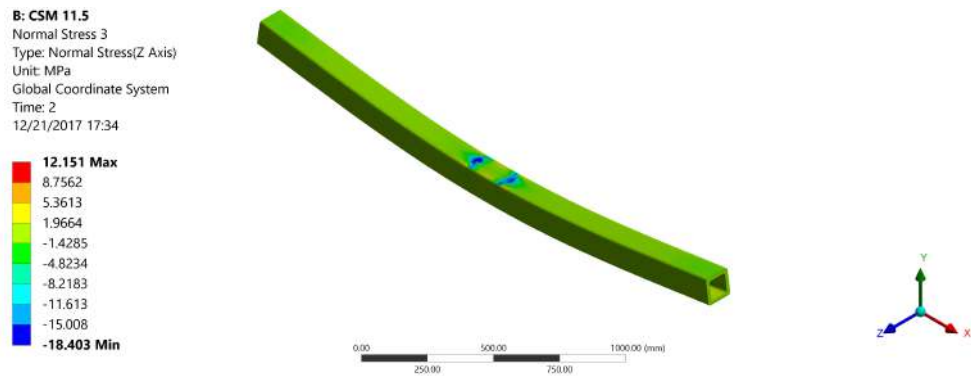


Figura A.28: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), CSM-11.5

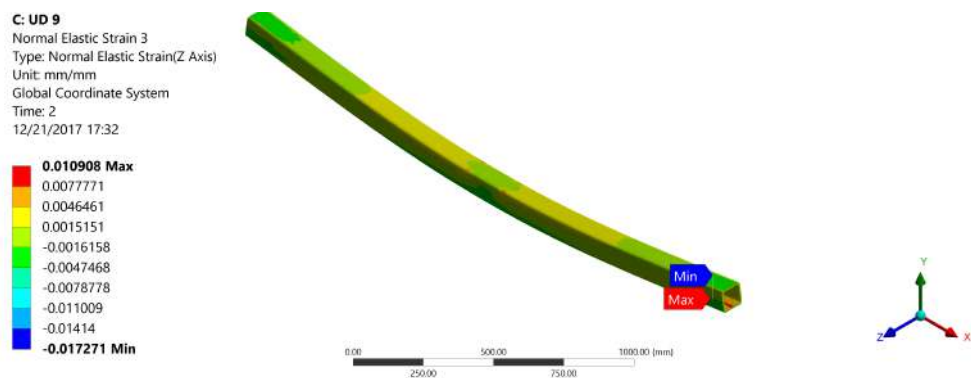


Figura A.29: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-9

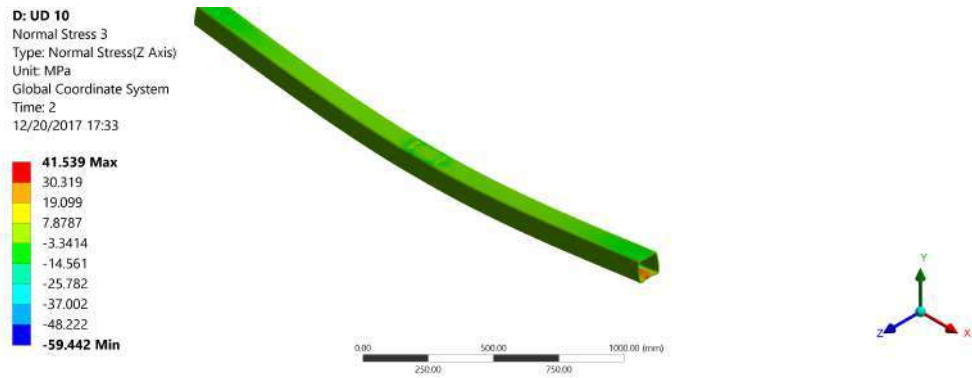


Figura A.30: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-10

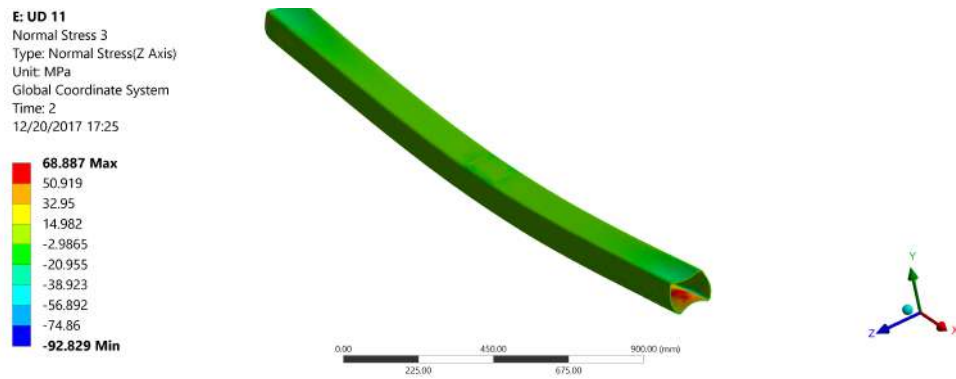


Figura A.31: Esfuerzos transversales a la cruceta (σ_z), UD-11

A.3.7. Esfuerzos transversales puntuales (σ_y) sobre línea de muestreo

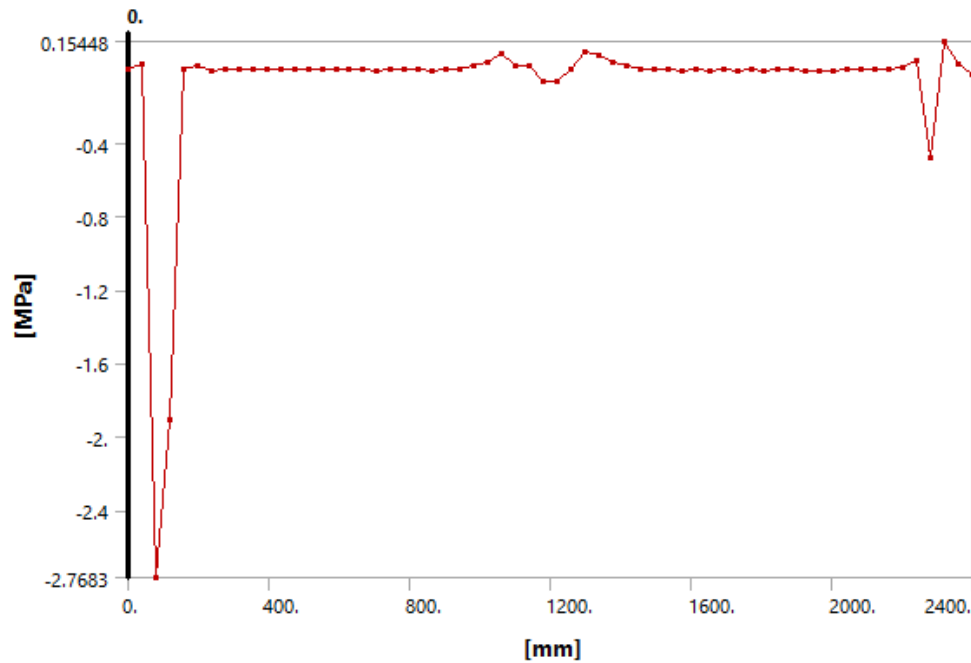


Figura A.32: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11

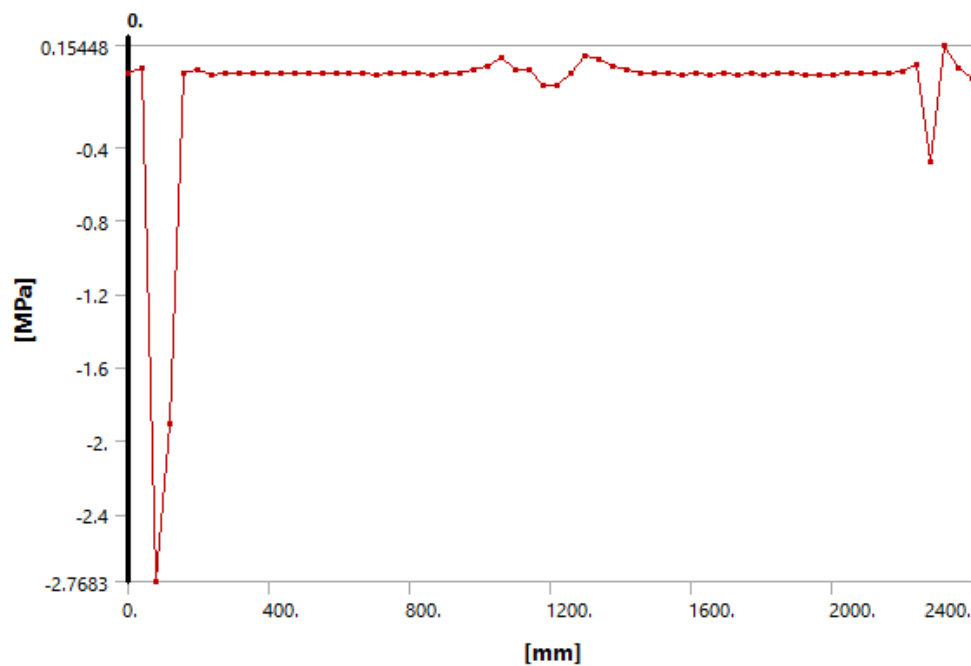


Figura A.33: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11

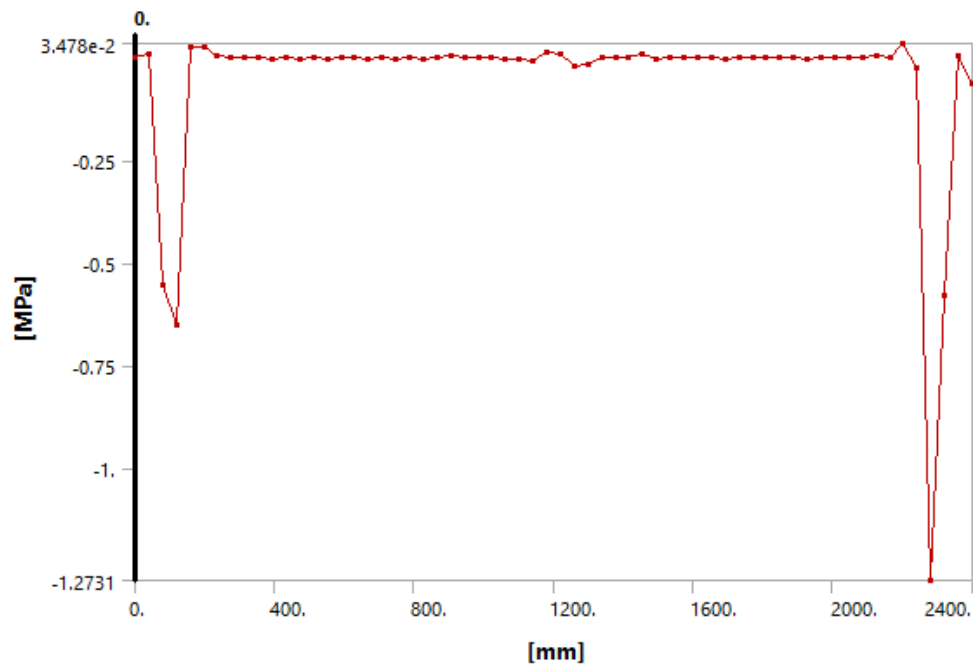


Figura A.34: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , CSM-11.5

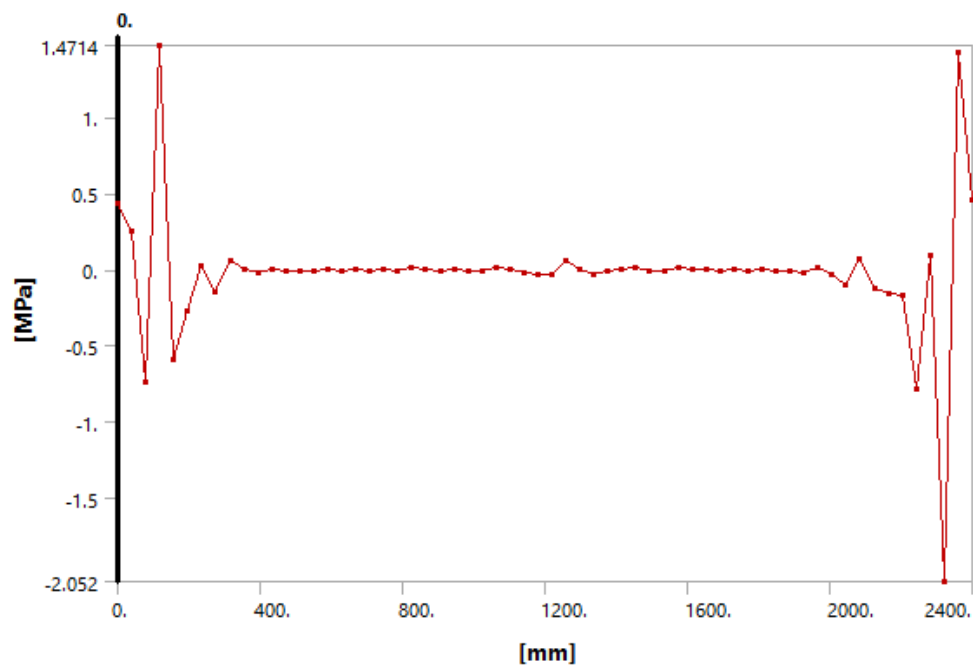


Figura A.35: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-9

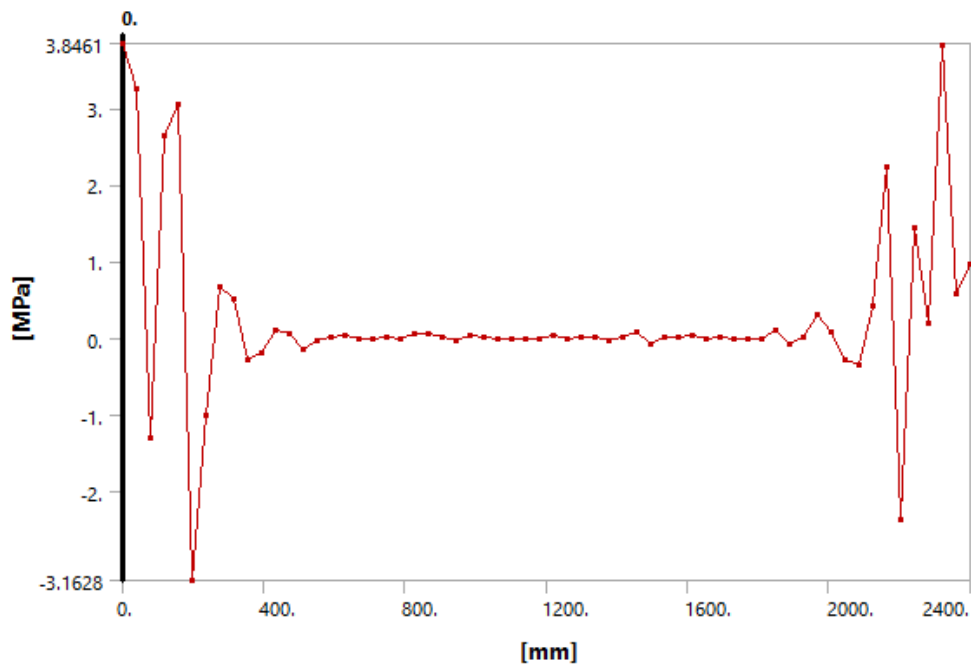


Figura A.36: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-10

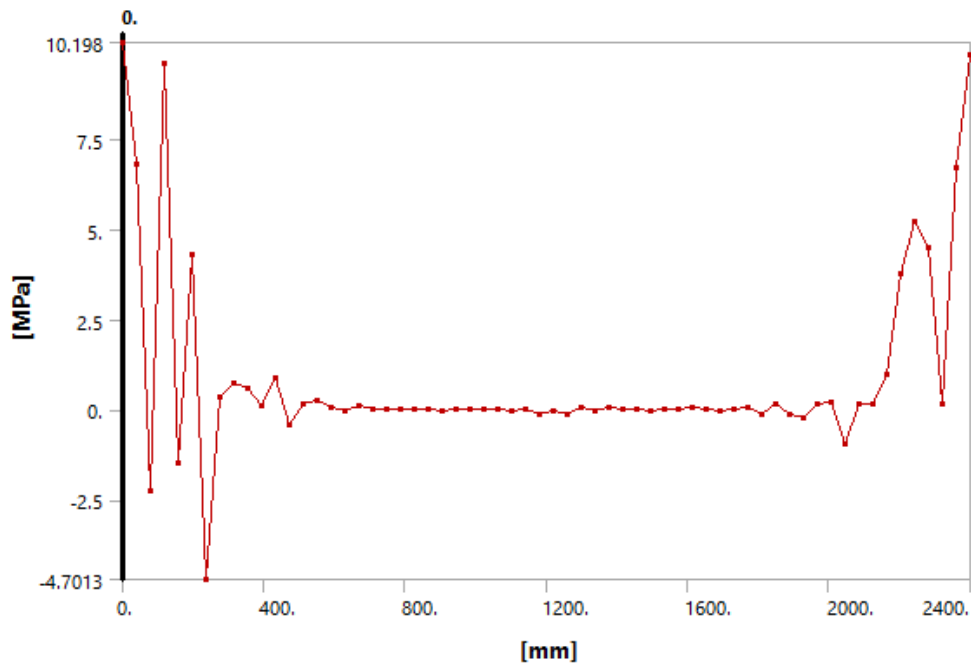


Figura A.37: Línea de muestreo (σ_y) respecto a x , UD-11

A.3.8. Esfuerzos transversales puntuales (σ_z) sobre línea de muestreo

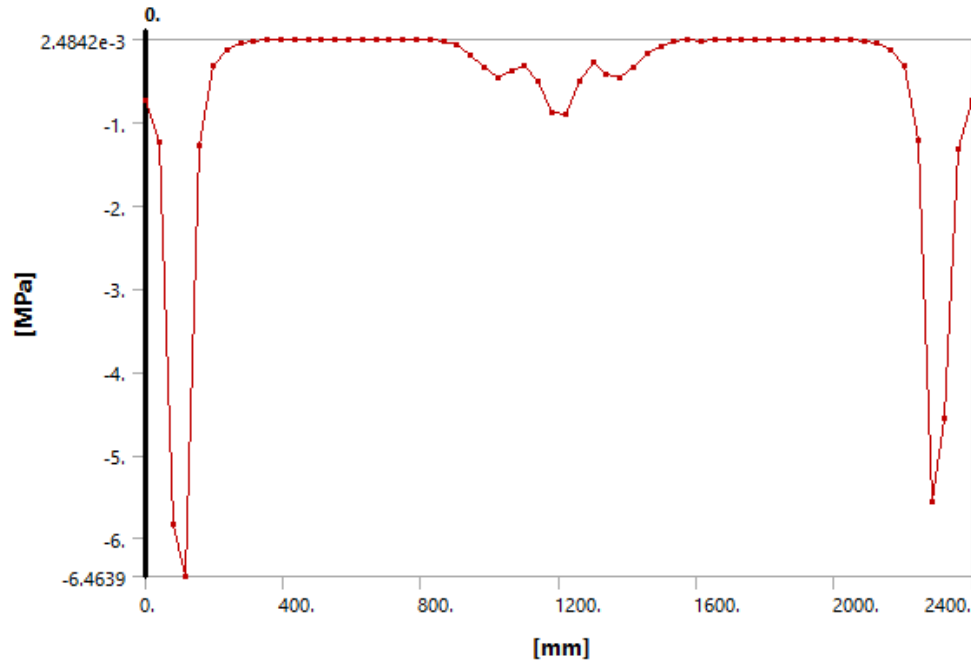


Figura A.38: Línea de muestreo (σ_z) respecto a x , CSM-11

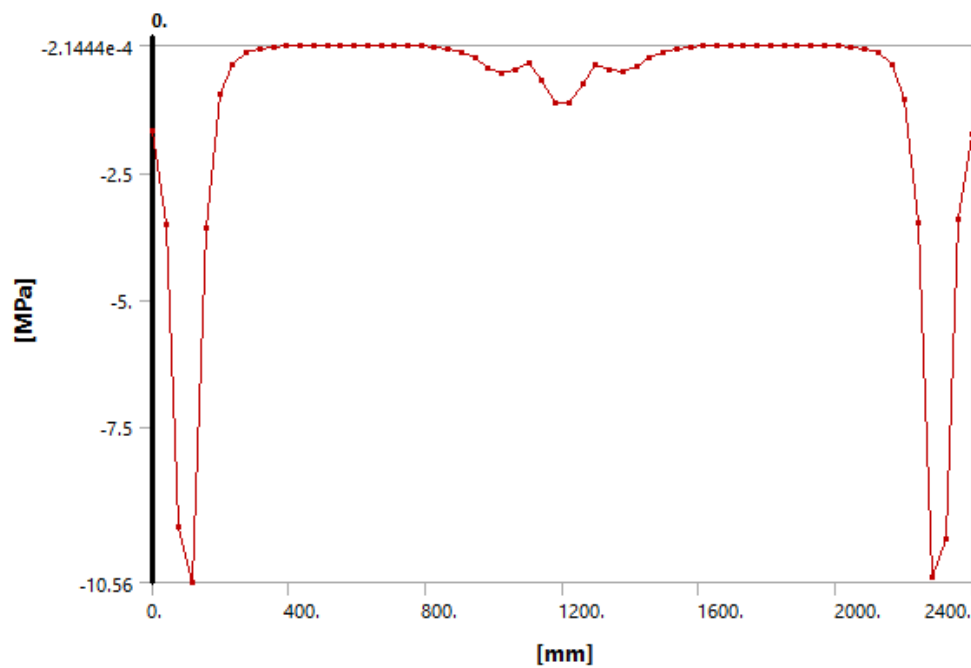


Figura A.39: Línea de muestreo (σ_z) respecto a x , CSM-11.5

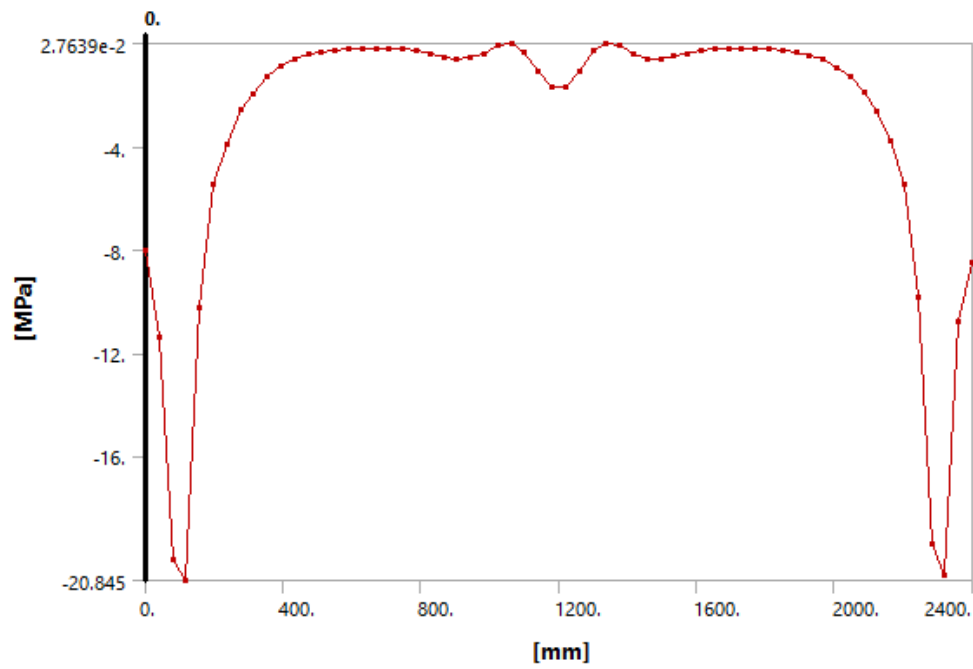


Figura A.40: Línea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-9

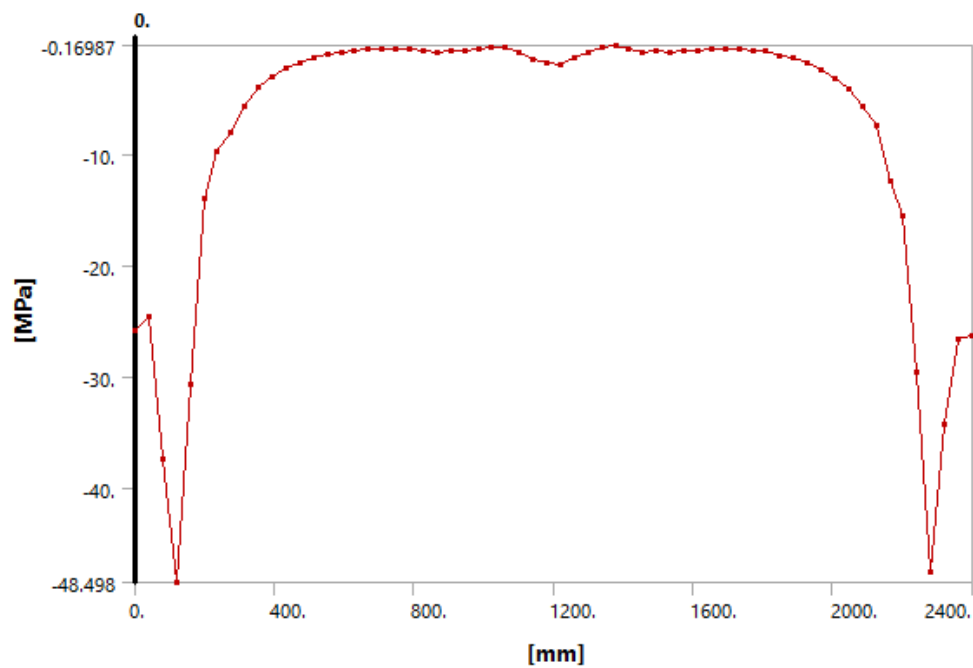


Figura A.41: Línea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-10

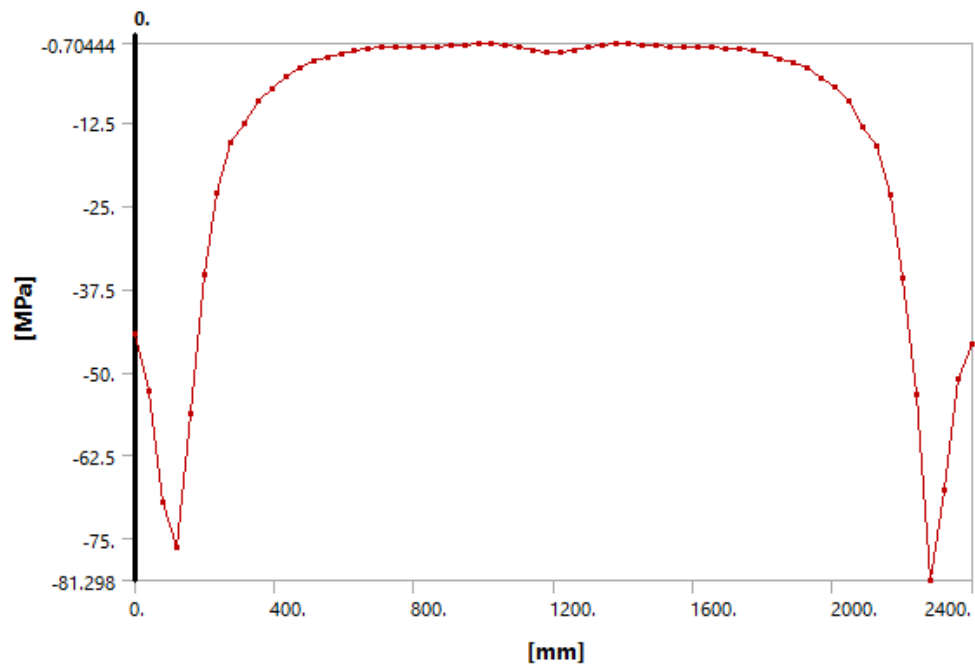


Figura A.42: Línea de muestreo (σ_z) respecto a x , UD-11

Apéndice B

Estudios eléctricos

B.1. Realización de probetas para ensayo de tracking eléctrico

Se realizaron pesajes de las muestras terminadas y de las fibras de refuerzo antes, se obtuvieron los porcentajes observados en la tabla B.1

Compuesto	Peso FV (g)	Peso terminado (g)	Vol. FV (cm^3)	Vol. Resina (cm^3)	Porcentaje %
UD	475	799	190	1294,56	39,2
CSM	346	890	138,4	494,54	21,8

Tabla B.1: Obtención del porcentaje volumétrico considerando $2,5 g/cm^3$ la densidad de la FV y $1,1 g/cm^3$ densidad de la resina epoxi

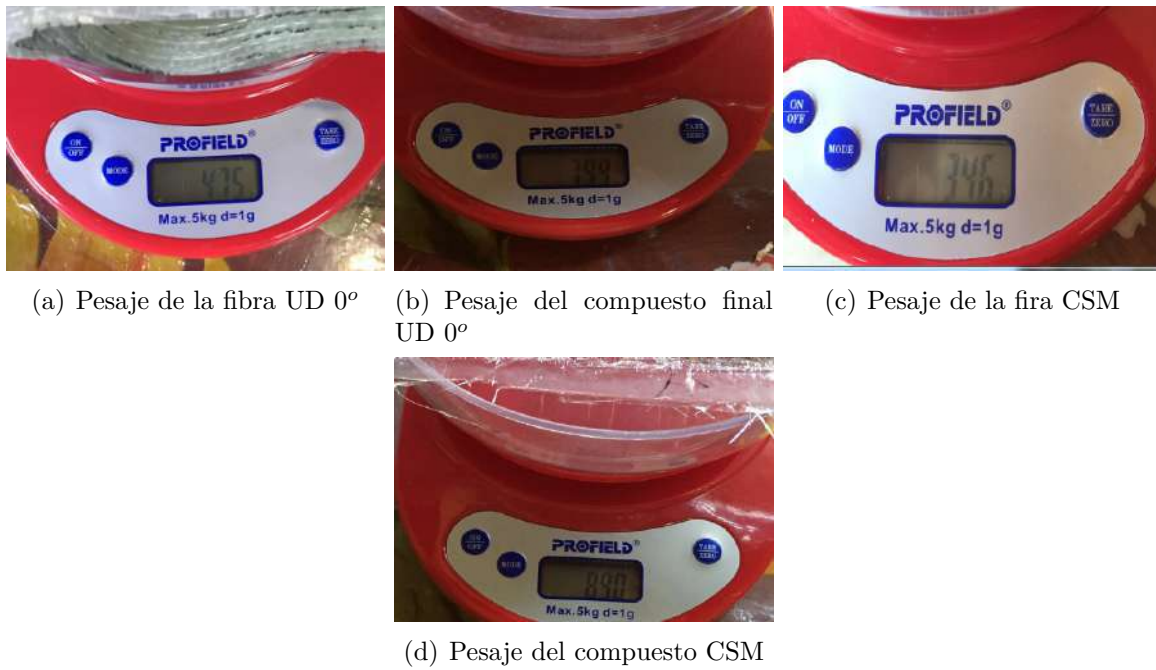


Figura B.1: Pesaje de la fibra y el compuesto terminado para obtener el porcentaje de refuerzos



Figura B.2: Muestras para ensayo NBR-10296

Bibliografía

- [1] B. D. Agarwal, L. J. Broutman, y K. Chandrashekhara, *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons, 2017.
- [2] ANDE, *Estructuras en Hormigón Armado*.
- [3] —, *Reglamento para instalaciones eléctricas de media tensión*.
- [4] —, “Resumen estadístico 2007 al 2011,” 2007.
- [5] P. Antequera, L. Jiménez, y A. M. de Marco, *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*. Universidad de Zaragoza, Secretariado de Publicaciones, 1991.
- [6] F. P. D. Beer, J. T. JOHNSTON, E. RUSSELL, F. P. Beer, E. R. Johnston jr, J. T. Dewolf, A. Bedford, K. M. A. Bedford, K. M. Liechti, M. V. Vable, *et al.*, *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill-Interamericana, 2007.
- [7] A. Besednjak, “Moldeo por contacto, laminación manual.”
- [8] V. V. Bhaskar y K. Srinivas, “Mechanical characterization of glass fiber (woven roving/chopped strand mat e-glass fiber) reinforced polyester composites,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1859, no. 1. AIP Publishing, 2017, p. 020108.
- [9] A. P. P. Bittencourt, G. B. Dutra, y T. P. Tancredi, “Effects of lamination processes on the physical and mechanical properties of fiberglass/polyester composites,” *Matéria (Rio de Janeiro)*, vol. 21, no. 4, pp. 1021–1031, 2016.
- [10] G. Castillo y S. Kalamis, “Análisis de laminados de materiales compuestos con precarga en su plano y sometidos a impacto,” 2007.
- [11] Csanyi, “Basic insulation level,” *Engineered Portal*.
- [12] G. M. Dalfré, “Cruzetas de polímeros reciclados: caracterização dos materiais, análise numérica e ensaios de modelos reduzidos,” *Escola de Engenharia de São Carlos—Universidade de São Paulo. São Carlos*, 2007.

- [13] S. Dodd, J. Champion, Y. Zhao, A. Vaughan, S. Sutton, y S. Swingler, "Influence of morphology on electrical treeing in polyethylene blends," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 150, no. 2, pp. 58–64, 2003.
- [14] I. V. focadell, *Especificaciones técnicas ANDE N 03.40.18 - Rev. 13 CRUCETAS POLIÉRICAS DE DISTRIBUCIÓN*.
- [15] R. FRANCO, "Produção de componentes em materiais compósitos por infusão de resina," Ph.D. disertación, Dissertação de M. Sc., Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- [16] M. V. Gelfuso, P. V. G. d. Silva, y D. Thomazini, "Polypropylene matrix composites reinforced with coconut fibers," *Materials Research*, vol. 14, no. 3, pp. 360–365, 2011.
- [17] T. Gonen, *Electric Power Distribution Engineering*, 3rd ed., C. Press, Ed., 2014.
- [18] N. Guo y M. C. Leu, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 215–243, 2013.
- [19] W. W. Hager, "Finite element methods." *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2016.
- [20] W. F. Hosford, *Elementary Materials Science*, A. International, Ed., 2013.
- [21] S. P. MartÑez, *REPRESENTACIÓN NORMALIZADA DE PIEZAS DE MATERIAL COMPUESTO*.
- [22] M. Najafi, F. R. ESLAMI, y S. Khalili, "Comparison of compressive properties between vacuum infusion and hand lay-up method toward balsa core sandwich composites," 2012.
- [23] I. J. Patino, *Especificaciones técnicas ANDE N 03.40.13 - Rev. 13 CRUCETAS DE MADERA*.
- [24] A. Pitel y F. Singer, *Resistencia de materiales*. OXFORD, 2008.
- [25] C. W. Rogers, "Insulators and dielectrics." *Salem Press Encyclopedia of Science*, 2016.
- [26] J. F. Shackelford, A. M. Piris, G. Mur, F. J. C. Marrero, J. M. J. G. Mur, J. M. C. Manero, M. S. Z. Mamlouk, J. P. M. S. Mamlouk, J. P. Zaniewski, R. H. Bazo, *et al.*, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*. Pearson:, 2010, no. 691.
- [27] R. F. D. Silva, *TRILHAMENTO ELÉTRICO SOBRE MATERIAIS POLIMÉRICOS PELA ANÁLISE DA ENERGIA ABSORVIDA DEVIDO AS DESCARGAS ELÉTRICAS SUPERFICIAIS*, U. F. do Paraná, Ed., 2013.

- [28] J. G. Trasancos, *Instalaciones eléctricas en media y baja tensión*. Paraninfo, 2011.
- [29] J. E. S. TRUJILLO, *Resistencia de Materiales Básica Para Estudiantes de Ingeniería*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2007.
- [30] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, *El Método de los Elementos Finitos*. CIMNE-Mc Graw Hill, 1994.