

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE MIXTO
(METAL Y MADERA) PARA EMPAQUES DE CABLES.**

MARIO FERNANDO MUÑOZ VÉLEZ

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE MIXTO
(METAL Y MADERA) PARA EMPAQUES DE CABLES.**

MARIO FERNANDO MUÑOZ VÉLEZ

Trabajo grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Director
MIGUEL A. HIDALGO SALAZAR
Ingeniero Mecánico, Msc.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico

ING. MIGUEL A. HIDALGO SALAZAR

Director

Ing. "Héctor Enrique Jaramillo S."

Jurado

Ing. "Robert Cooper"

Jurado

Santiago de Cali, 5 de Diciembre de 2008

Existen personas en mi vida a las cuales sería imposible no dedicarles este triunfo, a mis padres Carlos Muñoz y Sara Vélez, a mis hermanos Juan Diego y Santiago, ellos son motivo de inspiración y fortaleza para seguir el camino al éxito; dedico también a cada uno de los integrantes de mi familia de la que nunca faltó su apoyo en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el gran apoyo incondicional de mis padres en el camino recorrido para alcanzar un logro más en mi vida, también agradezco a cada una de las personas que aportaron en mi formación como ingeniero mecánico.

Por último gracias al grupo GITEM en especial a su director Miguel A. Hidalgo Salazar que me permitió aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera profesional y plasmarlos en este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	18
RESUMEN	20
INTRODUCCIÓN	21
1. METODOLOGIA DE DISEÑO	22
2. DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)	27
2.1 DESARROLLO DE LA MATRIZ Q.F.D	29
2.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA MATRIZ Q.F.D	35
3. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO METAL-MADERA No 24	39
3.1 ESTRUCTURA METALICA	39
3.2 PIEZAS DE MADERA	41
3.3 ENSAMBLE DEL CARRETE	43
4. PRUEBAS MECANICAS	45
4.1 PRUEBAS MECANICAS DEL ACERO	46
4.2 PRUEBAS MECANICAS A LA MADERA	69
5. ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL CARRETE MIXTO No 24.	93
5.1 CONSIDERACIÓN 1, CARRETE EN CONDICIONES NORMALES DE TRABAJO.	97
5.2 CONSIDERACIÓN 2, CARRETE ES TRANSPORTADO EN MONTACARGAS.	103

5.3	CONSIDERACIÓN 3, CARRETE MONTADO EN MAQUINA DE EMBOBINADO.	109
5.4	CONSIDERACIÓN 4, CAÍDA DEL CARRETE DESDE UNA ALTURA DE 1 M.	113
5.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS METAL-MADERA.	117
5.6	MODELO TEÓRICO	118
5.7	PROPUESTA DE RESISEÑO	126
6.	CONCLUSIONES	128
7.	RECOMENDACIONES	129
	BIBLIOGRAFÍA	130
	ANEXOS	133

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Desarrollo de la casa de la calidad.	34
Tabla 2. Resultados.	35
Tabla 3. Composición química del acero ASTM A-36.	47
Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.	47
Tabla 5. Composición química del acero ASTM A-36, para 5 coladas diferentes.	48
Tabla 6. Análisis de la composición química del acero ASTM A-36, obtenida experimentalmente.	49
Tabla 7. Efectos de los elementos químicos en las propiedades del material.	49
Tabla 8. Resultados del esfuerzo de fluencia.	57
Tabla 9. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo de fluencia.	58
Tabla 10. Resultados del esfuerzo máximo.	58
Tabla 11. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo máximo.	59
Tabla 12. Resultados del modulo de elasticidad.	60
Tabla 13. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.	60
Tabla 14. Resultados de la elongación	61
Tabla 15. Análisis estadístico de los resultados de la elongación.	61
Tabla 16. Resultados de dureza Rockwell B y Vickers para acero ASTM A-36.	64

Tabla 17. Análisis estadístico de los resultados de dureza.	65
Tabla 18. Resultados de la resistencia al impacto.	68
Tabla 19. Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto.	68
Tabla 20. Resultados de tensión en el punto de ruptura.	72
Tabla 21. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura	72
Tabla 22. Resultados del modulo de elasticidad.	73
Tabla 23. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.	74
Tabla 24. Deformación porcentual.	74
Tabla 25. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual.	74
Tabla 26. Resultados de tensión en el punto de ruptura.	77
Tabla 27. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura	78
Tabla 28. Resultados del modulo de elasticidad.	79
Tabla 29. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.	79
Tabla 30. Deformación porcentual.	79
Tabla 31. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual.	79
Tabla 32. Resultados de resistencia máxima a la ruptura.	83
Tabla 33. Análisis estadístico de resistencia máxima a la ruptura.	83
Tabla 34. Resultados del modulo de elasticidad	84
Tabla 35. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad a compresión	85

Tabla 36. Deformación porcentual de la madera sometida a compresión	85
Tabla 37. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual de la madera sometida a compresión.	85
Tabla 38. Resultados de tensión en el punto de ruptura por flexión.	88
Tabla 39. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura por flexión.	89
Tabla 40. Resultados de la resistencia al impacto.	91
Tabla 41. Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto.	92
Tabla 42. Propiedades físico-mecánicas suministradas a ALGOR para el acero A36.	96
Tabla 43. Propiedades físico-mecánicas suministradas a ALGOR para el Sajo.	97
Tabla 44. Resultados obtenidos para cada uno de los materiales que componen el carrete mixto No 24.	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proyecto de producción.	23
Figura 2. Proceso de diseño.	23
Figura 3. Casa de calidad	27
Figura 4. Puntos a ganar por cada una de las necesidades del cliente.	36
Figura 5. Importancia de los parámetros de diseño con respecto a las necesidades del cliente	37
Figura 6. a) Perfil L. b) Curvatura y despunte a 45 ° de coincidencia	40
Figura 7. Corte para coincidencia con banda de rodamiento y agujero para esparrago.	40
Figura 8. Banda de rodamiento.	40
Figura 9. Buje	41
Figura 10. Cascos de madera.	41
Figura 11. Ruteado de los cascos de la corona circular.	42
Figura 12. Duela de Tambor.	42
Figura 13. Ensamble de buje, radios y banda de rodamiento	43
Figura 14. Platinas interiores y exteriores	43
Figura 15. Perfil en L y platina superior para sujeción de la duela.	44
Figura 16. a) Estructura metálica con cascos de madera ensamblados. b) Carrete totalmente ensamblado.	44
Figura 17. Perfil en L de alas iguales.	50

Figura 18. Sección rectangular obtenida a partir del perfil	50
Figura 19. Operación de maquinado en la Fresadora Universal Nantong.	51
Figura 20. Probeta de tensión sin radios	51
Figura 21. Probeta de tensión terminada.	51
Figura 22. Lote de probetas de ensayo	52
Figura 23. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.	52
Figura 24. Descripción de la curva Esfuerzo vs. Deformación.	53
Figura 25. Probeta fracturada	55
Figura 26. Figura del Esfuerzo vs. Deformación porcentual de la probeta No. 7	56
Figura 27. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria.	59
Figura 28. Elongación de la probeta.	61
Figura 29. Cuello de la probeta.	62
Figura 30. Probetas para ensayo de dureza.	63
Figura 31. Microdurómetro Vickers Indentec modelo ZHV1.	64
Figura 32. Sección circular.	66
Figura 33. Sección rectangular obtenida de la sección circular.	66
Figura 34. Probeta de ensayo con muesca en V para prueba de impacto Charpy	66
Figura 35. Máquina par aprueba de impacto Charpy.	67
Figura 36. a) Probeta fracturada. b) Probeta no facturada.	69
Figura 37. Lote de probetas de ensayo.	71

Figura 38. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.	71
Figura 39. Esfuerzo Vs. Deformación. Material con comportamiento frágil.	72
Figura 40. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria. Modulo de elasticidad.	73
Figura 41. Probeta de ensayo	76
Figura 42. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.	76
Figura 43. Esfuerzo Vs. Deformación. Material con comportamiento frágil.	77
Figura 44. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria. Modulo de elasticidad.	78
Figura 45. Probeta de ensayo	81
Figura 46. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.	82
Figura 47. Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión (Esfuerzo Vs. Deformación).	82
Figura 48. Modulo de elasticidad a compresión. (Esfuerzo Vs. Deformación unitaria)	84
Figura 49. Probeta de ensayo.	87
Figura 50. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.	87
Figura 51. Probeta de ensayo para prueba de impacto Charpy.	90
Figura 52. Máquina par aprueba de impacto Charpy.	91
Figura 53. Estructura metálica.	93
Figura 54. Paredes de madera.	94
Figura 55. Cilindro Hueco (Cable).	94

Figura 56. Tambor.	94
Figura 57. Ensamble del carrete mixto No 24 sin cable.	95
Figura 58. Mallado del carrete	95
Figura 59. Restricciones del carrete para la condición 1.	98
Figura 60. Carga a la cual fue sometido el carrete en la condición 1.	99
Figura 61. Resultados de los desplazamientos (Magnitud) para la condición 1.	100
Figura 62. Resultados de los esfuerzos para la condición 1.	101
Figura 63. Resultados de los análisis en la madera para la condición 1	101
Figura 64. Resultados de los análisis en el acero para la condición 1.	102
Figura 65. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 1.	103
Figura 66. Transporte de carrete en montacargas.	104
Figura 67. Restricciones del carrete para la condición 2.	104
Figura 68. Resultados de desplazamientos (Eje Y) para la condición 2.	105
Figura 69. Resultados de los esfuerzos para la condición 2.	106
Figura 70. Resultados de los análisis en la madera para la condición 2.	106
Figura 71. Resultados de los análisis en el acero para la condición 2.	107
Figura 72. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos.	108

Figura 73. Restricciones del carrete para la condición 3.	109
Figura 74. Resultados de desplazamientos (Magnitud) para la condición 3.	110
Figura 75. Resultados de los esfuerzos para la condición 3.	111
Figura 76. Resultados de los análisis en la madera para la condición 3.	111
Figura 77. Resultados de los análisis en el acero para la condición 3.	112
Figura 78. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 3.	112
Figura 79. Plano de impacto a 1 m del carrete para la condición 4.	113
Figura 80. Deformaciones unitarias del carrete después de una caída libre de una altura de 1m.	114
Figura 81. Resultados de los esfuerzos para la condición 4.	115
Figura 82. Resultados de los análisis en la madera para la condición 4.	115
Figura 83. Resultados de los análisis en el acero para la condición 4.	116
Figura 84. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 4.	117
Figura 85. Diagrama de cuerpo libre de la aproximación del tambor.	119
Figura 86. Diagrama de cuerpo libre en la sección de corte.	120
Figura 87. Diagrama de cortante y momento flector.	123
Figura 88. Valor del máximo esfuerzo en el tambor por el método de elementos finitos.	124

Figura 89. Diagrama de la columna.	124
Figura 90. Esfuerzos obtenidos en la estructura por el método de elementos finitos.	125
Figura 91. Resultados obtenidos para el carrete propuesto.	127
Figura 92. Factor de seguridad para el carrete propuesto.	127

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Encuesta para evaluar la calidad de los carretes no. 24	133
Anexo B. Plano de probeta para prueba de tracción, material acero.	134
Anexo C. Plano de probeta para prueba de impacto	135
Anexo D. Plano de probeta para prueba de tracción de madera paralelo al grano.	136
Anexo E. Plano mordaza para prueba de tracción de madera paralelo al grano.	137
Anexo F. Plano de probeta para prueba de tracción de madera perpendicular al grano.	138
Anexo G. Plano mordaza para prueba de tracción de madera perpendicular al grano.	139
Anexo H. Plano de probeta para prueba de compresión de madera perpendicular al grano.	140
Anexo I. Plano de probeta para prueba de flexión de madera perpendicular al grano.	141

GLOSARIO

COMPONENTES: que compone o entra en la composición de un todo.

COMPRESIÓN: acción y efecto de comprimir.

DEFORMACIONES: acción y efecto de deformar.

DESPLAZAMIENTO: acción y efecto de desplazar.

DISEÑO: traza o delineación de un edificio o de una figura.

ESFUERZO: empleo enérgico de la fuerza física contra algún impulso o resistencia.

HERRAMIENTAS: instrumento, por lo común de hierro o acero, con que trabajan los artesanos.

IMPACTO: choque de un proyectil o de otro objeto contra algo.

INGENIERÍA: estudio y aplicación, por especialistas, de las diversas ramas de la tecnología.

METODOLOGÍA: conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o en una exposición doctrinal.

MONTACARGAS: ascensor destinado a elevar pesos.

PROCESO: acción de ir hacia delante.

PRODUCTO: cosa producida.

TRACCIÓN: acción y efecto de tirar de algo para moverlo o arrastrarlo, y especialmente los carruajes sobre la vía. Tracción animal, de vapor, eléctrica.

RESUMEN

Con el fin de conocer el comportamiento mecánico de un carrete mixto (metal y madera) para empaques de cables, se siguió una metodología de diseño evolutivo, el cual se caracteriza por la mejora y la innovación de productos ya existentes basándose para ello en el rediseño de estos, garantizando el cumplimiento de los requerimientos del cliente o especificaciones de diseño y ofreciendo mayor calidad y eficiencia en el producto terminado.

Para garantizar que los requerimientos del cliente se tengan en cuenta en el diseño, se desarrollo la metodología Q.F.D la cual es fundamental para la gestión total de la calidad del diseño de este producto, llevando un desarrollo completo de la matriz de calidad la cual ayuda a sistematizar las relaciones que se encuentran entre las necesidades del cliente y la gran variedad de características del producto, dando como resultado el núcleo del QFD.

El estudio del comportamiento mecánico del carrete mixto No 24 se realizo utilizando la metodología CAD/CAE, con la ayuda de los software ALGOR y SOLID EDGE.

Con el fin de darle mayor precisión y credibilidad al modelo virtual del carrete, se realizo una serie de ensayos físico – mecánicos a los materiales con los que se va a trabajar, en este caso madera y acero A36, esto para conocer sus verdaderas propiedades y así suministrar estos datos al software.

Este estudio se realizo para diferentes condiciones de trabajo a las cuales se encuentra sometido el carrete, cumpliendo un análisis completo de este.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Autónoma de Occidente por medio del grupo de investigación GITEM y con la colaboración de COLCIENCIAS, la red Universitaria para la Innovación en el Valle del Cauca (RUPIV), empresas como TETRA PAK y R.S.I Ltda.; pretende desarrollar e implementar en la empresa RECUPERADOS Y SERVICIOS INDUSTRIALES LTDA (R.S.I. LTDA) la tecnología que permita utilizar envases Tetra Pak, de origen post-industriales y post-consumo para fabricar carretes para empaque de cables eléctricos y telefónicos.

Con el fin de brindar un apoyo al grupo de investigación GITEM en su propósito, en este proyecto se estudiara las variables que determinan la resistencia y calidad de un carrete mixto (metal y madera), el proceso de fabricación y las propiedades mecánicas, entre otras, de los materiales, esto se lograra mediante la utilización de laboratorios para realizar ensayos físico mecánicos y simulaciones computacionales, realizando una adecuada búsqueda de bibliografía sobre propiedades mecánicas los materiales, las propiedades se utilizaran para los modelos teóricos y computacionales que se llevaran a cabo por medio de software especializado para asistir el diseño y simulación de productos.

El carrete mixto, el cual es el objeto de estudio de esta tesis, es un producto original de la empresa R.S.I Ltda., el cual viene siendo diseñado con la utilización de acero estructural y madera de bosque nativo, fabricado en diferentes tamaños, para este proyecto se espera realizar un estudio que facilite posteriormente la utilización de un nuevo material a base de reciclado de Tetra Pack para sustituir la madera.

1. METODOLOGIA DE DISEÑO

La creación o innovación de un sistema u objeto que supla ciertas necesidades, requiere el seguimiento de una serie de pasos o etapas que apliquen las ciencias básicas e ingenieriles para convertir los recursos en los objetos planeados.

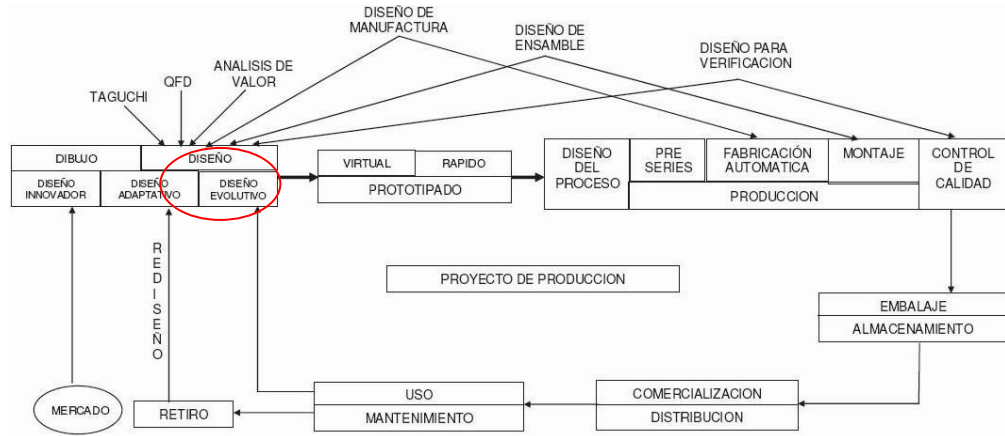
Con el fin de alcanzar un objetivo de diseño con mayor eficiencia y calidad, garantizando la satisfacción de las necesidades propuestas al inicio del proceso de diseño, es necesario definir un tipo de estrategia que permita lo anteriormente expuesto.

Existen diversas metodologías que definen el como del diseño de ingeniería convirtiéndose en la pieza clave en el proceso de diseño, de igual forma todas las metodologías si son bien aplicadas convergen en el mismo punto, el cumplimiento del objetivo.

El desarrollo del presente proyecto esta enmarcado dentro de los parámetros de un diseño evolutivo, el cual se caracteriza por la mejora y la innovación de productos ya existentes basándose para ello en el rediseño de estos, garantizando el cumplimiento de los requerimientos del cliente o especificaciones de diseño y ofreciendo mayor calidad y eficiencia en el producto terminado.

La diferencia básica entre un diseño evolutivo y un diseño adaptativo esta en que las necesidades del cliente se mantienen en el diseño evolutivo y lo que se pretende es mejorar el diseño en cuanto a los factores ambientales, tecnológicos, económicos y de seguridad, con el fin de ofrecer un producto que satisfaga tales necesidades a un mejor costo, mayor calidad y eficiencia tanto para el usuario como en el proceso de fabricación; mientras que el diseño adaptativo se realiza cuando a un producto existente se le deben hacer modificaciones para que se cumplan nuevos requerimientos de diseño impulsados por cambios en las necesidades del cliente.

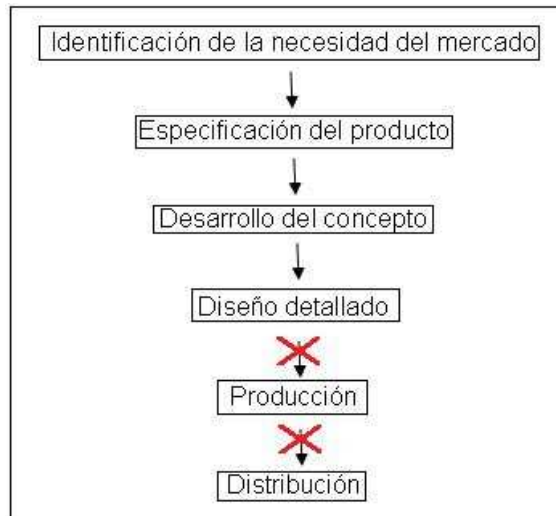
Figura 1. Proyecto de producción.



Fuente: Desarrollo tecnológico para fabricar carretes para empaque de cables, utilizando como materia prima tetra pak de origen post-industrial y post-consumo en sustitución de madera de bosque nativo [en línea]: Metodología de diseño. Santiago de Cali: Grupo de Investigación en Tecnologías para la Manufactura, 2008. [Consultado 10 de abril de 2008]. Disponible en Internet: <http://augusta.uao.edu.co/gitem/proyectos.html>

El proceso de diseño mecánico constantemente esta desarrollando nuevas prácticas que replacen a otras. Diferentes compañías usan distintas terminologías clasifican diferente las actividades dentro de los grupos. Sin embargo hay concordancia sobre los pasos a seguir para desarrollar un producto apropiadamente. Una típica representación de los procesos de diseño es la siguiente:

Figura 2. Proceso de diseño.



Aunque se muestre una secuencia el diseño es un proceso iterativo. Hay información relacionada entre las fases.

Alejándose en la práctica, las fases coinciden de manera que una fase puede existir antes de de completar las fases anteriores. La inclusión de todas las fases representa la actual práctica de integración de las actividades para el desarrollo del producto dentro de la organización como un todo. Es más comprensible el proceso si se refiere a la variedad de ingenierías que concurren en un total diseño o un desarrollo total de cualidades. En este proyecto se omitirá las fases de producción y distribución ya que no corresponden a los objetivos del proyecto.

La **identificación de las necesidades del mercado** establece los requerimientos o necesidad del carrete mixto (Metal y Madera) No 24, esta fase requiere de ideas para un nuevo producto o mejoramiento de el, esta información fue suministrada por R.S.I Ltda., y CENTELSA empresas comercializadoras de carretes de este tipo.

Si se habla de la **especificación del producto** se puede decir que una vez identificada la necesidad del mercado, son desarrolladas especificaciones generales para el producto. En este caso las especificaciones que se consideran son las siguientes:

- **Proceso de fabricación del carrete.** Es importante conocer el proceso de fabricación debido a que alguno de los procesos podría influir en el comportamiento mecánico del producto.
- **Manipulación del carrete.** Es indispensable conocer el trato o tipo de manipulación que le dan los operarios al producto, como también es necesario saber que tan fácil se puede manipular, para así tener un producto resistente a las condiciones de trabajo.
- **Calidad del carrete.** Hay que conocer la calidad del producto actual para poder determinar aspectos de duración, corrosión entre otras.
- **Condiciones de trabajo.** Se necesita conocer aspectos de las condiciones de trabajo a las cuales se encuentra sometido el producto, como que tan resistente es este a todas estas condiciones.

- **Garantías que ofrece el carrete de acuerdo al producto empacado en él.** Es muy importante hacer énfasis en la protección que le da el carrete a el producto que se empa en el, es primordial que no se afecte la calidad de este.

- **Aspecto físico del carrete.** Uno de los aspectos que aunque no parezcan trascendentales no se puede dejar a un lado es el aspecto físico, se debe procurar que el producto sea visualmente estético.

- **Impacto ambiental.** Hoy en día todo producto procura tener un impacto ambiental favorable

Con el fin de interpretar las necesidades y requerimientos del cliente se usara la metodología QFD, este es un método estructural de interpretación de los requerimientos del cliente dentro de las especificaciones de ingeniería. El documento que se prepara es una “casa de cualidades”. Esta consiste en algunas piezas o casillas que en cada una de estas contienen un conjunto de información, el cliente y la relacione entre estas casillas.

Otra de las fases es el **desarrollo del concepto** el cual aparece cuando las especificaciones se encuentran definidas, entonces entra a jugar los conceptos de desarrollo los cuales son los más seleccionados y solicitados. Este concepto tiene dos partes, la generación y la evaluación.

En el desarrollo de este proyecto se integraron prácticas importantes, concernientes en ingeniería mecánica como lo son, la caracterización de los materiales (metal y madera), el diseño 3D del carrete mixto No 24 con metodología CAD, el análisis por elementos finitos por medio de la metodología CAE y el análisis de resultados.

El **diseño detallado** es la fase en la que un producto se ha formado de la idea a la configuración final. Esto incluye todos los preparatorios para la fabricación de un producto. En el diseño mecánico es imposible separar el diseño detallado del componente de proceso de diseño ya que son interdependientes. A causa de este elevado nivel de actividad, la correcta ejecución de las fases anteriores, es esencial para evitar el derroche de recursos en esta etapa de desarrollo.

Las siguientes son algunas de las actividades a realizar durante el diseño de detalle.

- **Determinar la configuración completa detallada de los productos.** Con el fin de realizar exitosamente este punto se realizó algunas visitas a la empresa R.S.I Ltda., la cual es la fabricante del carrete mixto (metal-madera) No 24, en estas visitas se logró determinar con detalle la fabricación del mismo.

- **Construir modelos y prototipos.** En esta tesis se desarrolló un prototipo virtual basado en los detalles de construcción del carrete determinados en el punto anterior, este modelo se realizó utilizando el método de ingeniería CAD, con la ayuda del software Solid Edge V19.

- **Completar documentos de garantía de calidad.** Este proyecto se realizó bajo la inspección de normas ICONTEC para las pruebas de la madera y normas ASTM para las pruebas realizadas al acero A 36, esto con el fin de garantizar la calidad de este proyecto.

- **Desarrollar los métodos de inspección.** En este punto se realizó una inspección detallada de las propiedades mecánicas de los materiales de los cuales se encuentra construido el carrete, en este caso acero A 36 y madera Sajo. Esta inspección se hizo en los laboratorios de materiales de la universidad Autónoma de Occidente.

- **Pruebe el producto final.** Para realizar la prueba del producto final se concentraron conceptos como el del método de elementos finitos el cual es una metodología CAE y se utilizó los resultados de los ensayos mecánicos para darle propiedades al modelo virtual.

Se escogió este método debido a que es una poderosa herramienta matemática que puede brindar gran variedad de soluciones numéricas a problemas de ingeniería, brindando ventajas en el desarrollo del diseño de ingeniería como que puede lograr un análisis de piezas y ensamblajes más rápido, también permite evaluar varias alternativas de diseño, los resultados obtenidos constituyen un proceso de ingeniería predictiva, la cual brinda diseños óptimos y de calidad. Esta metodología se realizó con la ayuda del software ALGOR V19.

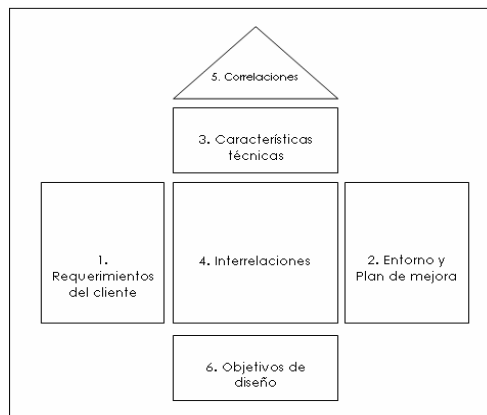
2. DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)

Para esta investigación se debe tener en cuenta el despliegue de función de calidad (QFD) ya que es una parte fundamental para la gestión total de la calidad del diseño de este producto, llevando un desarrollo completo de la matriz de calidad la cual ayuda a sistematizar las relaciones que se encuentran entre las necesidades del cliente y la gran variedad de características del producto, dando como resultado el núcleo del QFD.

Una de las razón por la cual se escogió esta metodología de diseño es por las grandes ventajas que brinda como que cada persona que hace parte de este proyecto puede aportar sus intereses, puntos de vista y conocimientos con el objetivo común del nuevo producto, también el QFD enfoca todo el desarrollo del producto hacia las necesidades del cliente, mejorando la calidad de este y acortara el tiempo que se necesita para la concepción del producto, desde el diseño hasta su lanzamiento del producto.

Para el desarrollo de la matriz QFD en este proyecto es necesario dar explicación de cada uno de los componentes que forman la casa de la calidad (Figura 3).

Figura 3. Casa de calidad



Fuente: Quality function development (QFD) [en línea]: Despliegue de la función de calidad. Oaxaca: Instituto de innovación y calidad gubernamental, 2006. [Consultado 15 de abril de 2008]. Disponible en Internet: http://www.eoaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI.

- **Requerimientos del cliente.** En esta investigación son muy importantes los requerimientos que hay frente al producto ya que una de las principales tareas que se debe tener en cuenta es el identificar cuales son las demandas del cliente, aclarando que los clientes deben ser claros y específicos en lo que se desea del producto.

- **Entorno y plan de mejora.** En el plan de mejora se calificaran aspectos muy importantes como lo son la importancia de cada necesidad del cliente, la situación de la empresa constructora con respecto a cada una de estas necesidades y también se calificara el cómo se quiere estar con respecto a cada una de las necesidades del cliente, con el fin de conocer cuál de las necesidades pesa más en cuanto al diseño del producto.

- **Características técnicas.** Esta parte registrara las características del producto que se relacionan con todas las necesidades que dan los clientes. Estas serán características controlables y medibles.

- **Interrelaciones.** Es la parte central del esquema a constituir. En este proceso se formara una matriz en la que las filas son las necesidades de los clientes y las columnas las características técnicas (requerimientos) del producto.

- **Correlaciones entre características técnicas.** En la figura 3 se puede notar que en el “tejado” triangular es la zona donde se esta reflejando la influencia que los requerimientos pueden tener entre si.

- Estas relaciones ayudaran a tomar decisiones sobre los valores que deben tomar las características de calidad. Teniendo en cuenta que al mejorar algún proceso puede empeorar otro, especialmente si cualquiera de estas otras son importantes.

- **Objetivos de diseño.** Uno de los objetivos del diseño es identificar la importancia de cada una de los requerimientos del cliente, como también es conocer como se encuentra actualmente el producto y trazar unos valores que se convertirán en el objetivo de este proyecto.

2.1 DESARROLLO DE LA MATRIZ Q.F.D

El desarrollo de la matriz QFD es una parte importante para la conclusión de esta investigación, por tal motivo el objetivo de obtener un desarrollo adecuado y preciso de la matriz de calidad QFD del carrete estudiado, se implemento la propuesta de la Asociación latinoamericana de QFD; con el fin de realizar correctamente la implementación de esta matriz fue necesario ponerse en contacto directo con los proveedores y los clientes del carrete, trabajando con las empresas RSI Ltda. y Cobres de Colombia como proveedores, y CENTELSA como consumidor, garantizando que los resultados obtenidos consideren los aspectos más importantes para cada una de las dos posiciones involucradas en este producto.

Por medio de una consulta realizada a personas expertas en el campo de la producción de los carretes se logro identificar las principales necesidades a tener en cuenta en el diseño de estos productos, de tal forma que satisfagan completamente las necesidades que requiere el cliente, optimizando su diseño para alcanzar los niveles de calidad deseados.

Las necesidades que se identificaron con la ayuda de estas personas fueron agrupadas en necesidades de tipo superior como lo son el proceso de fabricación del carrete, la facilidad que tiene la manipulación del producto, la calidad de este, las propiedades mecánicas del carrete, la garantía que ofrece el carrete de acuerdo a la protección del producto empacado en él, su aspecto físico y el impacto ambiental del producto; las necesidades del cliente se distribuyeron de la siguiente forma:

➤ **Proceso de fabricación del carrete.** Dentro de esta necesidad superior se agruparon las necesidades del cliente que tienen una relación directa con el proceso de fabricación del producto, tales como:

- El carrete es de fácil ensamble.
- El carrete requiere corto tiempo de producción.
- El carrete es económico.

➤ **Manipulación del carrete.** Dentro de esta necesidad se introdujeron las necesidades del cliente que se relacionan directamente con la dificultad de manipulación del carrete, como lo son:

- El carrete es liviano.
- El carrete es fácil de transportar.
- El carrete permite realizar pruebas al producto.
- El carrete facilita el empaque del producto.

➤ **Calidad del carrete.** En esta necesidad superior se agruparon las necesidades del cliente que nos deja identificar fácilmente de que tan buena calidad es el producto, como lo son:

- El carrete es duradero.
- El carrete presenta poca absorción de agua.
- El carrete es resistente a la corrosión.
- El carrete soporta inadecuadas condiciones de transporte.

➤ **Condiciones de trabajo.** En esta necesidad superior se introdujeron las necesidades del cliente que conllevan una relación de tipo directo con las propiedades mecánicas que caracterizan el carrete, como lo son:

- El carrete es rígido.
- El carrete es resistente al impacto.
- El carrete soporta caídas.

- El carrete soporta cargas considerables de acuerdo a su referencia.
- El carrete soporta altas temperaturas.
- **Garantías que ofrece el carrete de acuerdo al producto empacado en él.** Dentro de esta necesidad superior se agruparon las necesidades del cliente que tienen una relación directa con las garantías que ofrece el carrete con respecto al producto empacado en él, tales como:
 - El carrete no afecta la calidad del producto empacado en él.
- **Aspecto físico del carrete.** En esta necesidad superior se introdujeron las necesidades del cliente que conllevan una relación de tipo directo con la apariencia física del carrete, como lo son:
 - El carrete es visualmente estético.
- **Impacto ambiental.** De acuerdo a esta necesidad superior se agruparon las necesidades del cliente que conllevan a una relación directa con el impacto ambiental generado por la construcción del producto.
 - El carrete es recuperable.
 - El carrete es reciclable.

Para evaluar el grado de importancia de cada una de las necesidades del cliente mencionadas anteriormente se realizó una encuesta en la cual tanto los proveedores del carrete como los clientes del producto califican estas necesidades en un rango de 1 a 5, siendo 5 el nivel más importante y 1 el de menor importancia.

La encuesta realizada con fines de hacer la matriz Q.F.D se muestra en el anexo 1.

La encuesta fue de gran utilidad para el correcto desarrollo de la matriz de calidad QFD ya que se tomo como base para dar un valor calificativo a cada una de las necesidades del cliente, esta encuesta se realizo a las empresas R.S.I Ltda., y Cobres de Colombia como empresas proveedoras y a CENTELSA como cliente.

De acuerdo a las necesidades del cliente se pudo determinar ciertos parámetros de diseño que le dan a estas, características de especificaciones de diseño. Estos parámetros son:

- **Masa total:** Masa del carrete sin el producto empacado en él. (Kg.)

- **Deformación:** Máxima deformación que puede sufrir el carrete. (%), este parámetro será registrado como valor porcentual, debido a que no se conoce el valor actual de deformación del carrete No 24 sometido a determinadas cargas, por lo tanto el valor que registre de deformación cuando se analice por el método de elementos finitos será el 100% el cual es un valor que se buscara disminuir, si es necesario.

- **Energía absorbida en prueba de impacto de los materiales que componen el carrete (J):** en este parámetro se tubo en cuenta el valor obtenido en la prueba Charpy de los materiales de los cuales esta hecho el carrete, en especial el material que se encuentra fabricada la estructura del mismo.

- **Material:** Tipo de material del cual esta constituido el carrete.

- **Carga del cable:** Carga máxima que puede soportar el carrete. (Kg.)

- **Temperatura:** Temperatura máxima al cual puede ser sometido el carrete. (°C)

- **Costo de fabricación por unidad:** Costo total del producto. (%), este parámetro será registrado como valor porcentual, debido a que no se conoce el valor actual del costo del carrete No 24, por lo tanto el valor actual se registrara como el 100% y se buscara reducir este parámetro en cierto porcentaje, si es necesario.

- **Tiempo de producción:** Tiempo total que se emplea para producir el carrete. (h)

- **Número de piezas a ensamblar:** Numero de piezas empleadas en el ensamble del producto. (#)

- **Porcentaje de humedad (%)**

Los parámetros establecidos anteriormente deben definir los criterios de diseño adecuados para contribuir al correcto desempeño de cada una de las necesidades del cliente, es primordial determinar el nivel de importancia y de contribución a la optimización del diseño que tiene cada uno de estos parámetros, para esto se confrontan con cada necesidad del cliente estableciendo su grado de relación entre fuerte (9), media (3), ligera (1) o ninguna (0), como se presenta en la tabla 1.

Una vez se estableció el grado de relación entre las necesidades del cliente y los parámetros de diseño se caracterizaron estos parámetros de tal forma que se puede identificar para cada uno de ellos sus unidades, la dirección de mejora, el nivel actual, la meta a llegar y el grado de dificultad para alcanzar esta meta; esta caracterización de los parámetros de diseño es importante para logra una mayor claridad en el momento dado de interpretar y analizar los resultados obtenidos en la matriz de calidad QFD.

Tabla 1. Desarrollo de la casa de la calidad.

Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24		Ponderación actual	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
		79,7%	18,5%	12,5%	8,2%	19,3%	6,8%	0,9%	5,4%	6,9%	7,5%	14,0%					
No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado	Masa Total	Deformación	Energía absorbida en prueba Sharpy	Material	Carga del Cable	Temperatura	Costo de fabricación por unidad	Tiempo de Producción	Numero de Piezas a	% Humeda	Eval de clientes	Peso Ponderado	Eval ponderada	Brecha absoluta	Brecha absoluta
1	Fácil ensamble	1,4%	3	0	0	3	0	0	3	9	9	0	80%	1,4%	1,10%	0,27%	1,4%
2	Tiempo de fabricación	1,4%	1	0	0	9	0	0	9	9	3	3	70%	1,4%	0,96%	0,41%	2,0%
3	Económico	5,5%	9	0	0	9	0	0	9	9	1	1	80%	5,5%	4,38%	1,10%	5,4%
4	Liviano	2,7%	9	0	0	3	1	0	1	0	0	3	70%	2,7%	1,92%	0,82%	4,1%
5	Facilidad de transporte	6,8%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90%	6,8%	6,16%	0,68%	3,4%
6	Permite realizar pruebas al	6,8%	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	100%	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
7	Facilita el empaque del producto	6,8%	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
8	Duradero	4,1%	0	3	0	3	3	0	0	0	1	9	70%	4,1%	2,88%	1,23%	6,1%
9	Tolerancia al agua	6,8%	0	0	0	3	0	0	0	0	0	9	80%	6,8%	5,48%	1,37%	6,8%
10	Resistente a la corrosión	6,8%	0	0	0	3	0	0	0	0	0	9	80%	6,8%	5,48%	1,37%	6,8%
11	soporta inadecuadas condiciones	5,5%	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	60%	5,5%	3,29%	2,19%	10,8%
12	Rígido	6,8%	3	9	0	9	3	0	0	0	3	0	70%	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
13	Resistente al impacto	6,8%	3	3	9	3	0	0	0	0	3	0	70%	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
14	Soporta caídas	5,5%	3	3	9	3	0	0	0	0	3	0	60%	5,5%	3,29%	2,19%	10,8%
15	Soporta cargas considerables	6,8%	3	9	0	1	9	0	0	0	0	0	70%	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
16	Tolerante a altas temperaturas	1,4%	0	0	0	1	0	9	0	0	0	0	90%	1,4%	1,23%	0,14%	0,7%
17	No afecta la integridad del	6,8%	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	100%	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
18	el carrete es visualmente estético	4,1%	0	0	0	3	0	0	1	1	0	0	100%	4,1%	4,11%	0,00%	0,0%
19	Recuperable	5,5%	1	0	0	3	0	0	0	0	3	0	70%	5,5%	3,84%	1,64%	8,1%
20	Reciclable	1,4%	1	0	0	3	0	0	3	0	0	0	50%	1,4%	0,68%	0,68%	3,4%
			100,0%														
Peso ponderado OK			2,6	1,8	1,2	2,7	1,0	0,1	0,8	1,0	1,1	2,0	78,0%	100,0%	79,7%	20,3%	100,0%
Unidades			Kg	%	J	Propiedades	Kg	°C	%	horas	#	%					
Dirección de Mejora			Menor	Menor	Mayor	Nominal	Mayor	Mayor	Menor	Menor	Menor	Menor					
Nivel actual			437	100%	202	METAL - MADERA	6850	40	100	16	30	20					
Meta			437	70%	202	METAL - MADERA	7500	45	70	16	21	14					
Dificultad			70%	60%	80%	90%	60%	50%	70%	90%	80%	35%					

2.2 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA MATRIZ Q.F.D

Los resultados que se observan en la tabla 2 son de gran utilidad para realizar un análisis claro de la matriz Q.F.D, en esta tabla se pueden observar datos como la evaluación del cliente en los cuales se identifica los aspectos más importantes para los clientes, como también se consigue detallar el peso ponderado que conlleva cada una de estas necesidades; otro de los aspectos que se encuentra en esta tabla es la evaluación ponderada la cual es producto de la relación del peso ponderado y la evaluación del cliente.

En caso que la necesidad tenga una mejora al máximo se podrían ganar unos puntos porcentuales los cuales se observan en la brecha absoluta ponderada, igualmente es importante observar con detenimiento cuales de las necesidades aportan mayor porcentaje en la mejora total, esto se logra analizando la brecha absoluta relativa.

Tabla 2. Resultados.

Matriz de relaciones: carrete para empaque de cable No 24		Peso	Eval	Brecha	Brecha
No	Necesidad del Cliente	Ponderado	ponderada	absoluta	absoluta
1	Fácil ensamble	1,4%	1,10%	0,27%	1,4%
2	Tiempo de fabricación	1,4%	0,96%	0,41%	2,0%
3	Económico	5,5%	4,38%	1,10%	5,4%
4	Liviano	2,7%	1,92%	0,82%	4,1%
5	Facilidad de transporte	6,8%	6,16%	0,68%	3,4%
6	Permite realizar pruebas al	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
7	Facilita el empaque del producto	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
8	Duradero	4,1%	2,88%	1,23%	6,1%
9	Tolerancia al agua	6,8%	5,48%	1,37%	6,8%
10	Resistente a la corrosión	6,8%	5,48%	1,37%	6,8%
11	soporta inadecuadas condiciones	5,5%	3,29%	2,19%	10,8%
12	Rígido	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
13	Resistente al impacto	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
14	Soporta caídas	5,5%	3,29%	2,19%	10,8%
15	Soporta cargas considerables	6,8%	4,79%	2,05%	10,1%
16	Tolerante a altas temperaturas	1,4%	1,23%	0,14%	0,7%
17	No afecta la integridad del	6,8%	6,85%	0,00%	0,0%
18	el carrete es visualmente estético	4,1%	4,11%	0,00%	0,0%
19	Recuperable	5,5%	3,84%	1,64%	8,1%
20	Reciclable	1,4%	0,68%	0,68%	3,4%
		100,0%	79,7%	20,3%	100,0%

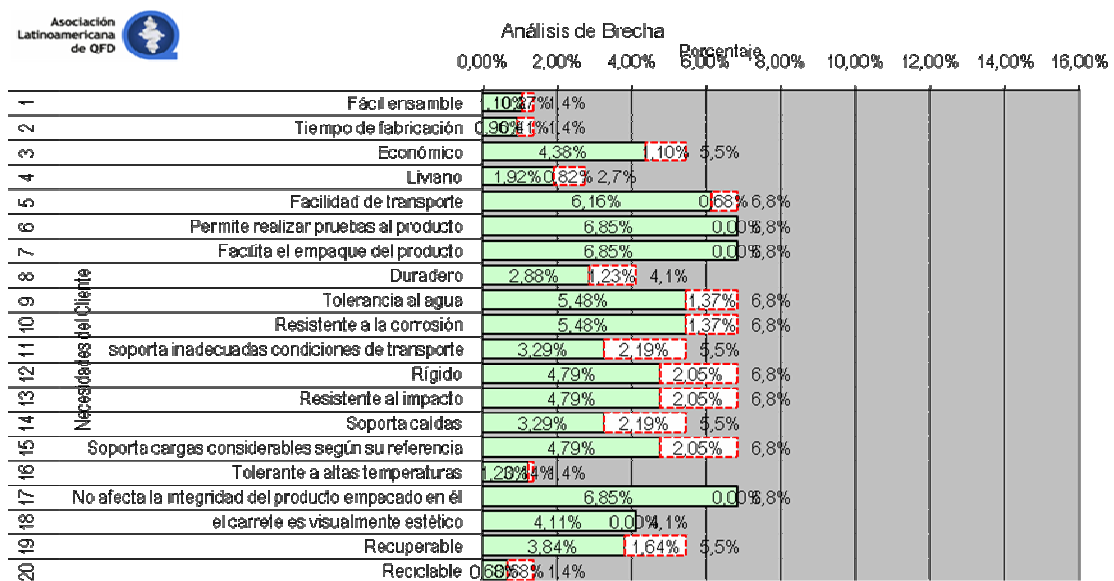
De acuerdo a la evaluación ponderada que se observa en la tabla 2, se puede deducir que las necesidades que se deben trabajar más al de diseñar o rediseñar un carrete No 24 compuesto por materiales madera-metal, son:

- El carrete soporta inadecuadas condiciones de transporte.
- El carrete es rígido.
- El carrete es resistente al impacto.
- El carrete soporta caídas.
- El carrete soporta cargas considerables según su referencia.

De igual forma si se logra aumentar el nivel en cada una de estas necesidades prioritarias se podría aumentar la satisfacción de la necesidad en un total de 10,53%.

En la figura 4 se puede observar los resultados con mayor claridad, esta figura permite identificar la necesidad más importante tanto para el cliente como para el proveedor del carrete.

Figura 4. Puntos a ganar por cada una de las necesidades del cliente.

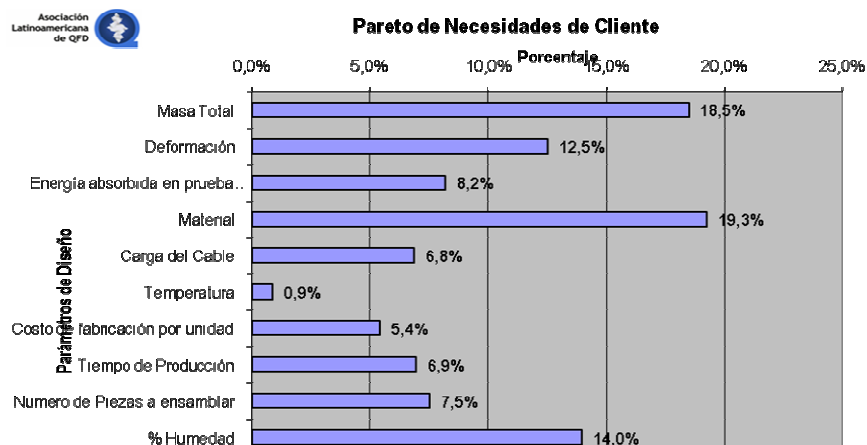


Con el fin de mejorar las necesidades del cliente con mayor peso en cuanto a importancia, se debe identificar en la matriz de relaciones cuales de los parámetros de diseño tienen relación directa con estas necesidades, esto con el fin de dar una mejora a dichos parámetros. En este caso los parámetros de diseño que se relacionan fuertemente con las necesidades de mayor peso son:

- Deformación.
- Energía absorbida por el material en prueba de impacto.
- Masa total.
- Material.
- Número de piezas a ensamblar.

Estos parámetros de diseño se pueden evaluar con facilidad en las especificaciones de diseño, las cuales obtienen que las mejores opciones para maximizar el requerimiento de la necesidad se logra incrementando la energía absorbida por el material en prueba de impacto y disminuyendo las deformaciones, la masa total y el número de piezas a ensamblar.

Figura 5. Importancia de los parámetros de diseño con respecto a las necesidades del cliente.



En la figura 5 es fácil identificar que el parámetro mas importante en cuanto a la relación que posee con las necesidades del cliente, es el material; debido a que dentro del objetivo de esta tesis no se encuentra la sustitución del material, se tendrá en cuenta los parámetros de diseño que siguen en orden de importancia, para trabajarlos como puntos fuertes y así darle mayor calidad al producto, los parámetros que se tendrán en cuenta para el diseño o rediseño del carrete No24 son, masa total y deformación del carrete.

Para lograr optimizar estos importantes parámetros se realizará el estudio por medio de elementos finitos en el software ALGOR del carrete mixto No 24, el cual da una facilidad y claridad para hacer simulación del objeto sometido a cargas y restricciones específicas y así poder dar una propuesta clara de diseño o en su defecto rediseño.

3. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CARRETE MIXTO METAL-MADERA No 24

El proceso de fabricación para un carrete mixto con estructura metálica y paredes de madera, se realiza básicamente en tres secciones, que comprenden la fabricación de la estructura metálica, las piezas de madera que se utilizan en este carrete como las duelas y las paredes de la corona circular, y el proceso de ensamble de estas dos partes para obtener finalmente el carrete.

3.1 ESTRUCTURA METALICA

La estructura metálica está hecha en material acero estructural ASTM A36, en su totalidad; En su proceso de fabricación intervienen máquinas como: la cizalla universal, en la cual se puede realizar corte y troquelado, la cilindadora y un equipo de soldadura SMAW.

A partir de un perfil en L de 3/16 x 2 ½ in como el que se puede observar en la figura 6 a) se cortan 8 radios a un longitud de 45,670in (116cm) cada uno; Este procedimiento se lleva a cabo en la cizalla universal mencionada anteriormente.

En cada uno de los extremos de los radios se hace una curvatura igual a la curvatura del radio exterior del buje, como se muestra en la figura 6 b), esto con el fin de lograr una buena coincidencia entre estas dos piezas en el momento del ensamble, este paso se lleva a acabo en un proceso de troquelado.

El siguiente paso se realiza en la cizalla universal, este consiste en despuntar el perfil a un ángulo de 45° en el extremo que se hace coincidir con el buje, como se muestra en la figura 6 b), de tal forma que no hallan superposiciones de los radios en el momento del ensamble. En cada uno de los radios se realiza una perforación de un agujero de 5/8 in (1,58cm) para situar el espárrago, este agujero se realiza a una distancia de 25.830in (65,61cm) del extremo en el cual se ubica el buje, como se muestra en la figura 7, este procedimiento se realiza en la troqueladora de la máquina cizalla universal.

En el extremo que se sitúa la banda de rodamiento es necesario realizar un corte en L en forma del perfil de la banda, como se puede observar en la figura 7, con el fin de lograr una buena coincidencia entre piezas que permitan el ensamble de los radios y este aro exterior. Este procedimiento se hace en la troqueladora de la maquina cizalla universal.

Figura 6. a) Perfil L. b) Curvatura y despunte a 45° de coincidencia.

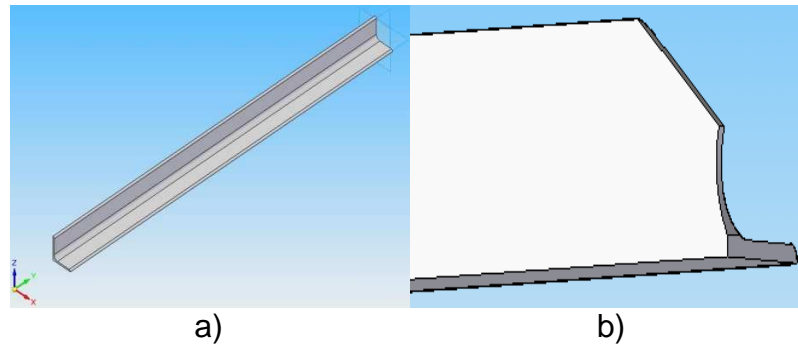
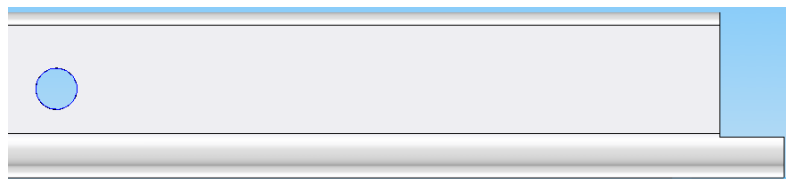
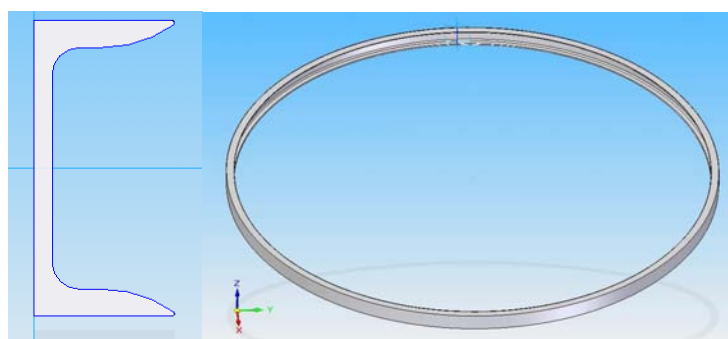


Figura 7. Corte para coincidencia con banda de rodamiento y agujero para esparrago.



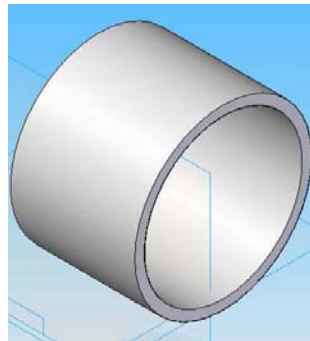
El perfil en U de 3 x 3/16in se cilindra a un radio de 47,240in (120cm) para formar la banda de rodamiento, este proceso se hace en una cilindradora.

Figura 8. Banda de rodamiento.



El buje del carrete se hace a partir de una platina de 1/8 x 1 ½ in en la cilindradora a un radio de 3.563in (9.05cm) y se realiza la unión por medio de soldadura SMAW con un electrodo 6011 de 1/8in de diámetro, a 175A.

Figura 9. Buje



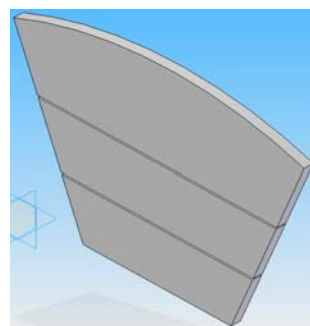
3.2 PIEZAS DE MADERA

Todas las piezas de madera son fabricadas en sajo; los equipos utilizados en este proceso son: la cepilladora, la cierra radial, la cierra sin fin y la canteadora.

La madera para fabricar las paredes de la corona circular se obtiene de placas de 4 x 8in con un espesor inicial de 1,220in (3,10cm), al someterla al proceso de cepillado por ambas caras este espesor se reduce a 1,063in (2,70cm).

En la cierra radial se hacen los cascos que conforman cada sección de la corona circular (3 cascos por sección).

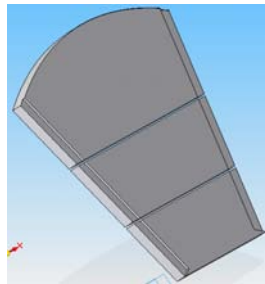
Figura 10. Cascos de madera.



En la cierra sin fin se realizan las curvas de los cascos que llevan la sección circular correspondiente a la banda de rodamiento como se puede observar en la figura 10.

Los cascos llevan un ruteado para que los radios y las platinas que lo sujetan tengan un mejor ajuste, este ruteado se realiza con la canteadora, en la figura 11 se puede detallar.

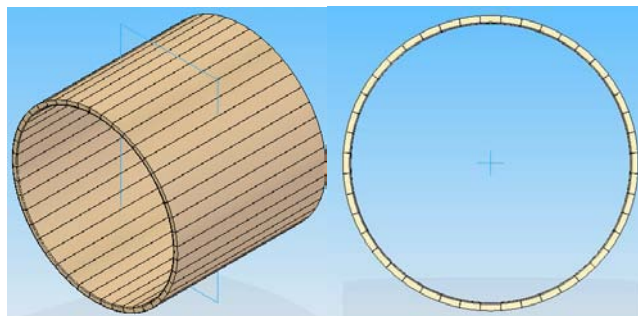
Figura 11. Ruteado de los cascos de la corona circular.



Las duelas (componentes del tambor) de 3,940 x 47,240in (10 x 120cm) se obtienen a partir de placas de 4 x 8in y un espesor de 1,340in (3,40cm), a estas se les realiza un corte en ángulo para lograr la fácil conformación del tambor y que las duelas no tallen ni dañen el producto empacado en el carrete.

Una vez se obtienen las medidas especificadas para cada casco y duela se procede a inmunizar el material (madera), esto con el fin de evitar plagas que afecten la calidad del producto; esta inmunización se logra sumergiendo los cascos y duelas en agua con inmunizantes de 12 a 24 horas, luego se dejan secar a temperatura ambiente.

Figura 12. Duela de Tambor.



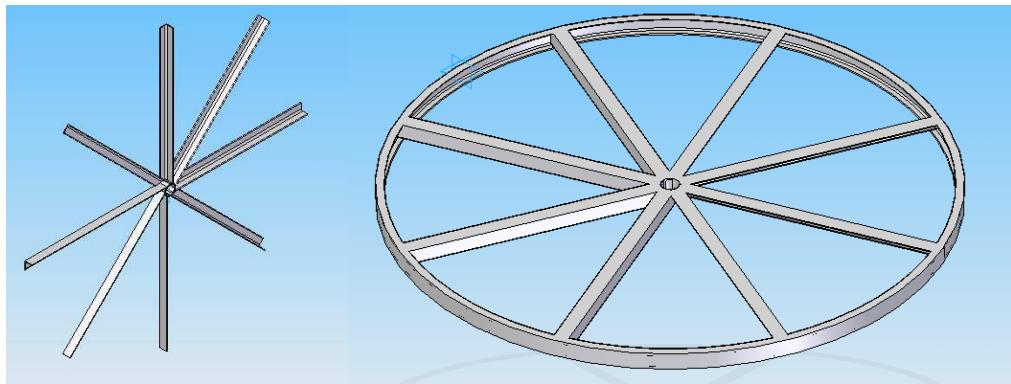
3.3 ENSAMBLE DEL CARRETE

Todos los procesos de unión por soldadura, se trabajan con SMAW electrodo 6011 diámetro de 1/8 in a 175A; también se utilizan la prensa y la máquina de armado de los carretes.

Los ocho radios se unen al buje por el proceso de soldadura, quedando listo para el ensamble de la banda de rodamiento

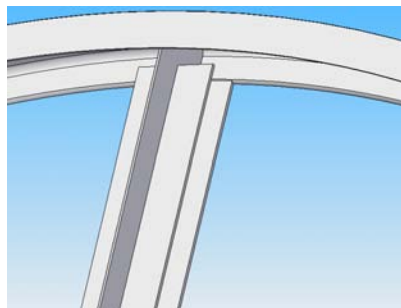
La estructura del buje y radios se une a la banda de rodamiento por el proceso de soldadura entre los extremos de los radios y el perfil en U.

Figura 13. Ensamble de buje, radios y banda de rodamiento.



La siguiente unión que se realiza es la de las platinas laterales interiores a los radios, para la sujeción de los cascos de madera en cada sección.

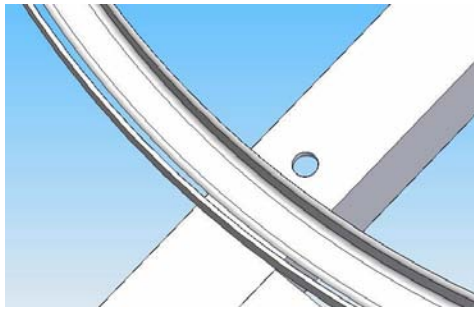
Figura 14. Platinas interiores y exteriores.



Se suelda el aro de la duela, un perfil en L de 0,118in (0.30cm) de espesor x 1,181in (3cm) en el ala, a los radios, a 27,560in (70cm) desde el centro del buje; Este aro tiene como fin soportar las duelas del tambor del carrete.

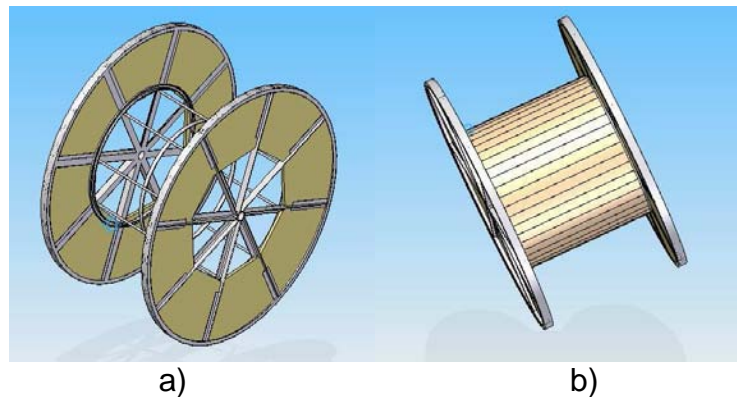
Se suelda la platina superior de la duela, la cual permite la correcta ubicación y sujeción de estas en el tambor. Esta platina es de 0,118in x 0,591in (0.30 x 1.50cm) y se ubica de acuerdo al espesor de las duelas.

Figura 15. Perfil en L y platina superior para sujeción de la duela.



Se ubican los cascos de madera, formando la corona circular que tiene 3 elementos por cada una de sus ocho secciones, luego se aplica presión a cada sección de la corona circular y se sujetan con las platinas exteriores soldadas a los radios; en la máquina de armado se ubican las dos tapas sujetándolas por el buje, ofreciendo mayor libertad y facilidad de manejo al operario, para así ubicar los espárragos de tal forma que permitan orientar las duelas, y una vez este armado el tambor se sujetan los espárragos para asegurar el ensamble.

Figura 16. a) Estructura metálica con cascos de madera ensamblados. b) Carrete totalmente ensamblado.



4. PRUEBAS MECANICAS

Se realizo una serie de ensayos mecánicos con el fin de conocer un poco mas las propiedades mecánicas que caracterizan a los materiales que componen el carrete mixto (metal – madera) desde el punto de vista de su respuesta a la deformación plástica, endurecimiento y tipo de fractura; mediante los diversos procedimientos de ensayos se trata de tener una idea mas completas sobre las propiedades de un material para decidir de ahí anticipadamente su comportamiento cuando esté sometido a las cargas de funcionamiento y a las influencias exteriores. Los ensayos realizados al material acero estructural ASTM A 36 se realizaron bajo la inspección de las siguientes normas de la International standards worldwide (ASTM):

- E 8/E 8m – 08. Métodos de prueba para ensayos de tensión de materiales metálicos.

- E 23 – 07. Métodos de prueba para los ensayos de impacto de barra de materiales metálicos.

- E 18 – 08. Métodos de prueba para ensayo de dureza de Rockwell de materiales metálicos.

Los ensayos realizados al material madera se realizaron bajo la inspección de las siguientes normas del ICONTEC:

- NTC 206-1 Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos.

- NTC 206-2 Medición directa del contenido de humedad en la madera y materiales a base de madera.

- NTC 301. Maderas. Requisitos de las probetas pequeñas para los ensayos físicos y mecánicos de la madera.

- NTC 633. Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión.
- NTC 784. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano.
- NTC 785. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano.
- NTC 787. Maderas. Toma de muestras para ensayos físicos y mecánicos.
- NTC 944. Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano.
- NTC 961. Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano.
- NTC 2912. Maderas. Tableros de fibra. Determinación de la resistencia a la flexión.
- NTC 3377. Maderas. Ensayos con probetas pequeñas.

Las pruebas mecánicas de los materiales de los cuales esta construido el carrete No 24, en este caso madera y metal, se realizaron con el fin de conocer las propiedades mecánicas reales de estos materiales y así poder hacer un análisis por elementos finitos en el software ALGOR mucho mas preciso, logrando una caracterización del carrete mas cercano a los términos reales.

4.1 PRUEBAS MECANICAS DEL ACERO

Para la realización de las pruebas mecánicas del acero se tomo como base el material que se emplea actualmente para la fabricación de los carretes mixtos, en condición de suministro, con el fin de determinar con precisión las propiedades mecánicas con las que se esta trabajando realmente.

El acero ASTM A-36 (NTC 1920) de la empresa ACASA, empleado actualmente en la construcción de la estructura del carrete, es un acero estructural al carbono,

con aplicación en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres para comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización.

Según ACASA este acero tiene una composición química estándar como se muestra a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Composición química del acero ASTM A-36

Elemento	Cantidad porcentual
Carbono (C)	0,26 max
Manganeso (Mn)	1.2 max
Fósforo (P)	0,04 max
Azufre (S)	0,05 max
Silicio(Si)	0,4 max
Cobre (Cu)	0,2 min

Fuente: Acero ASTM A-36 (NTC 1920) [en línea]: Ficha técnica. Manizales: ACASA S.A, 2008. [Consultado 04 de Mayo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.acasa.com.co/productos/index.htm>

Los valores de las propiedades mecánicas de este acero propuestas por ACASA se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del acero ASTM A-36.

Propiedad mecánica	Valor
Esfuerzo máximo de tensión	400 - 500 Mpa
Esfuerzo de fluencia	250 Mpa min.
Elongación (ductilidad)	21%
Dureza Rockwell B	68 HRB

Al revisar el certificado de calidad de ACASA para cada una de las coladas del acero ASTM A-36, se puede notar que se presentan variaciones en la composición química del material entre una colada y otra, lo cual influye en las propiedades mecánicas del mismo, dependiendo de la alteración de la proporción de cada uno de los elementos presentes.

Este aspecto constituye un factor de error al comparar los datos obtenidos experimentalmente con los datos teóricos, ya que el valor diferencial entre estos no depende únicamente de las condiciones del ensayo, sino que también se debe considerar la alteración de las propiedades mecánicas del material de esa colada debido a los cambios de su composición química.

En la tabla 5 se presenta la composición química del acero ASTM A-36 de 5 coladas diferentes.

Tabla 5. Composición química del acero ASTM A-36, para 5 coladas diferentes.

Elemento	% Colada M2212	% Colada 37657	% Colada 37603	% Colada 36961	% Colada S11494	% Colada S11470
Carbono (C)	0,15	0,16	0,18	0,26	0,13	0,13
Manganeso (Mn)	0,54	0,39	0,53	0,57	0,67	0,64
Silicio(Si)	0,18	0,14	0,15	0,24	0,2	0,15
Azufre (S)	0,041	0,028	0,031	0,017	0,029	0,029
Fósforo (P)	0,019	0,012	0,016	0,009	0,015	0,01
Cobre (Cu)	0,25	0,17	0,26	0,18	0,24	0,34

Si se comparan estos valores obtenidos experimentalmente, para cada colada, con los datos teóricos recomendados para el material se pueden apreciar variaciones considerables con errores de hasta un 66% y a partir de un 20%, como se muestra en la tabla 6. Estas diferencias tan grandes tienen influencias importantes en las propiedades mecánicas del material, como se mencionó anteriormente, ya que cada elemento afecta de manera directa la calidad y el comportamiento del material, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 6. Análisis de la composición química del acero ASTM A-36, obtenida experimentalmente.

Elemento	Media	% Error
Carbono (C)	0,168	35,256
Manganeso (Mn)	0,557	53,611
Silicio(Si)	0,177	55,833
Azufre (S)	0,029	41,667
Fósforo (P)	0,014	66,250
Cobre (Cu)	0,240	20,000

El cálculo del porcentaje de error se obtuvo implementando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Error} = \frac{Val_{teorico} - Val_{experimental}}{Val_{teorico}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

Tabla 7. Efectos de los elementos químicos en las propiedades del material.

Elemento	Efecto en el material
Manganeso (Mn)	Facilita las operaciones de trabajo en caliente como laminación, moldeo, entre otras, aumenta la penetración del temple y contribuye a la resistencia y dureza.
Silicio (Si)	Se emplea como desoxidante y aumenta la dureza en los aceros de aleación.
Azufre (S)	En grandes cantidades, entre 0.06 y 0.30% aumenta la de los aceros de aleación y al carbono.
Fósforo (P)	Se considera un elemento perjudicial en los aceros, casi una impureza, ya que reduce la ductilidad y la resistencia al impacto.
Cobre (Cu)	Mejora la resistencia a la corrosión

➤ **Ensayo de tracción.** Las pruebas de tracción proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad de materiales sometidos a esfuerzos de tensión uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de materiales, el desarrollo de aleaciones, el control de calidad, y como en este caso diseñar o rediseñar.

Para la realización de este ensayo se empleo una probeta estándar tipo hoja, la cual usualmente es utilizada para ensayos de materiales metálicos en forma de hoja, placa, alambre plano, banda, aro y rectángulos, que tengan un espesor nominal de 0,13 mm a 19 mm; el material que se ensayo en esta tesis tiene un espesor de 4,8mm. La forma y las dimensiones de este tipo de probeta se muestran en el anexo 2.

◆ **Objetivo.** Este ensayo se realiza con el fin de determinar las propiedades tensiles del acero estructural ASTM A36, obtenido de la acería ACASA, en probetas de ensayo con forma de mancuerna estándar, en estado de suministro.

◆ **Método de preparación de probetas.** según la norma ASTM E8/E8M (NTC 453799)¹, Las probetas se prepararon con operaciones de maquinado y corte en una fresadora universal Nantong, con una herramienta de corte tipo fresa de ranura de corte en zigzag de 25mm de diámetro, a partir de un perfil en L de alas iguales de 2 in y espesor de 0,188 in, como el que se muestra en la figura 17, esto se realizó

Figura 17. Perfil en L de alas iguales.



Del perfil en L se obtuvo placas de aproximadamente de 22mm de ancho y 200 mm de largo como el que se muestra en la figura 18, esto con el fin de realizar un maquinado mas rápido, sin necesidad de hacer mucho corte en la pieza.

Figura 18. Sección rectangular obtenida a partir del perfil.



¹ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2008. p. 3. ASTM E8/E8M

Figura 19. Operación de maquinado en la Fresadora Universal Nantong.



Una vez se tiene la sección rectangular con las medidas exactas de la probeta, se procede a realizar el radio el cual se hace con el fin de reducir concentradores de esfuerzo en el cambio de sección de la probeta, este procedimiento se realiza maquinando el cambio de sección dejando una especie de ranura en los dos lados de la sección rectangular, como se puede observar en la figura 20, una vez hecho este cambio de sección se procede a realizar los radios de la probeta (figura 21).

Figura 20. Probeta de tensión sin radios.



Figura 21. Probeta de tensión terminada.

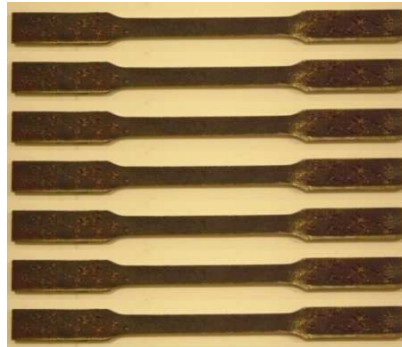


◆ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.

◆ **Condiciones atmosféricas en el lugar de ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

- ◆ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 7 probetas (figura 22).
- ◆ **Velocidad de ensayo.** La velocidad de ensayo implementada fue de 11 N/mm²s.

Figura 22. Lote de probetas de ensayo.



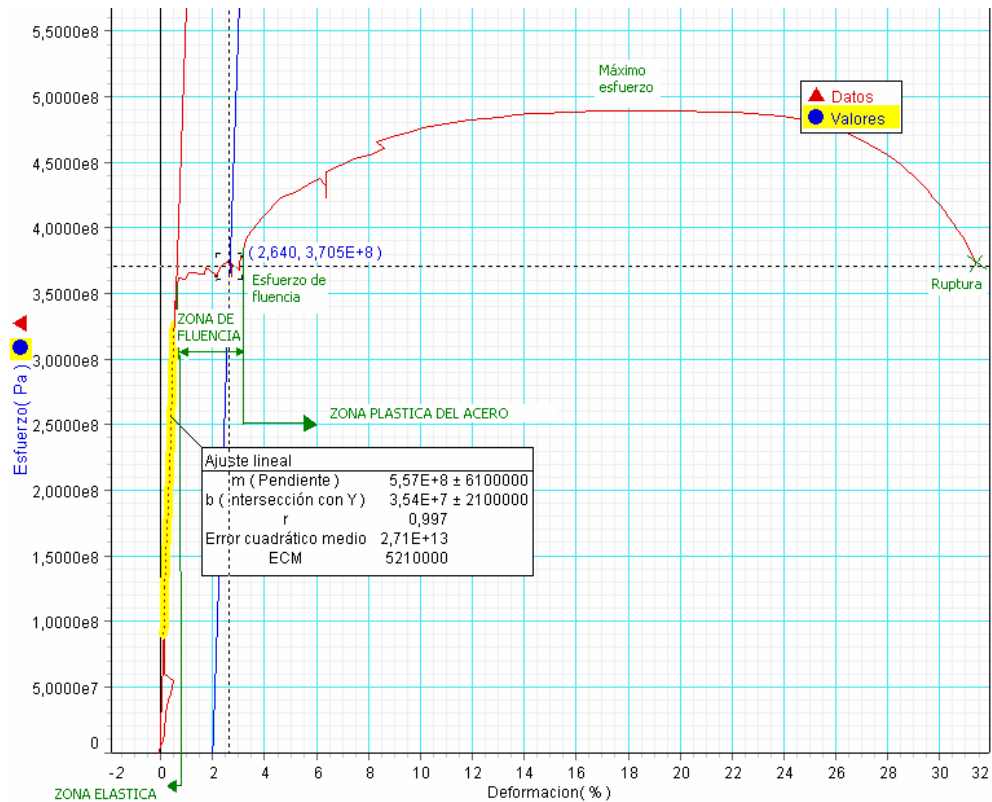
- ◆ **Clasificación de la maquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. (Figura 23).

Figura 23. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



- ◆ **Descripción de la curva Esfuerzo Vs. Deformación.** En la figura de Esfuerzo VS Deformación arrojada por la prueba se pueden apreciar las diferentes zonas que se presentan normalmente en esta curva y los valores más representativos como se muestra a continuación en la figura 24.

Figura 24. Descripción de la curva Esfuerzo vs. Deformación.



- **Zona elástica.** En esta zona de la curva al aplicar la fuerza se genera una deformación en la probeta que corresponde al estiramiento de los enlaces entre los átomos, al retirar esta fuerza la probeta recupera su tamaño inicial ya que los enlaces regresan a su longitud inicial, por lo cual este fragmento de la curva se caracteriza por presentar una deformación no permanente. En este caso se presenta hasta un valor del 0.95% de la deformación, lo cual equivale a un 0,0096 en la deformación unitaria.
- **Punto de elongación de fluencia.** El punto de elongación de fluencia es aquel que en el diagrama de esfuerzo-deformación, separa el fin de la deformación elástica y comienza la deformación plástica, para encontrar este punto se requiere tomar los datos del diagrama y determinar la diferencia que existe entre el esfuerzo superior de fluencia y el comienzo de la zona plástica del material.
- **Zona plástica.** Al incrementar el valor de la fuerza aplicada se presentan dislocaciones, deslizamiento y el material empieza a deformarse plásticamente,

pasando de la zona elástica a la plástica, en la cual la deformación ocasionada por el deslizamiento es permanente. En este caso se presenta a partir del 2.6% de la deformación, lo cual equivale a un 0.02568

- **Esfuerzo de fluencia.** Determina el límite entre la zona elástica y la zona plástica. Es a partir de este esfuerzo que el deslizamiento toma valores considerables, por lo cual este esfuerzo es un parámetro fundamental en el diseño de componentes ya que siempre se debe garantizar que durante el uso de estos no ocurra una deformación plástica, lo cual se logra trabajando con valores de esfuerzo por debajo de este valor. En este caso el valor de este esfuerzo es de $3,7E+8$ Pa.
- **Esfuerzo máximo.** También conocido como la resistencia a la tensión, es el esfuerzo generado por la mayor fuerza aplicada a la probeta, y es el máximo valor que soporta el material antes de la ruptura. En este caso corresponde a un valor de $4,897E+8$ Pa.

Este valor se encuentra dividiendo la máxima fuerza soportada por la probeta por el área de sección transversal original de esta.

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{Max}}{A}$$

Ecuación 2.

Donde:

σ_{ult} = Esfuerzo máximo.

F_{Max} = Fuerza máxima soportada por la probeta.

A = Área transversal de la probeta. (60mm^2).

- **Ruptura.** Se presenta cuando la probeta falla completamente, después de alcanzar el esfuerzo máximo.

Figura 25. Probeta fracturada.



▪ **Modulo de elasticidad.** Es la pendiente de la curva de esfuerzo Vs. Deformación en la zona elástica que cumple con la ley de Hooke; este modulo está relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material, cuando se requieren altos valores de fuerza para separar los átomos y producir la deformación elástica, se tiene un modulo de elasticidad o modulo de Young muy alto.

◆ **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Este valor se calculo utilizando el método offset al 2% de la deformación, según lo recomienda la norma ASTM E 8/ E8 M-08 en la nota 21, implementando el software data Studio para la realización de las figuras necesarias, a partir de los datos arrojados por la máquina de ensayos UTS 200.3 correspondientes a cada prueba.

Para la implementación de este método fue necesario trazar una línea paralela a la figura en la región elástica correspondiente a la ley de Hooke, que corte el eje x en el 2% de la deformación de la probeta estudiada; De esta forma el valor correspondiente al esfuerzo de fluencia, se encuentra en la intersección de la línea paralela y la figura Esfuerzo Vs. Deformación porcentual, que describe el comportamiento del material, para cada uno de los ensayos realizados.

La ecuación correspondiente a la zona elástica de la figura de Esfuerzo Vs. Deformación porcentual en la que se cumple la ley de Hooke es:

$$y = mx + b$$

Ecuación 3.

Donde:

m = pendiente.

b = Corte con el eje y.

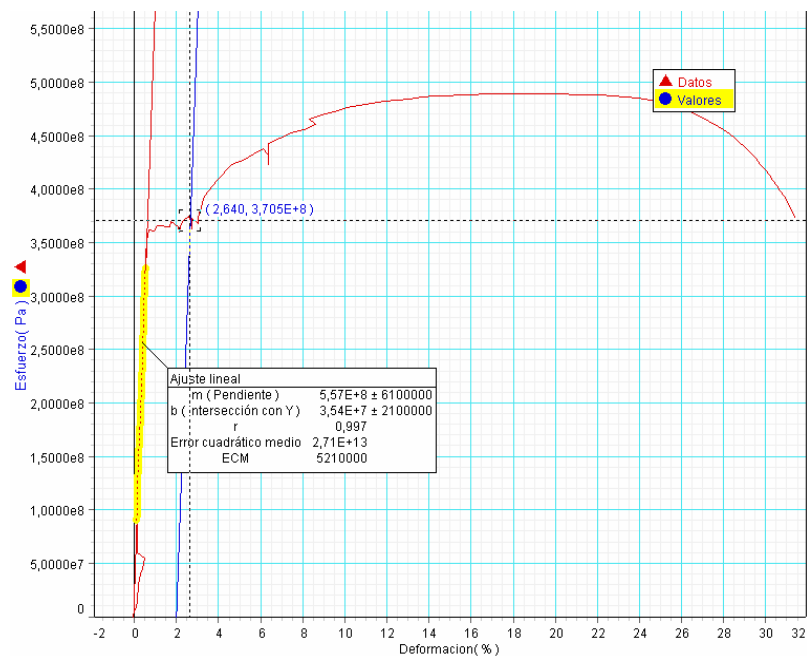
x = Valores de deformación.

y = Valores de esfuerzo.

De modo que para obtener una línea paralela a esta, basta con conservar la pendiente y cambiar el punto de corte al valor deseado; En este caso, se requería hallar el punto de corte correspondiente a una intersección con el eje x en 2%.

Este valor es posible encontrarlo al reemplazar en la función los valores conocidos de la pendiente (el mismo que el de la figura original), el valor de $x=2$ y el valor de $Y=0$.

Figura 26. Figura del Esfuerzo vs. Deformación porcentual de la probeta No. 7



En el cálculo de los datos se estima la desviación estándar entre los resultados de cada prueba, utilizando la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)}{(n-1)}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

s = Desviación estándar

x = Valor de una sola observación

n = Cantidad de observaciones

\bar{x} = Media aritmética del conjunto de observaciones.

Los resultados obtenidos del ensayo de tracción, que definen el esfuerzo de fluencia del material se presentan en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados del esfuerzo de fluencia.

Probeta	Sy (Pa) E+8	Deformación (%)
1	3,670	2,151
2	3,619	2,370
3	3,788	2,380
4	3,577	2,700
5	3,723	2,370
6	3,766	2,219
7	3,705	2,640

Tabla 9. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo de fluencia.

Esfuerzo de fluencia		Deformación	
Media (Pa)	Desviación estándar	Media (%)	Desviación estándar
3,692E+08	7,622E+06	2,400	0,200

Para verificar los resultados de la prueba se realizó una comparación con los datos teóricos para este material; los cuales son sugeridos por ACASA. Se recomienda que el valor del esfuerzo de fluencia mínimo debe ser de $2,5E+8$ Pa; y en este caso el valor promedio es de $3,692E+8$ Pa, lo cual se encuentra dentro del rango adecuado según el fabricante; sin embargo este valor es mucho mayor que el dato teórico, lo cual permite que el material sea más resistente, ya que su S_y es mayor, y por consecuencia su zona de trabajo también.

Esfuerzo máximo obtenido en la prueba. La resistencia a la tracción o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 2, especificada en la descripción de la curva esfuerzo vs deformación.

Los resultados obtenidos para el valor del esfuerzo máximo del material se presentan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados del esfuerzo máximo.

Probeta	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (Pa)	Deformación unitaria (adim)
1	28590,24	4,765E+08	0,170
2	29088,44	4,848E+08	0,170
3	29683,89	4,947E+08	0,170
4	29124,87	4,854E+08	0,180
5	29602,85	4,934E+08	0,160
6	29438,87	4,906E+08	0,170
7	29412,50	4,902E+08	0,170

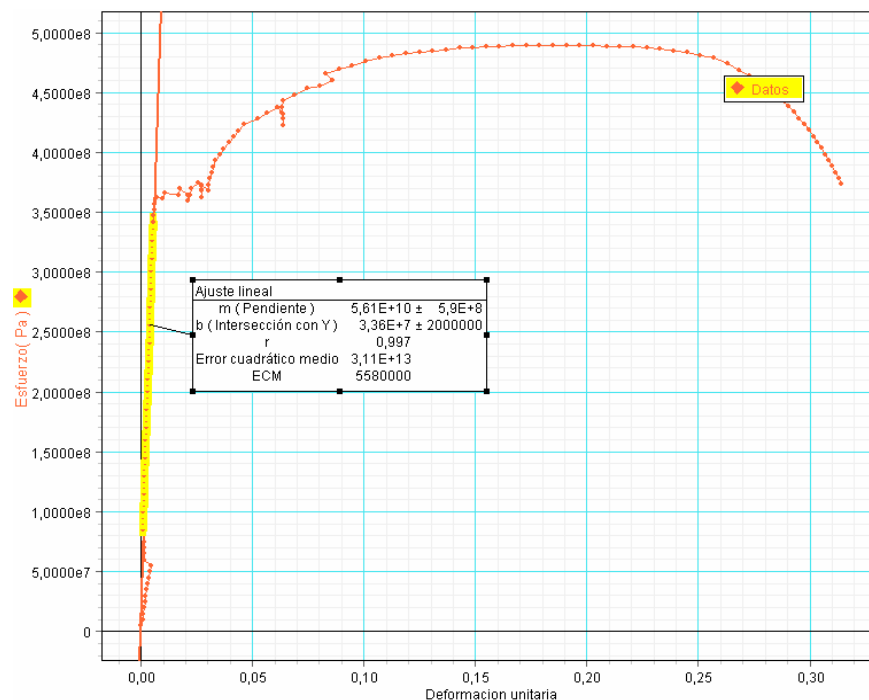
Tabla 11. Análisis estadístico de los resultados del esfuerzo máximo.

Esfuerzo máximo		Deformación unitaria	
Media (Pa)	Desviación estándar	Media (adim)	Desviación estándar
4,880E+08	6,26E+06	0,170	0,006

Comparando estos valores de esfuerzo máximo con los datos teóricos se puede determinar que se encuentran dentro del rango adecuado para este material, el cual esta entre 400 y 550 Mpa, y en este caso se tiene un valor promedio de 488 MPa.

◆ **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.**

Figura 27. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria.



De la figura 27 se puede obtener un dato muy importante en los aceros, el modulo de elasticidad E, el cual corresponde al valor de la pendiente de la recta de la zona

elástica que cumple con la ley de Hooke, en la cual la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria es proporcional. En este caso el modulo de elasticidad presenta un valor de $5,61E+10$ Pa.

Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados del modulo de elasticidad.

Probeta	Modulo de elasticidad (Pa)
1	2,12E+11
2	2,53E+11
3	2,11E+11
4	2,17E+11
5	2,53E+11
6	2,04E+11
7	1,80E+11

Tabla 13. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.

Modulo de elasticidad		
Media (Pa)	Desviación estándar	% Error
2,19E+11	2,64E+10	6,10263523

Al comparar estos valores del modulo de elasticidad con los valores teóricos recomendados para los aceros, se puede determinar que son valores muy cercanos, ya que el teórico es de 206 MPa, y el experimental es de 219 MPa presentando un error del 6%, el cual se puede considerar aceptable para este tipo de pruebas mecánicas si se consideran posibles fallas de error debidas al maquinado y defectos del material analizado.

◆ **Elongación y área transversal reducida obtenida en la prueba.** Cuando la elongación de la probeta es mayor al 3%, se debe juntar cuidadosamente los finales de la probeta fracturada y medir la distancia que existe entre marcas del extensómetro; para conocer el área reducida se emplea el mismo método que se emplea para el cálculo de la elongación, se juntan los extremos fracturados de la

probeta y se mide el grosor en la mínima sección; la diferencia entre al área encontrada y el área de sección transversal original es la reducción del área.

- **Elongación.** En la figura 28 se puede observar una probeta antes de la prueba y una probeta elongada por consecuencia de fuerzas suministradas en la prueba de tracción, a simple vista se puede ver que este material tiene muy buena ductilidad por su gran estiramiento.

Figura 28. Elongación de la probeta.



Los resultados obtenidos para el valor de la elongación del material se presentan a continuación en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la elongación.

Probeta	Elongación (mm)
1	15,532
2	14,916
3	15,300
4	14,906
5	14,634
6	14,985
7	15,704

Tabla 15. Análisis estadístico de los resultados de la elongación.

Elongación (mm)		
Media (mm)	Desviación estándar	% de elongación
15,14	0,383482228	30,279

La teoría de los aceros dice que estos tienen elongación de hasta un 20 %, por lo tanto podemos observar que el material estudiado tiene una gran ductilidad ya que su elongación alcanzó más de un 30% en el área de estudio de la probeta.

- **Reducción de área transversal.** El acero estructural ASTM A36 estudiado a mostrado en la prueba de tracción ser un material muy dúctil, igual mente si observamos el área de sección reducida, podemos comprobar esta hipótesis. En la figura 29 se puede observar el cuello formado en la prueba de tracción en una de las probetas estudiadas.

Figura 29. Cuello de la probeta.



- **Ensayo de dureza.** Se realizó el ensayo de dureza según la norma NTC 3996² para determinar la dureza Rockwell B que corresponde a este acero ASTM A-36, mediante el siguiente procedimiento:

Se preparó la probeta a través de las operaciones de corte y maquinado en la fresadora universal Nantong, posteriormente se lijo y pulió hasta obtener un acabado espejo y se realizaron 10 mediciones de dureza Rockwell B y Vickers utilizando el microdurómetro.

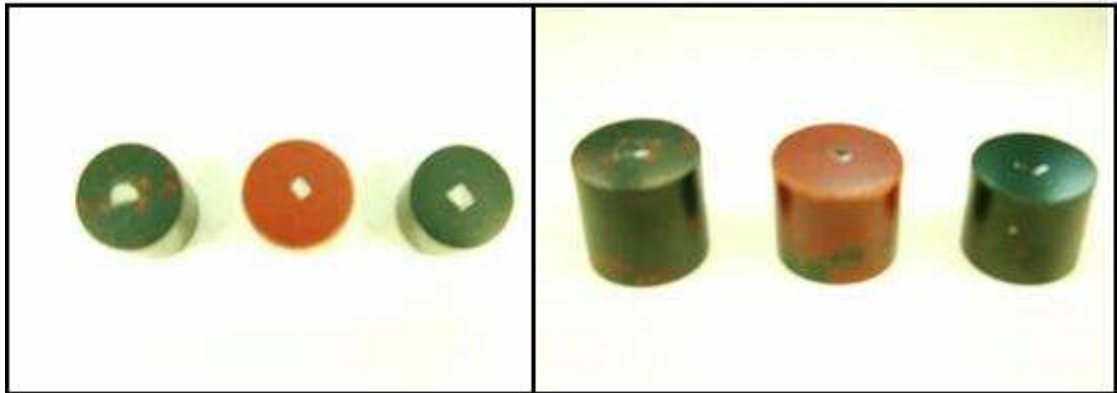
En las pruebas de microdureza se aplica una fuerza reducida, con un perforador de diamante, de tal forma que se obtenga la dureza en función de la profundidad a través de una sección de la muestra.

- ◆ **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la dureza del acero estructural ASTM A-36, obtenido de la acería de caldas ACASA, en una probeta de ensayo plana, en estado de suministro.

² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Materiales metálicos. Ensayo de dureza. Ensayo superficial Rockwell (Escala 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T). Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1996. p. 10. NTC 3996

◆ **Método de preparación de las probetas.** Las probetas para realizar pruebas de microdureza, se hacen cortando un pedazo del material a estudiar, luego se montan en baquelita, con el fin de lijar con mayor facilidad el segmento de material al cual se realizaran las mediciones, ya que es necesario tener un cara con un acabado tipo espejo y también facilitara las mediciones en el microdurómetro.

Figura 30. Probetas para ensayo de dureza.



◆ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento

◆ **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

◆ **Cantidad de muestras realizadas.** Se realizaron 10 mediciones de dureza Rockwell B y Vickers.

◆ **Carga aplicada.** Se aplico una carga de 300gr durante 30 segundos.

◆ **Clasificación de la máquina.** Microdurómetro Vickers Indentec modelo ZHV1.

Figura 31. Microdurómetro Vickers Indentec modelo ZHV1.



◆ **Resultados de dureza Rockwell B y Vickers.** Los resultados de dureza Rockwell B y Vickers obtenidos en la prueba se presentan a continuación en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de dureza Rockwell B y Vickers para acero ASTM A-36.

Medición	Dureza Rockwell B (HRB)	Dureza Vickers (HV)
1	98	240
2	96,4	229
3	No registra valor	248
4	No registra valor	275
5	No registra valor	261
6	95,7	225
7	99,5	217
8	95,6	224
9	No registra valor	245
10	99,8	219

Aplicando la ecuación 4 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a este valor y se presenta en la tabla 17.

Tabla 17. Análisis estadístico de los resultados de dureza.

Dureza Rockwell B		Dureza Vickers	
Media (HRB)	Desviación estándar	Media (HV)	Desviación estándar
97,500	1,876	238,300	19,143

Al comparar el valor de dureza obtenidos experimentalmente con el valor teórico para este material, se puede determinar que se encuentra dentro de un rango aceptable ya que la dureza Rockwell B debe ser de 68 HRB y se obtuvo un valor promedio de 97.5 HRB.

Si se realiza un cálculo del error porcentual aplicando la ecuación 1 y se obtiene un valor de 43%, lo cual se puede considerar recordando que la composición química del material tiene grandes variaciones con relación a los parámetros teóricos establecidos para este material.

➤ **Ensayo de impacto.** Se realizó el ensayo de impacto en la máquina de ensayos Charpy según la norma ASTM E23-07³ mediante el siguiente procedimiento:

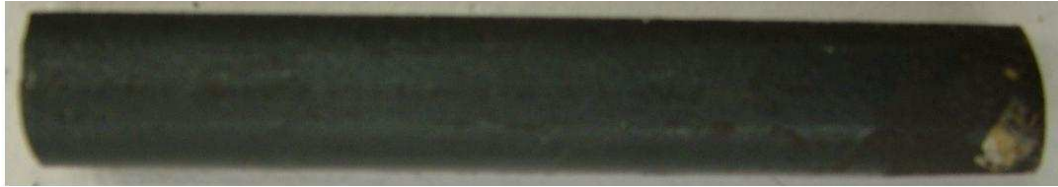
La probeta de análisis térmicamente acondicionada, se coloca en el apoyo de la máquina de impacto Charpy contra los apoyos; el péndulo es puesto en libertad sin vibraciones, y la muestra es impactada por este. La información se obtiene de la máquina y las partes fracturadas de la probeta.

◆ **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la resistencia a la ruptura del acero estructural ASTM A36, obtenido de la acería ACASA, en probetas de ensayo estándar con muesca en V, en estado de suministro.

◆ **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon con operaciones de maquinado y corte en una fresadora universal Nantong, con una herramienta de corte tipo fresa de cuatro filos, 12 mm, de acero rápido, a partir de un perfil circular de 15 mm de diámetro.

³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2007. p. 2. ASTM E23

Figura 32. Sección circular.

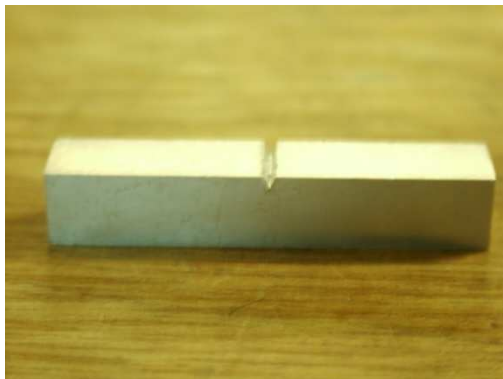


El perfil circular mostrado en la figura 32, se mecanizo hasta obtener un perfil cuadrado de medidas de 10 x 10 mm con la longitud original de la sección circular, luego se secciono en partes iguales de 55 mm, una vez fue seccionado el perfil cuadrado se procedió a realizar la ranura de 45° a cada una de las probetas, esto con el fin de obtener las medidas estándar de la probeta según la norma ASTM 23-07. Las características y medidas de la probeta se muestran en el anexo 3.

Figura 33. Sección rectangular obtenida de la sección circular.



Figura 34. Probeta de ensayo con muesca en V para prueba de impacto Charpy.



- ◆ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 50% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.
- ◆ **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%
- ◆ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 9 probetas.
- ◆ **Capacidad del péndulo.** El péndulo tiene una capacidad máxima de 294 J y 300°.
- ◆ **Clasificación de la máquina.** Máquina para ensayo de impacto tipo Charpy.

Figura 35. Máquina para prueba de impacto Charpy.



- ◆ **Tipo de falla.** De las nueve probetas seis presentaron fractura completa y tres no se fracturaron.
- ◆ **Resultados de la resistencia al impacto.** Al realizar la prueba la lectura de la máquina para cada ensayo arrojó los datos de la resistencia al impacto presentados en la tabla 18.

Tabla 18. Resultados de la resistencia al impacto.

Probeta	Resistencia al impacto (j)	Angulo de barrido (°)	Estado final
1	215,820	210	Probeta no fracturada
2	210,915	212	Probeta no fracturada
3	199,143	220	Probeta si fracturada
4	196,200	218	Probeta no fracturada
5	196,200	218	Probeta si fracturada
6	197,181	217	Probeta si fracturada
7	197,181	217	Probeta si fracturada
8	194,238	219,8	Probeta si fracturada
9	216,801	220	Probeta si fracturada

Aplicando la ecuación 4 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 19.

Tabla 19. Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto.

Resistencia al impacto		Angulo de barrido	
Media (j)	Desviación estándar	Media (°)	Desviación estándar
202,631	9,138	216,867	3,565

El valor obtenido en esta prueba para la resistencia al impacto del acero estructural ASTM A-36, es un valor que presenta una variación estándar muy pequeña por lo cual es posible afirmar que se obtuvo gran precisión en esta medición y que el ensayo de impacto arrojó valores adecuados para la muestra analizada haciendo mínimos los factores causantes de error.

En la práctica se pudo comprobar por el sonido de impacto y la zona de fractura en la probeta que se trata de un material dúctil, ya que se pueden apreciar una deformación muy marcada en la zona de falla lo que representa una característica típica de la fractura dúctil y contraria a una fractura frágil.

Figura 36. a) Probeta fracturada. b) Probeta no fracturada.



4.2 PRUEBAS MECANICAS A LA MADERA

Con el fin de realizar unas pruebas mecánicas significativas para el objetivo de este proyecto, se hicieron tomando como base el Sajo el cual es el material suministrado por la empresa Cobres de Colombia, el cual es actualmente el material empleado para la construcción de carretes mixtos, este material fue suministrado por la empresa en condiciones optimas para la fabricación del carrete.

➤ **Ensayo de tracción.** Cuando se habla de ensayo de tracción en la madera hay que tener en cuenta que este material es anisotrópico por lo tanto se debe probar en la dirección de sus fibras y perpendicular a ellas, debido a que la carga máxima aplicada podría variar dependiendo de la posición de las fibras de la madera. Por lo tanto en esta tesis se realizara pruebas de tracción en las dos direcciones.

◆ **Ensayo de tracción con fibras paralelas al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción de dirección paralela a las fibras de la madera hasta llegar al punto de falla de la probeta.

La probeta empleada para este ensayo tiene la forma y dimensiones indicadas en el anexo 4. Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo

de mordazas indicada en la norma NTC 944⁴, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo 5.

- **Objetivo.** Este ensayo se realiza con el fin de determinar las propiedades tensiles del Sajo en dirección paralela a las fibras del grano, suministrado por la empresa Cobres de Colombia Ltda. – División de empaques de madera.

- **Método de preparación de probetas.** Las probetas fueron hechas a partir de unas tablas de madera tipo Sajo, todas con el mismo acondicionamiento y con un área transversal de 30mm x 200mm y un largo de 600mm. De cada tabla se obtenían un promedio de 5 probetas, manteniendo unas buenas condiciones de la madera, como lo menciona la norma NTC 787, y las dimensiones especificadas en el anexo 4.

Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes maquinas:

Cepilladora de madera SCM F5L. Se usa para darle un acabado prolijo y recto en cada cara de las tablas de madera.

Sierra circular c/Carburo 7 1/4 x 24 para madera. Sirve para cortar los bloques de madera de 25mm x 25mm de las cuales se realizan las probetas.

Sierra caladora de banco Gamma 16". Utilizando una hoja P/Caladora OLSON #5 SIN PIN para darle, finalmente, la forma a las probetas.

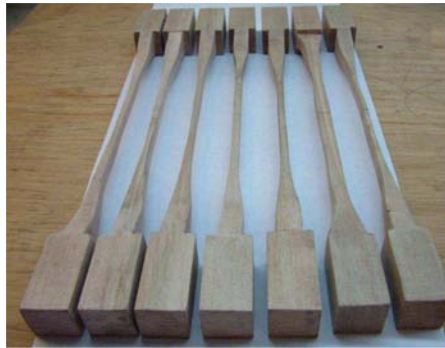
- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 16% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.

- **Condiciones atmosféricas en el lugar de ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1975. p. 3. NTC 944

- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 2 de ensayo de prueba (figura 37).
- **Velocidad de ensayo.** Las probetas se colocan y se mantienen durante el ensayo de tal forma que la mordaza se desplace a una velocidad de $1,00 \pm 0,25$ mm/min. Según la norma NTC 944.

Figura 37. Lote de probetas de ensayo.



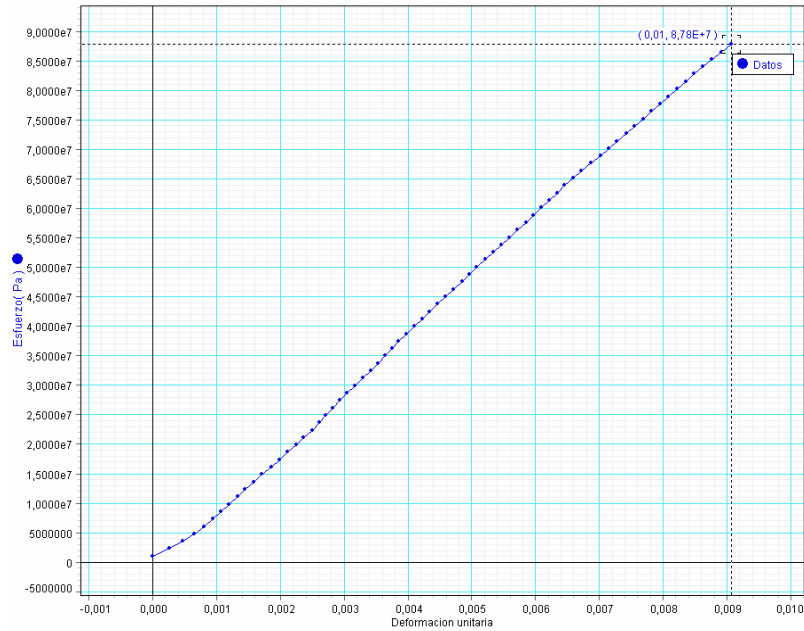
- **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. (Figura 38).

Figura 38. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, este no presenta fluencia, como se muestra en la figura 39, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura.

Figura 39. Esfuerzo Vs. Deformación. Material con comportamiento frágil.



- **Tensión en el punto de ruptura.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 2.

Los resultados obtenidos para el valor de tensión en el punto de ruptura del material se presentan a continuación en la tabla 20.

Tabla 20. Resultados de tensión en el punto de ruptura.

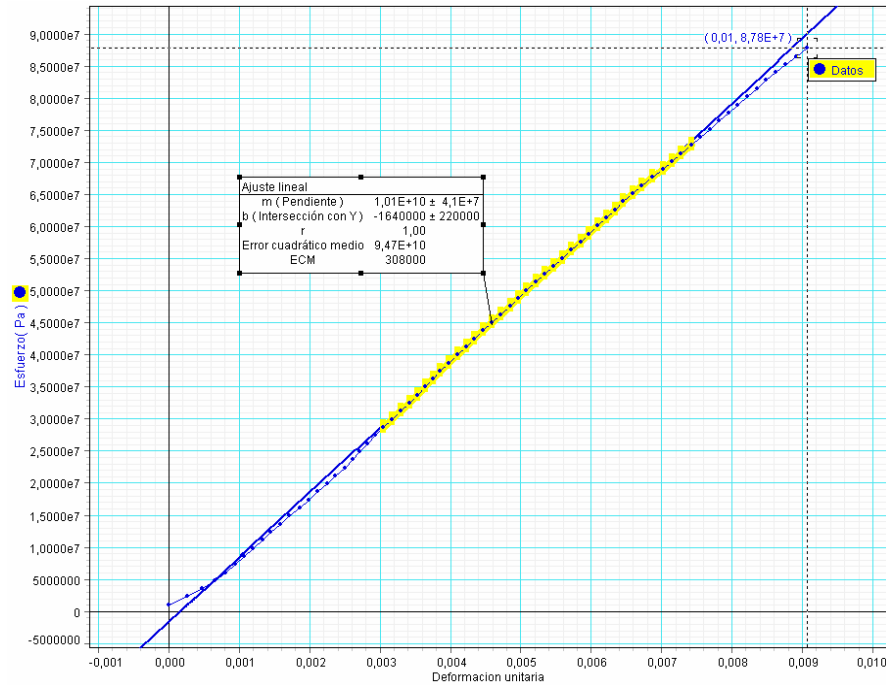
Probeta	Fuerza Máxima (N)	Tensión en el punto de ruptura (Pa)
1	4819,5	1,19E+08
2	3555,9	8,78E+07
3	5062,5	1,25E+08
4	4293	1,06E+08
5	5143,5	1,27E+08

Tabla 21. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura

Tensión en el punto de ruptura	
Media (Pa)	Desviación Estándar
1,13E+08	1,63E+07

- **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el modulo de elasticidad del Sajo el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs deformación unitaria, se utilizo el software DataStudio. En la figura 40 se puede observar la grafica esfuerzo vs deformación unitaria de la probeta 3, la cual presento un modulo de elasticidad de 10,1GPa.

Figura 40. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria. Modulo de elasticidad.



Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 22.

Tabla 22. Resultados del modulo de elasticidad.

Probeta	Modulo de elasticidad (Pa)
1	1,30E+10
2	1,01E+10
3	1,30E+10
4	1,25E+10
5	1,26E+10

Tabla 23. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.

Modulo de elasticidad (Pa)	
Media (Pa)	Desviación Estándar
1,22E+10	1,22E+09

- **Elongación en la prueba.** El cálculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la longitud inicial de referencia y la longitud final de referencia (Deformación %).

En la tabla 24 se muestra los valores de deformación porcentual de los ensayos realizados en esta prueba.

Tabla 24. Deformación porcentual.

Probeta	Deformación %
1	1,091
2	0,907
3	1,236
4	1,024
5	1,242

Tabla 25. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual.

Deformación %	
Media (%)	Desviación Estándar
1,100	0,143

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de pruebas de tracción realizadas a la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete Mixto No 24.

- ◆ **Ensayo de tracción con fibras perpendiculares al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción en dirección perpendicular a las fibras de la madera hasta llegar al punto de falla de la probeta.

La probeta empleada para este ensayo tiene la forma y dimensiones indicadas en el anexo 6. Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo de mordazas indicada en la norma NTC 961⁵, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo 7.

- **Objetivo.** Este ensayo se realiza con el fin de determinar las propiedades tensiles del Sajo en dirección perpendicular a las fibras del grano, suministrado por la empresa Cobres de Colombia Ltda. – División de empaques de madera.

- **Método de preparación de probetas.** Las probetas fueron hechas a partir de 2 bloques de madera tipo Sajo, con un mismo acondicionamiento y con un dimensiones trasversales de 30mm x 30mm y un largo de 500mm. De cada tabla se obtenían un promedio de 8 probetas pero manteniendo unas buenas condiciones de la madera se aprobaron 6 probetas para realizar el ensayo, como lo menciona la norma NTC 787, y las dimensiones especificadas en el anexo 6.

Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes maquinas:

Cepilladora o Regruesadora HURTADO 45. Se usa para darle un acabado prolijo y recto en cada cara de los bloques de madera hasta llegar a un espesor de 25mm.

Sierra Cinta o Sin Fin para madera SR 700. Sirve para cortar los bloques de madera en cubos de 25mm.

Fresadora – taladro vertical. Utilizando una broca para madera de 25 pulgadas de diámetro para darle a las probetas el arco correspondiente a su dimensionamiento final.

- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23°C y humedad relativa de 16% dur ante 72 h antes de realizar el procedimiento.

- **Condiciones atmosféricas en el lugar de ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1975. p. 3. NTC 961

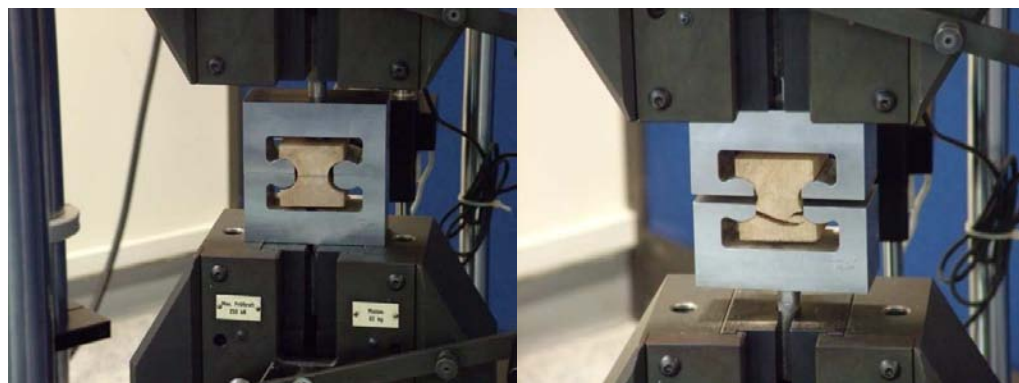
- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba.
- **Velocidad de ensayo.** Las probetas se colocan y se mantienen durante el ensayo en tal forma que la mordaza se desplace a una velocidad de $2,5 \text{ mm/min} \pm 0,6 \text{ mm/min}$, continuando el ensayo hasta que se produzca la rotura de la probeta. Según la norma NTC 944.

Figura 41. Probeta de ensayo.



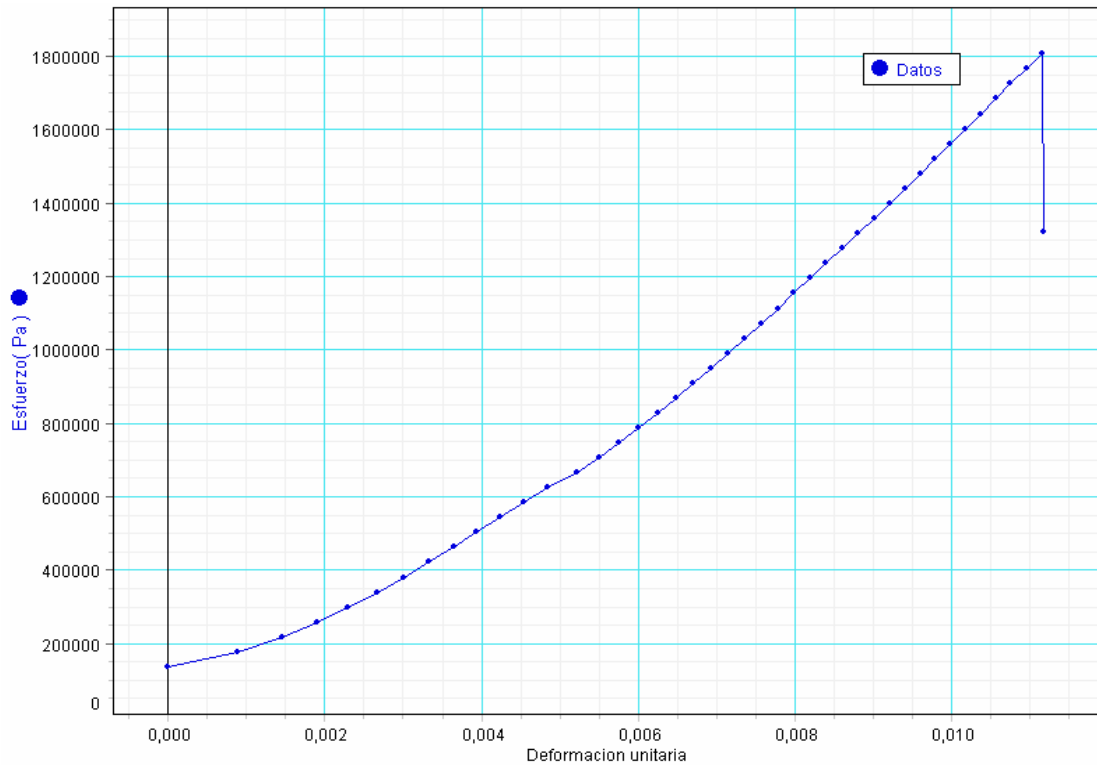
- **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. (Figura 42).

Figura 42. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, en el sentido perpendicular a las fibras de la madera tampoco presenta fluencia, como se muestra en la figura 43, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura.

Figura 43. Esfuerzo Vs. Deformación. Material con comportamiento frágil.



- **Tensión en el punto de ruptura.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 2. Los resultados obtenidos para el valor de tensión en el punto de ruptura del material se presentan a continuación en la tabla 26.

Tabla 26. Resultados de tensión en el punto de ruptura.

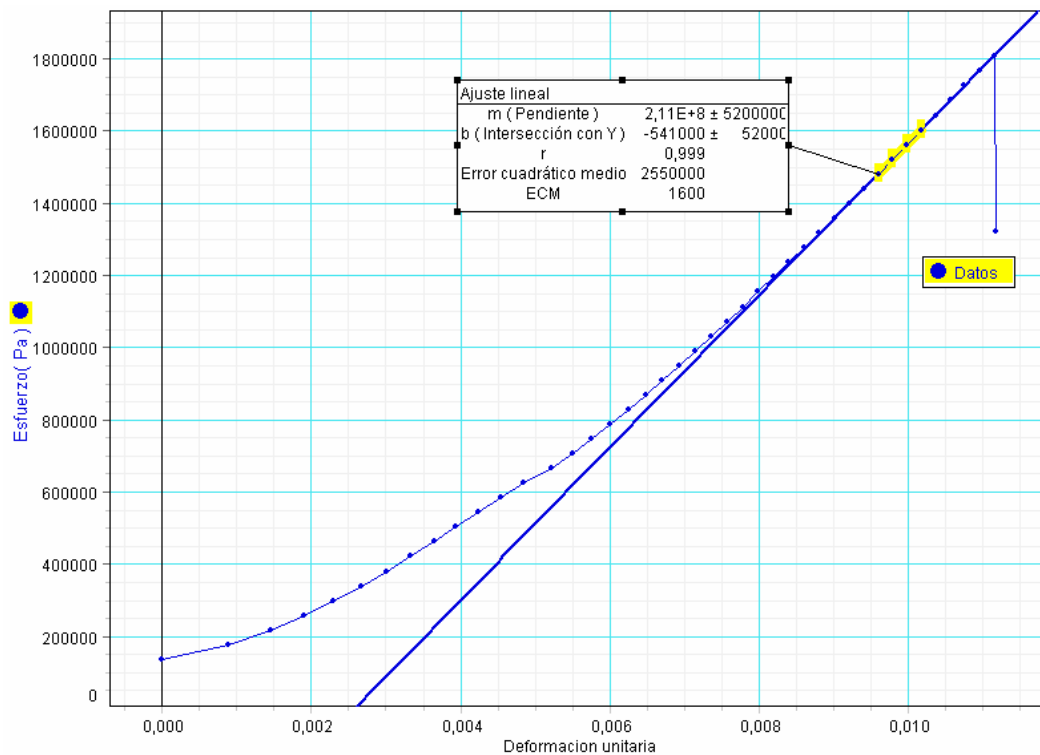
Probeta	Fuerza Máxima (N)	Tensión en el punto de ruptura (Pa)
1	2149,391	1,72E+06
2	2389,568	1,91E+06
3	2259,303	1,81E+06
4	2051,691	1,64E+06
5	1583,547	1,27E+06

Tabla 27. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura

Tensión en el punto de ruptura	
Media (Pa)	Desviación Estándar
1,67E+06	2,47E+05

- Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el modulo de elasticidad del Sajo en sentido perpendicular a las fibras de la madera, el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs deformación unitaria, se utilizo el software DataStudio. En la figura 44 se puede observar la grafica esfuerzo vs deformación unitaria de la probeta 3, la cual presento un modulo de elasticidad de 0,21 GPa.

Figura 44. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria. Modulo de elasticidad.



Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 28.

Tabla 28. Resultados del modulo de elasticidad.

Probeta	Modulo de elasticidad (Pa)
1	2,31E+08
2	3,06E+08
3	2,11E+08
4	2,21E+08
5	2,17E+08

Tabla 29. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad.

Modulo de elasticidad (Pa)	
Media (Pa)	Desviación Estándar
2,37E+08	3,91E+07

- **Elongación en la prueba.** El calculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la longitud inicial de referencia y la longitud final de referencia (Deformación %).

En la tabla 30 se muestra los valores de deformación porcentual de los ensayos realizados en esta prueba.

Tabla 30. Deformación porcentual.

Probeta	Deformación %
1	0,797
2	0,860
3	1,117
4	0,967
5	0,780

Tabla 31. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual.

Deformación %	
Media (%)	Desviación Estándar
0,904	0,140

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de pruebas de tracción realizadas a la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete Mixto No 24.

➤ **Ensayo de compresión.** Al igual que en el ensayo de tracción cuando se habla de compresión en la madera hay que tener en cuenta que este material es anisotrópico por lo tanto se debe probar en la dirección de sus fibras y perpendicular a ellas, debido a que la carga máxima aplicada podría variar dependiendo de la posición de las fibras de la madera. En este proyecto se realizara prueba de compresión con fibras paralelas al grano debido a que para uso industrial este material siempre se dispone de esta manera, por efecto de aprovechamiento de la madera.

◆ **Ensayo de compresión con fibras paralelas al grano.** El procedimiento que se llevo a cabo para la realización del ensayo de compresión para la probeta con fibras paralelas al grano, se hizo en base a la norma NTC 784⁶. Para la realización de este ensayo se empleo la probeta con la forma y dimensiones indicadas en el anexo 8.

▪ **Objetivo.** Este ensayo se realiza con el fin de determinar las propiedades del Sajo sometido a compresión en dirección paralela a las fibras del grano, suministrado por la empresa Cobres de Colombia – División de empaques de madera.

▪ **Método de preparación de probetas.** A partir de dos tablones de madera tipo Sajo con 50mm de espesor, 100mm de ancho y 600mm de largo; se obtuvieron en promedio 6 probetas por cada tablón de madera, pero manteniendo unas buenas condiciones de la madera se aprobaron 6 probetas, como lo menciona la norma NTC 787, y las dimensiones especificadas en el anexo 8.

Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes maquinas:

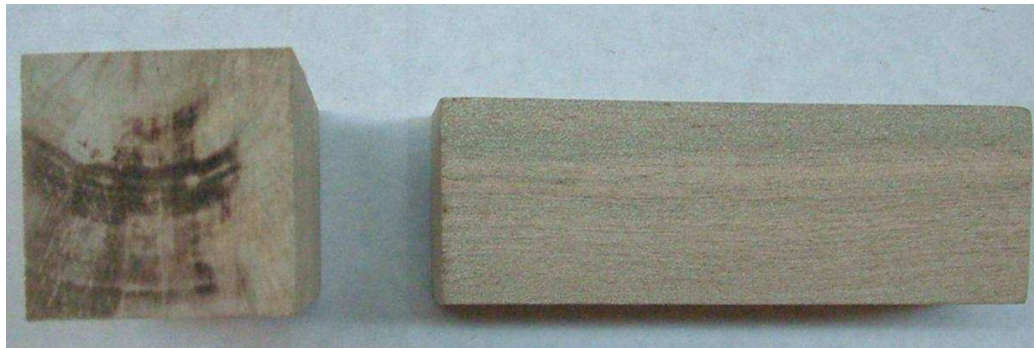
Cepilladora de madera SCM F5L. Se usa para darle un acabado prolijo y recto en cada cara de los tablones de madera.

⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1974. p. 5. NTC 784

Sierra Cinta o Sin Fin para madera SR 700. Sirve para cortar los tablonces de madera hasta las dimensiones finales de la probeta, usando una Cinta de diente media luna.

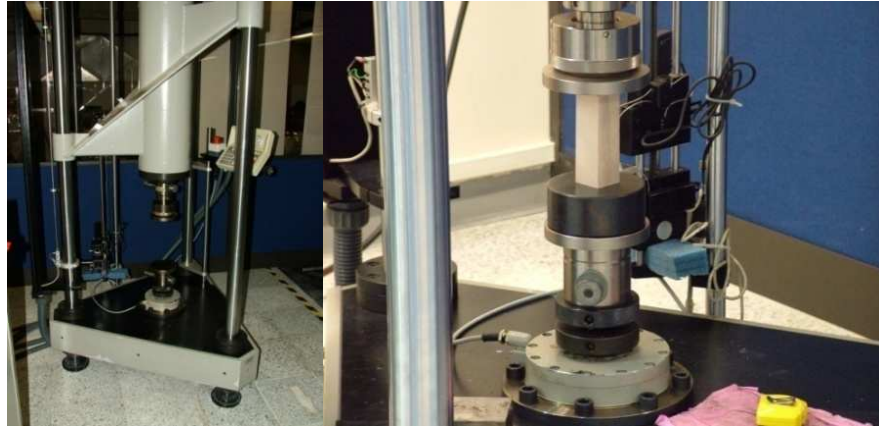
- **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 16% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.
- **Condiciones atmosféricas en el lugar de ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.
- **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba (figura 45).
- **Velocidad de ensayo.** La carga se aplicó sobre las caras transversales, en forma continua y durante todo el ensayo para que se produzca una deformación de 0,6 mm/min. Los valores para la curva de esfuerzo-deformación se toman aun después de la rotura de la probeta.

Figura 45. Probeta de ensayo.



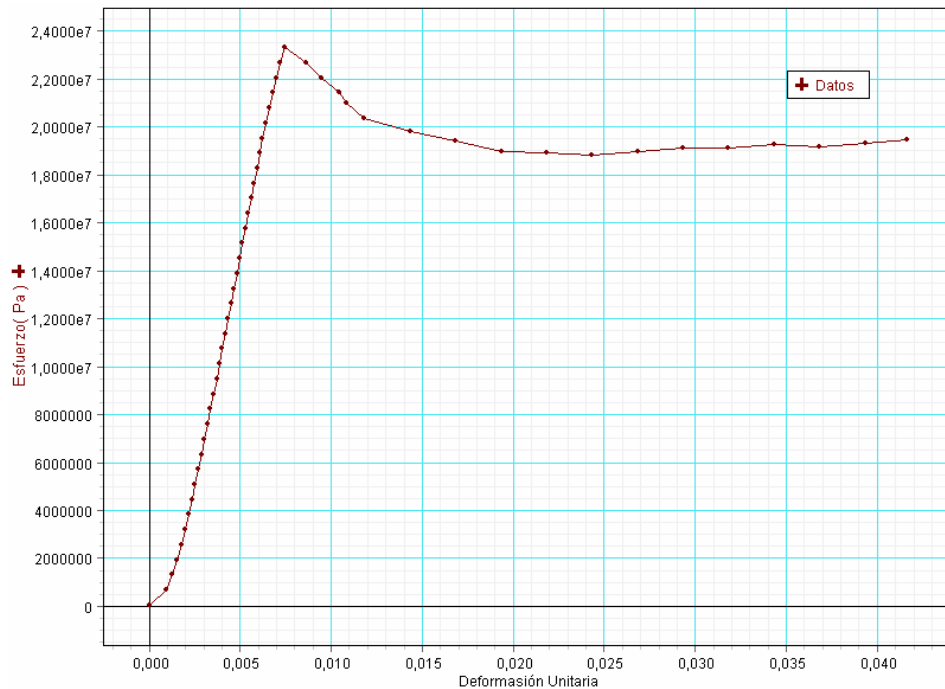
- **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. (Figura 46).

Figura 46. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



- **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba de compresión.** Al igual que en la prueba de tracción, en esta prueba también se presencia un comportamiento frágil por parte de la madera, por lo tanto no se logra registrar un valor de fluencia, debido a esto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura. El comportamiento frágil del material estudiado se puede observar en la figura 47.

Figura 47. Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión (Esfuerzo Vs. Deformación).



- **Resistencia máxima a la rotura por compresión.** La resistencia máxima a la ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 2.

Los resultados obtenidos para el valor de esfuerzo último del material se presentan a continuación en la tabla 32.

Tabla 32. Resultados de resistencia máxima a la ruptura.

Probeta	Fuerza Máxima (N)	Resistencia máxima a la ruptura (Pa)
1	3,54E+04	2,21E+07
2	3,52E+04	2,20E+07
3	3,42E+04	2,14E+07
4	3,73E+04	2,33E+07
5	3,70E+04	2,31E+07

Tabla 33. Análisis estadístico de resistencia máxima a la ruptura.

Resistencia máxima a la ruptura	
Media (Pa)	Desviación Estándar
2,24E+07	7,98E+05

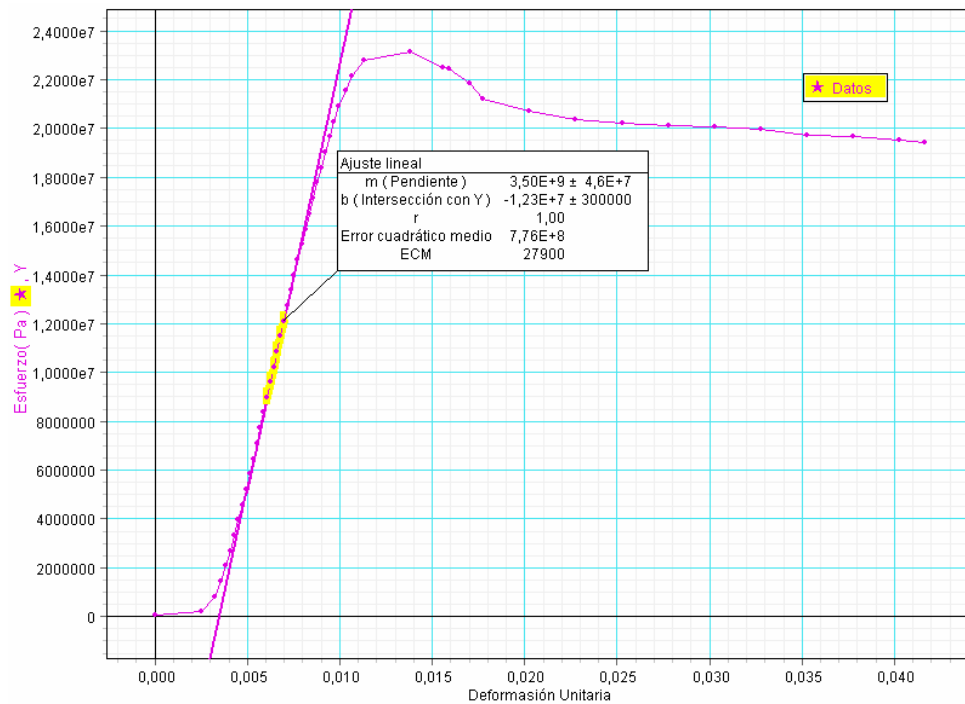
Comparando estos valores de esfuerzo máximo a la ruptura con datos encontrados en el documento “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima” por Arevalo y Londoño,

se puede determinar que existe una desigualdad importante entre estos dos estudios, esto podría darse por diferencias en aspectos muy importantes que varían las propiedades mecánicas de la madera como lo son, el porcentaje de humedad, tiempo de vida y tiempo en el cual fue cortado el árbol. Debido a que el objetivo de estas pruebas es caracterizar los materiales de los cuales está hecho el carrete No 24, se utilizara el resultado obtenido experimentalmente por la prueba de compresión paralela al grano⁷.

⁷ AREVALO, Rosven y LONDOÑO, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima: Sajo. Ibagué: AREVALO y LONDOÑO, 2005. p. 114

- **Modulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el modulo de elasticidad del Sajo sometido a compresión el cual corresponde a la pendiente de la grafica esfuerzo vs deformación unitaria, se utilizo el software DataStudio. En la figura 48 se puede observar la grafica esfuerzo vs deformación unitaria de la probeta 5, la cual presento un modulo de elasticidad de 3,5 GPa.

Figura 48. Modulo de elasticidad a compresión. (Esfuerzo Vs. Deformación unitaria)



Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 34.

Tabla 34. Resultados del modulo de elasticidad.

Probeta	Modulo de elasticidad a compresión (Pa)
1	3,85E+09
2	3,92E+09
3	3,38E+09
4	3,87E+09
5	3,59E+09

Tabla 35. Análisis estadístico de los resultados del modulo de elasticidad a compresión.

Modulo de elasticidad (Pa)	
Media (Pa)	Desviación Estándar
3,72E+09	2,30E+08

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de resultados de modulo de elasticidad en pruebas de compresión para la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete Mixto No 24.

- **Elongación en la prueba.** El cálculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la longitud inicial de referencia y la longitud final de referencia (Deformación %).

En la tabla 36 se muestra los valores de deformación porcentual de los ensayos realizados en esta prueba.

Tabla 36. Deformación porcentual de la madera sometida a compresión.

Probeta	Deformación %
1	1,460
2	1,500
3	1,430
4	1,430
5	1,780

Tabla 37. Análisis estadístico de los resultados de la deformación porcentual de la madera sometida a compresión.

Deformación %	
Media (%)	Desviación Estándar
1,520	0,148

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de resultados de elongación en pruebas de compresión para la madera tipo Sajo, se decidió tomar los resultados

obtenidos por esta prueba, para realizar la caracterización de uno de los materiales del cual está hecho el carrete Mixto No 24.

➤ **Ensayo de flexión.** Los ensayos de flexión conciten en aplicar una carga en el centro de a una probeta del material de estudio, en este caso madera Sajo, la cual se encuentra apoyada en sus extremos, con el fin de calcular la resistencia a partir de la carga máxima, de la distancia entre los apoyos, del ancho de la probeta y del espesor de la misma.

Para realizar este ensayo se empleo una probeta como la mostrada en el anexo 9; en la cual la dirección del grano de la madera corre paralelamente al eje longitudinal de la probeta como lo indica la norma NTC 663⁸.

◆ **Objetivo.** Este ensayo se realiza con el fin de determinar la resistencia del Sajo cuando se encuentra sometido a flexionen.

◆ **Método de preparación de probetas.** A partir de dos tablones de madera tipo Sajo con 25mm de espesor, 300mm de ancho y 500mm de largo; se obtuvieron en promedio 6 probetas por cada tablón de madera, pero manteniendo unas buenas condiciones de la madera se aprobaron 6 probetas, como lo menciona la norma NTC 787, y las dimensiones especificadas en el anexo 9.

Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes maquinas:

Cepilladora o Regruesadora HURTADO 45. Se usa para darle un acabado prolijo y recto de los tablones de madera hasta un espesor de 20mm.

Sierra circular c/Carburo 7 1/4 x 24 para madera. Usado para cortar los tablones de madera de hasta un largo de 400mm.

Sierra Cinta o Sin Fin para madera SR 700. Sirve para cortar los tablones de madera hasta las dimensiones finales de la probeta, usando una Cinta de diente media luna.

⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1973. p. 4. NTC 663

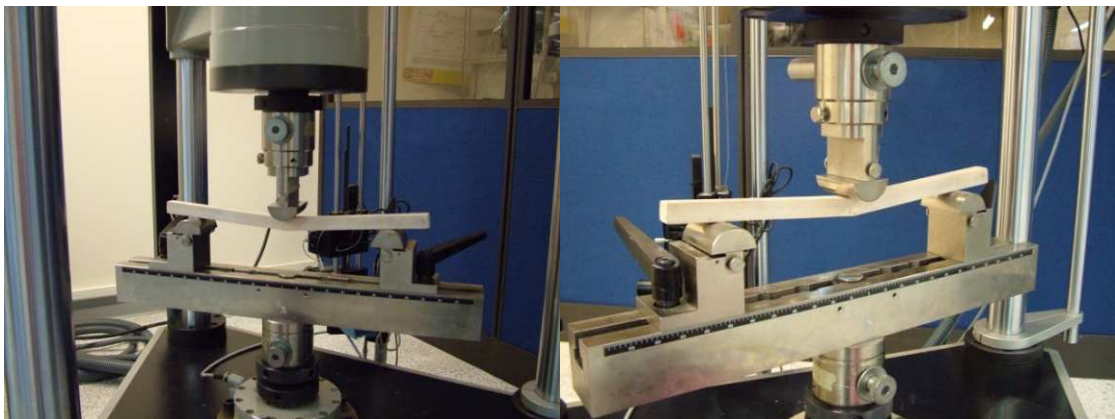
- ◆ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23°C y humedad relativa de 16% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.
- ◆ **Condiciones atmosféricas en el lugar de ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.
- ◆ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba.
- ◆ **Velocidad de ensayo.** La probeta se cargó de forma continua y constante con el fin de obtener una deformación de 2,5 mm por min, hasta llegar a la rotura, registrando la deformación y las cargas correspondientes.

Figura 49. Probeta de ensayo.



- ◆ **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. (Figura 50).

Figura 50. Máquina universal de ensayos UTS 200.3.



♦ **Tensión en el punto de ruptura por flexión.** Con el fin de conocer la resistencia máxima a la flexión del material se empleo la siguiente ecuación:

$$\sigma_{max} = \frac{3PL}{2ae^3}$$

Ecuación 5

Donde:

σ_{max} = Resistencia máxima a la flexión, en Kg/cm².

P = Carga de rotura, en newtons.

L = Distancia entre los soportes, en cm.

a = Ancho de la probeta en la dirección radial, en cm.

e = Altura de la probeta en la dirección tangencial, en cm.

Los resultados obtenidos para la tensión en el punto de ruptura de la prueba de flexión realizada a la madera Sajo se muestran en la tabla 38.

Tabla 38. Resultados de tensión en el punto de ruptura por flexión.

Probeta	Fuerza Máxima (N)	Tensión en el punto de ruptura por flexión (Pa)
1	1,08E+03	7,14E+08
2	1,15E+03	7,58E+08
3	1,08E+03	7,14E+08
4	1,05E+03	6,96E+08
5	1,14E+03	7,51E+08

Tabla 39. Análisis estadístico de tensión en el punto de ruptura por flexión

Tensión en el punto de ruptura por flexión	
Media (Pa)	Desviación Estándar
7,27E+08	2,68E+07

Comparando estos valores de tensión en el punto de ruptura cuando el sajo es sometido a flexión con datos encontrados en el documento “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima”⁹, se puede determinar que existe una desigualdad entre estos dos estudios, esto podría darse por diferencias en aspectos muy importantes que varían las propiedades mecánicas de la madera como lo son, el porcentaje de humedad, tiempo de vida y tiempo en el cual fue cortado el árbol. Debido a que el objetivo de estas pruebas es caracterizar los materiales de los cuales está hecho el carrete No 24, se utilizara el resultado obtenido experimentalmente por la prueba de flexión.

➤ **Ensayo de impacto.** Se realizo el ensayo de impacto en la máquina de ensayos Charpy según la norma NTC 1823¹⁰ mediante el siguiente procedimiento:

La probeta de análisis térmicamente acondicionada, se coloca en el apoyo de la máquina de impacto Charpy contra los apoyos; el péndulo es puesto en libertad sin vibraciones, y la muestra es impactada por este. La información se obtiene de la máquina y las partes fracturadas de la probeta

◆ **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la resistencia a la ruptura de la madera tipo Sajó, obtenido de la empresa Cobres de Colombia Ltda. – División de empaques de madera, en probetas de ensayo estándar sin muesca, con un 12% de humedad relativa.

◆ **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon a partir de una tabla de 12mm x 150mm y una longitud de 400mm; se obtuvieron en

⁹ AREVALO y LONDOÑO, Op. cit., p. 93.

¹⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la tenacidad. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1983. p. 7. NTC 1823

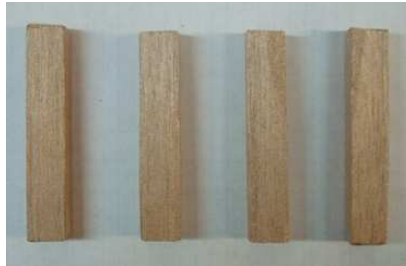
promedio 20 probetas de las cuales solo 15 mantuvieron las buenas condiciones para el ensayo, como lo menciona la norma NTC 787, y las dimensiones finales de la probeta son 10mm x 10mm x 550mm, ver figura 54.

Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes maquinas:

Cepilladora de madera SCM F5L. Se usa para darle un acabado prolijo y recto de los tablones de madera hasta un espesor de 10mm.

Sierra caladora de banco Gamma 16". Utilizando una hoja P/Caladora OLSON #5 SIN PIN para darle, finalmente, las dimensiones finales a las probetas.

Figura 51. Probeta de ensayo para prueba de impacto Charpy.



◆ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23 °C y humedad relativa de 12% durante 72 h antes de realizar el procedimiento.

◆ **Condiciones atmosféricas en el lugar del ensayo.** Los ensayos se realizaron a 23 °C y humedad relativa de 50%.

◆ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 9 probetas.

◆ **Capacidad del péndulo.** El péndulo tiene una capacidad máxima de 294 J y 300°.

- ◆ **Clasificación de la máquina.** Máquina para ensayo de impacto tipo Charpy.

Figura 52. Máquina para prueba de impacto Charpy.



- ◆ **Tipo de falla.** Todas las probetas presentaron fractura total.
- ◆ **Resultados de la resistencia al impacto.** Al realizar la prueba la lectura de la máquina para cada ensayo arrojó los datos de la resistencia al impacto presentados en la tabla 40.

Tabla 40. Resultados de la resistencia al impacto.

Probeta	Resistencia al impacto [J]	Angulo de barrido [°]	Estado Final
1	7,84	296	Probeta si fracturada
2	6,86	298	Probeta si fracturada
3	7,84	296	Probeta si fracturada
4	7,84	296	Probeta si fracturada
5	7,84	296	Probeta si fracturada
6	9,8	295	Probeta si fracturada
7	7,35	297	Probeta si fracturada
8	7,35	297	Probeta si fracturada
9	7,84	297	Probeta si fracturada

Aplicando la ecuación 4 se realiza el cálculo de la desviación estándar correspondiente a estos valores y se presenta en la tabla 41.

Tabla 41. Análisis estadístico de los resultados de la prueba de impacto.

Resistencia al impacto				Angulo de barrido	
Media (j)	Dato comparativo	Desviación Estándar	Diferencia %	Media (9)	Desviación Estándar
7,840	19,502	0,813	59,799	296,440	0,882

El valor obtenido en esta prueba para la resistencia al impacto de la madera tipo Sajo, es un valor que presenta una variación estándar muy pequeña por lo cual es posible afirmar que se obtuvo gran precisión en esta medición y que el ensayo de impacto arrojó valores adecuados para la muestra analizada haciendo mínimos los factores causantes de error. Pero, al comparar estos datos con los obtenidos en el documento “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima”¹¹, se puede encontrar una gran diferencia debida a los cambios de la humedad, corte de la madera a analizar y demás aspectos que afectan las propiedades de la madera.

En la práctica se pudo comprobar por el sonido de impacto y la zona de fractura en la probeta que se trata de un material frágil, puesto que no se pueden apreciar una deformación en la zona de falla, siendo esto una característica típica de la fractura frágil.

¹¹ AREVALO y LONDOÑO, Op. cit, p. 93.

5. ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS DEL CARRETE MIXTO No 24.

El modelo se realizó por medio del software Solid Edge el cual es una de las herramientas CAD (Diseño Asistido por Computador) mas utilizadas en ingenierías para la creación de prototipos 3D. El modelo 3D del carrete mixto No 24, se hizo creando la estructura metálica del carrete como una sola pieza, cada uno de los componentes de madera como piezas independientes y con el fin de simular el peso del cable se modelo un cilindro hueco con el volumen necesario para proporcionar el peso requerido según la densidad del material, para luego utilizando la herramienta Conjunto del software, realizar el ensamble del carrete completo como se muestra en la figura 57.

Las piezas utilizadas en el ensamble total del carrete son los siguientes:

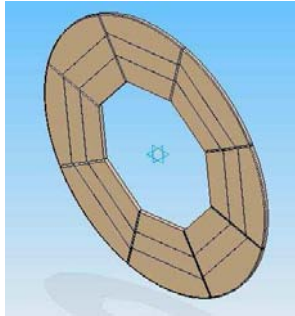
- **Pieza 1.** Estructura metálica (figura 53), esta pieza está compuesta por la unión de 16 radios, 2 bandas de rodamiento, 8 espárragos, platinas y aros para la sujeción de las duelas de madera.

Figura 53. Estructura metálica.



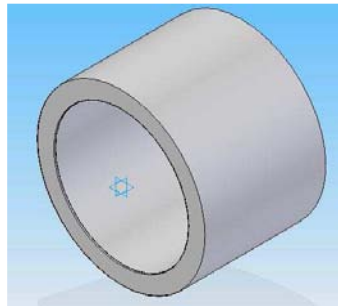
- **Pieza 2 y pieza 3.** Paredes de madera, estas piezas están compuestas por 48 duelas de madera, para facilidad de modelación CAD/CAE se realizaron dos piezas en las cuales se agruparon 24 duelas en cada una, cada una de estas piezas representa una pared del carrete (Figura 54).

Figura 54. Paredes de madera.



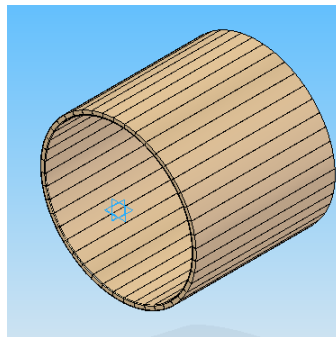
- **Pieza 4.** Cilindro hueco, este cilindro se realizo con el fin de simular la carga del cable sobre el tambor del carrete, el volumen del cilindro corresponde a la división de la masa por la densidad del material.

Figura 55. Cilindro Hueco (Cable).



- **Pieza 5.** Tambor, esta pieza esta compuesta por 44 duelas, con un espaciamiento entre ellas de 1mm, como se muestra en la figura 56.

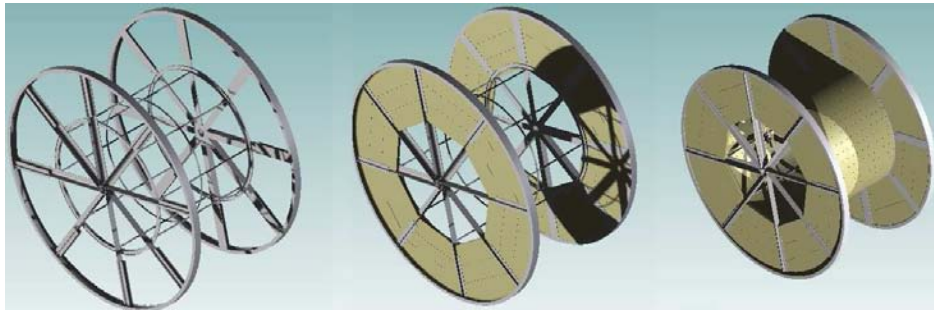
Figura 56. Tambor.



Todas las piezas se realizaron con las medidas y especificaciones, descritos en el capítulo 4, donde se detalla el proceso de fabricación del carrete mixto No 24.

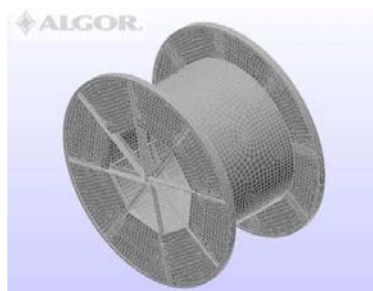
Para la correcta simulación por elementos finitos del carrete se omitió elementos sin trascendencia en el comportamiento mecánico de este, como lo son tuercas y roscas. La soldadura que lleva el producto no fue simulada ya que si se tiene una buena soldadura las propiedades mecánicas serán mucho mejores que las del material del cual esta hecho el elemento, esto se determino debido a que el fabricante garantizo la buena calidad de esta.

Figura 57. Ensamble del carrete mixto No 24 sin cable.



Con el fin de realizar el análisis del carrete mixto No 24 por elementos finitos se exporto el modelo al software Algor, el cual es una herramienta CAE (Ingeniería Asistida por Computador) muy útil para este tipo de análisis; una vez exportado se procede a mallar el modelo de tal forma que esta malla garantice resultados precisos (Figura 58), para lograr esto se debe hacer una malla pequeña debido a que entre más pequeño el mallado del modelo este registrara mayor información, es necesario añadir que si el mallado del modelo es muy fino el análisis se tardara más tiempo en mostrar los resultado.

Figura 58. Mallado del carrete.



La malla realizada en el modelo 3D del carrete está compuesta de elementos bricks, cuñas, pirámides y tetraedros los cuales no permiten que no se creen microhuecos en la malla lo cual podría causar errores en el análisis; también tiene una buena cantidad de nodos para garantizar una buena recepción de datos.

Una vez hecho el mallado del modelo a analizar en la herramienta modelo solido de CAD de Algor se procede a dar las especificaciones del análisis que se quiere realizar en la herramienta editor FEA del software, especificaciones como el tipo de análisis, restricciones y cargas, estas se detallaran en cada uno de los análisis realizados, también se proporcionan las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales del cual está compuesto el carrete mixto No 24, las propiedades que se suministraron a los materiales madera y acero estructural A36 son las siguientes:

Las propiedades que se utilizaron para el análisis, se basaron en las pruebas mecánicas realizadas anteriormente; los datos acerca de las propiedades físicas de los materiales fueron consultados para así poder suministrar todos los requisitos del software. Los materiales y las propiedades proporcionadas al software se muestran a continuación.

➤ **Acero estructural A36.** En la tabla 42 se puede observar las propiedades que se proporcionaron al software de este material, datos como el modulo de elasticidad y el esfuerzo ultimo se obtuvieron de las pruebas mecánicas realizadas; la densidad y el coeficiente de poisson son propiedades suministrados por la biblioteca de materiales de ALGOR.

Tabla 42. Propiedades físico-mecánicas suministradas a ALGOR para el acero A36.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	7,85E-9	(N*s ² /mm/mm ³)
Modulo elástico	2,19E+5	N/mm ²
Coeficiente Poisson	2,60E-01	Adimensional
Esfuerzo Ultimo	488	N/mm ²

➤ **Madera Sajo.** En la tabla 43 se muestra las propiedades físico-mecánicas suministradas al software ALGOR de la madera Sajo, los datos como el modulo de elasticidad y el esfuerzo ultimo se obtuvieron de las pruebas mecánicas realizadas

a la madera en forma tal que las fibras se encuentren paralelas al grano, esto se determino ya que el corte que se le realiza a las tablas que componen el carrete se hacen en este sentido de las fibras; la densidad se obtuvo por investigación¹²; debido a que en los productos de madera, la relación de Poisson es muy pequeña y difícil de determinar se decidió tomar el coeficiente de Poisson utilizado en un proyecto de investigación realizado en la universidad nacional del noreste-Argentina, el cual toma un valor de 0,2¹³.

Tabla 43. Propiedades físico-mecánicas suministradas a ALGOR para el Sajo.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	4,70E-10	(N*s ² /mm/mm ³)
Modulo elástico	1,22E+4	N/mm ²
Coficiente Poisson	2,00E-01	Adimensional
Esfuerzo Ultimo	113	N/mm ²

Después de hacer las visitas y entrevistas respectivas tanto a las empresas que fabrican el producto, como también a las empresas que lo consumen, se pudo establecer ciertas condiciones de trabajo a las cuales el carrete se encuentra sometido, debido a estas condiciones de consideración, en esta tesis se realizó un análisis por elementos finitos para cada una de las siguientes condiciones:

5.1 CONSIDERACIÓN 1, CARRETE EN CONDICIONES NORMALES DE TRABAJO.

Es necesario evaluar el comportamiento del carrete en condiciones normales de trabajo, para así conocer su respuesta a las condiciones para el cual se encuentra diseñado, debido a esto se realizara el análisis del carrete en posición normal de trabajo con su capacidad máxima de almacenamiento de cable en el. Para este análisis se tuvo en cuenta los siguientes aspectos.

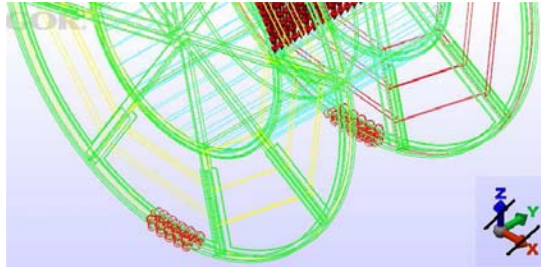
- **Tipo de análisis.** Tensión estática con modelos de material lineales.

¹² AREVALO y LONDOÑO, Op. cit, p. 93.

¹³ Modelado de secciones mixtas de hormigón-madera utilizando el Método de Elementos Finitos [en línea]. Chaco: U.N.N.E, 2004. [Consultado 20 de Agosto de 2008]. Disponible en Internet: www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-008.pdf

► **Tipo de restricciones.** Para esta consideración se restringió el carrete en la superficie que hace contacto con el suelo, cuando el carrete se encuentra ubicado en posición normal, esta restricción se realizó en las direcciones X y Z, para cada punto de contacto, como se muestra en la figura 59.

Figura 59. Restricciones del carrete para la condición 1.



► **Tipo de carga.** La carga a la que fue sometido el carrete es la máxima carga para la cual fue diseñada esta referencia de carrete (6850 Kg), esta se ubicó usando un cilindro hueco que se sitúa sobre el tambor del mismo; para garantizar esta carga se calculó el volumen del cilindro a partir de la densidad del material y la masa.

◆ **Calculo de volumen para cilindro hueco.** Para calcular el volumen del cilindro hueco que simulara la carga soportada por el carrete mixto No 24 se tomó el diámetro interior del cilindro igual a el diámetro exterior del tambor y a partir de la densidad del material proporcionado a esta pieza y de la carga máxima se calculó el diámetro exterior necesario para suministrar el volumen requerido de la siguiente forma:

Datos conocidos:

$$m = 6850 \text{ Kg}$$

$$\rho_{\text{cobre}} = \frac{8940 \text{ Kg}}{\text{m}^3}$$

$$r_{\text{int}}^2 = 0,4493 \text{ m}^2$$

$$h = 1,2 \text{ m}$$

$$V_{\text{Total}} = 0,07645 \text{ m}^3$$

El volumen total necesario se calculo con la siguiente ecuación:

$$V_{Total} = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 6

Con los datos conocidos se pudo determinar el diámetro exterior del cilindro que simulara la carga a la cual estará sometido el carrete, este diámetro se calculo con la siguiente ecuación:

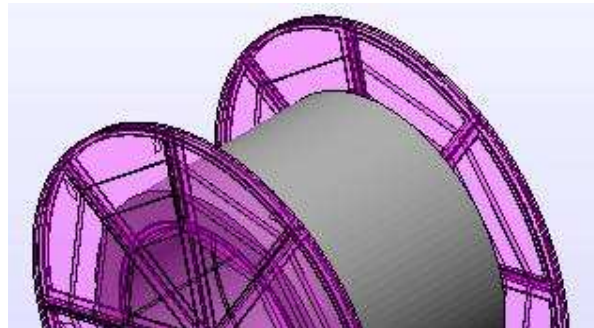
$$r_{ext} = \sqrt{\frac{V_{Total}}{\pi h} + r_{int}^2}$$

Ecuación 7

Usando la ecuación 7 se pudo determinar que el diámetro exterior para del cilindro hueco es de 0,832 m³.

En la figura 60 se observa el carrete con el cilindro que simula la carga sometida por el cable, este cilindro tiene un volumen que proporciona el valor de carga máxima para la cual fue diseñado el carrete mixto (Metal - Madera) No 24.

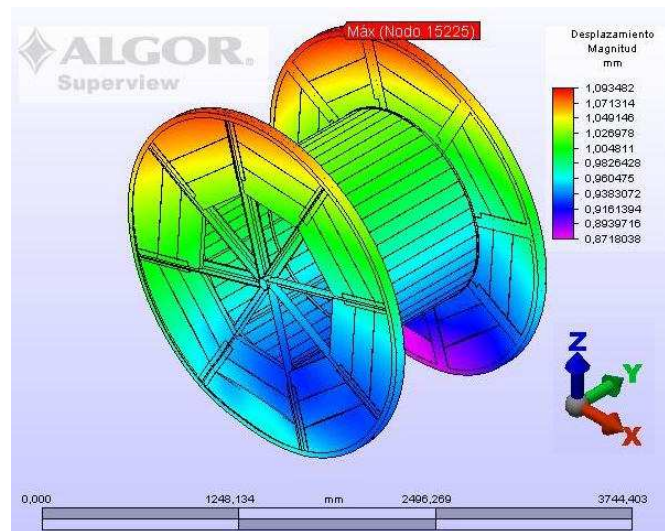
Figura 60. Carga a la cual fue sometido el carrete en la condición 1.



➤ **Resultados.** Con el fin de evaluar el comportamiento del carrete mixto No 24, se tomara los resultados de desplazamientos ocurridos en el, como también son muy importante los esfuerzos a los que se encuentra sometido cuando se aplica la carga ejercida por el peso del cable, de acuerdo a esto se podrá obtener un factor de seguridad proporcionado por el software, el cual será muy útil para el análisis de estos resultados.

◆ **Desplazamiento (magnitud).** Los resultados suministrados por el software Algor, muestran que el mayor desplazamiento en magnitud se encuentra en la parte superior del carrete con un valor de 1,093mm y los mínimos en la parte inferior, como se muestra en la figura 61.

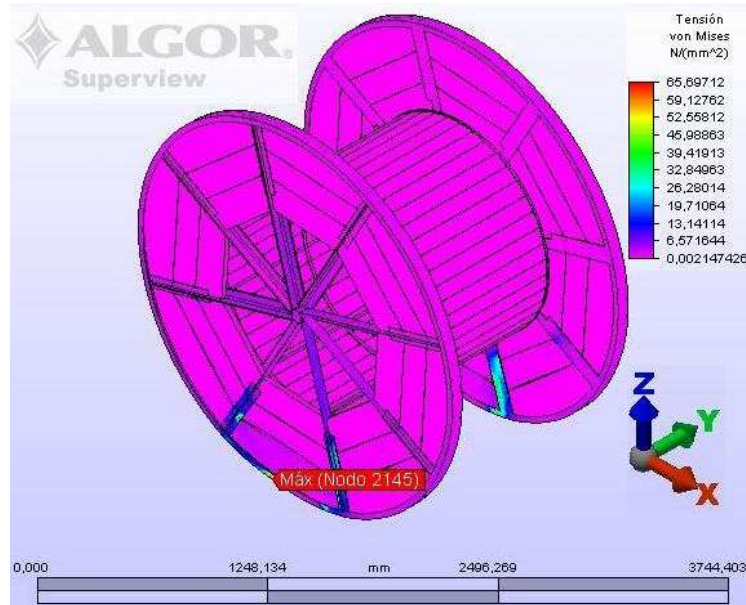
Figura 61. Resultados de los desplazamientos (Magnitud) para la condición 1.



Esfuerzos. Los resultados de los esfuerzos se dan de acuerdo con la metodología de Von Misses debido a que existen dos tipos de material en el carrete, madera, el cual es un material que en las pruebas presento un comportamiento frágil y acero, que según las pruebas mostró un comportamiento muy dúctil, por lo tanto se decidió trabajar con esta metodología de diseño ya que la carga ira soportada por la madera en el tambor.

Los resultados se muestran en la figura 62, en la cual se puede observar que los máximos esfuerzos soportados se dan en la zona de contacto con el suelo.

Figura 62. Resultados de los esfuerzos para la condición 1.



A continuación se muestra la respuesta a las cargas de los componentes madera y metal de forma independiente, enfatizando en los resultados de los esfuerzos de tensión y el desplazamiento, esto con el fin de interpretar que función cumple cada uno de estos materiales en el carrete mixto (madera-metal) No24. Una vez estudiada cada una de las condiciones a las cuales se encuentra sometido el carrete, se hará un análisis de estos resultados. (Ítem 5.5)

Figura 63. Resultados de los análisis en la madera para la condición 1.

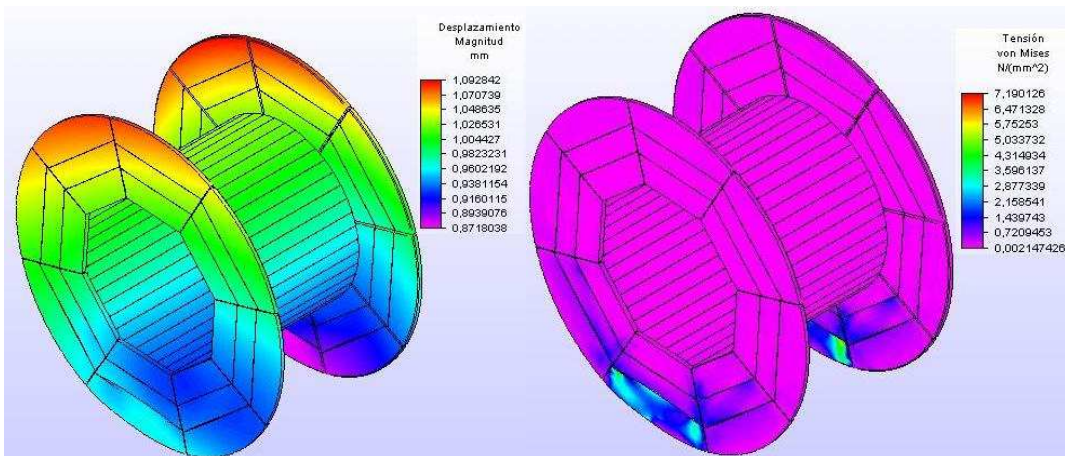
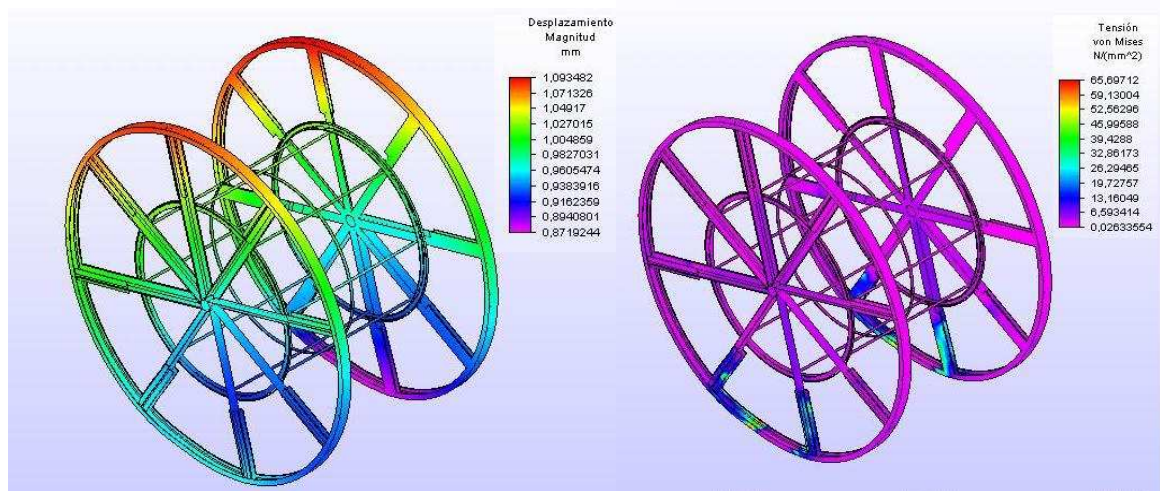


Figura 64. Resultados de los análisis en el acero para la condición 1.

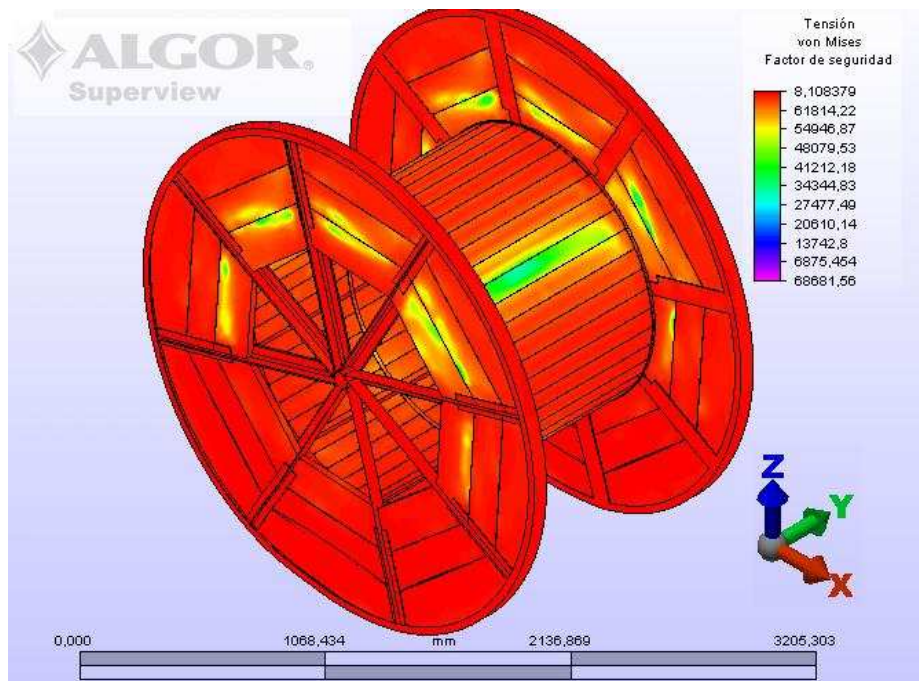


➤ **Análisis.** Para realizar un análisis completo es necesario tener en cuenta los máximos desplazamientos o deformaciones del modelo, como también los esfuerzos que se generan en éste debido a la carga soportada por el carrete.

Como se pudo observar en el análisis de desplazamientos del modelo el máximo desplazamiento es de 1mm aproximadamente por lo tanto para este caso no es un factor influyente para el análisis, ya que el carrete podrá tener desplazamientos como este sin afectar su integridad, debido a que un desplazamiento como el mostrado en los resultados no es considerable si lo comparamos con las dimensiones del carrete.

Debido a que en este proyecto se trabajara con el método de diseño de von Mises por lo anteriormente explicado, se confrontara los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos de tensión de von Mises con el esfuerzo ultimo de cada material.

Figura 65. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 1.



Como se puede observar en la figura 65, el mínimo factor de seguridad es de 8,10 lo que muestra que el máximo esfuerzo que se presenta en el carrete cuando se encuentra en condiciones normales de trabajo, es de 8 veces menor que el esfuerzo ultimo, por lo tanto se puede decir que el carrete mixto No 24 se encuentra bien diseñado para soportar su máxima carga en condición estática.

5.2 CONSIDERACIÓN 2, CARRETE ES TRANSPORTADO EN MONTACARGAS.

Es muy importante el análisis del carrete en el momento que es transportado por un montacargas ya que esta acción se lleva a cabo muy a menudo con el fin de trasladarlo de un lugar a otro.

- **Tipo de análisis.** Tensión estática con modelos de material lineales.
- **Tipo de restricciones.** Para esta consideración se restringió el carrete en la superficie que hace contacto con las aspas del montacargas, este contacto se

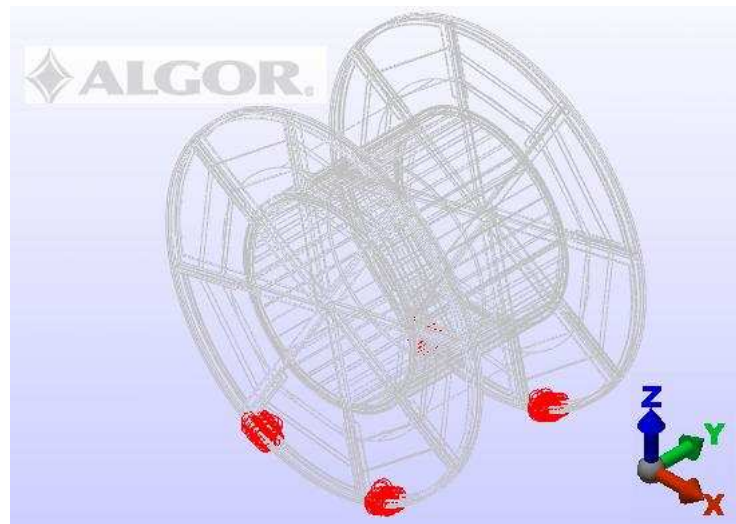
presenta en cuatro puntos este, debido a que cada aspa del montacargas hace contacto con las dos tapas del carrete, como se muestra en la figura 66.

Figura 66. Transporte de carrete en montacargas.



Fuente: Recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla [en línea]. Monterrey: Tecno JAR S.A, 2006. [Consultado 26 de julio de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.tecnojar.com/tecnoshop/>

Figura 67. Restricciones del carrete para la condición 2.

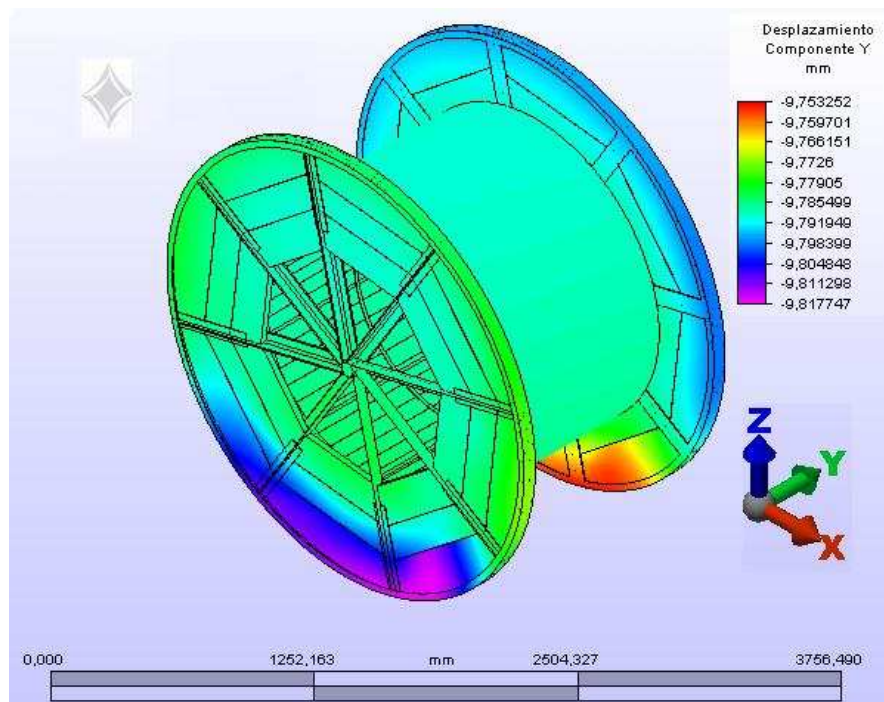


➤ **Tipo de carga.** La carga a la que fue sometido el carrete es la máxima carga para la cual fue diseñada esta referencia de carrete (6850 Kg), esta se ubico usando un cilindro hueco que se sitúa sobre el tambor del mismo; para garantizar esta carga se calculo el volumen del cilindro a partir de la densidad del material y la masa. El cálculo del volumen necesario para garantizar la máxima carga a la que puede ser sometido el carrete se realizo en el ítem 5.1.

➤ **Resultados.** Con el fin de evaluar el comportamiento del carrete mixto No 24, se tomara los resultados de desplazamientos ocurridos en el, como también los esfuerzos a los que se encuentra sometido cuando se aplica la carga ejercida por el peso del cable, de acuerdo a esto se podrá obtener un factor de seguridad proporcionado por el software, el cual será muy útil para el análisis de estos resultados.

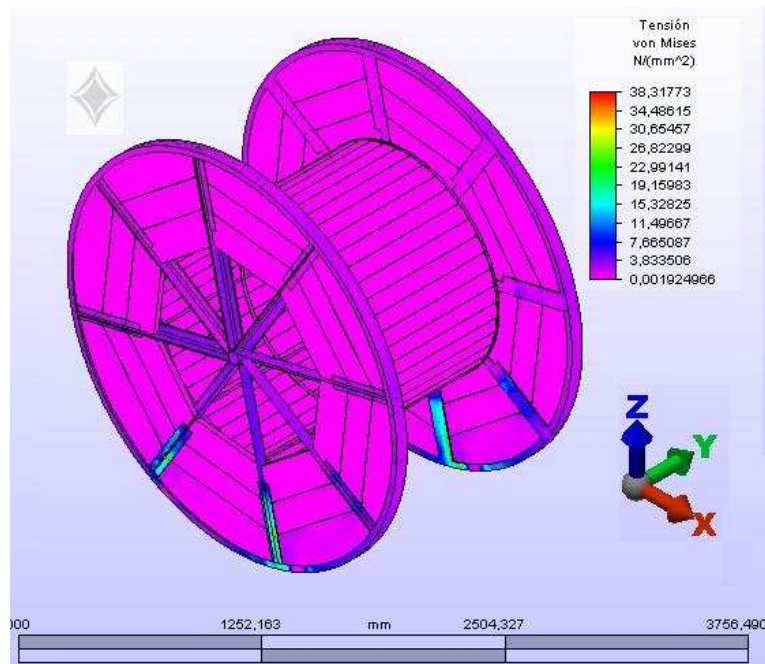
◆ **Desplazamiento (magnitud).** Los resultados suministrados por el software Algor, muestran que los valores más importantes en cuanto a desplazamiento de los nodos que componen el modelo se presentan en el eje Y, con valores muy similares en todo el carrete los cuales se encuentra alrededor de los 10mm, como se muestra en la figura 68.

Figura 68. Resultados de desplazamientos (Eje Y) para la condición 2.



◆ **Esfuerzos.** Los resultados de los esfuerzos se dan de acuerdo con la metodología de Von Mises por lo anteriormente especificado en el ítem 5.1. Los resultados se muestran en la figura 69, en la cual se puede observar que los máximos esfuerzos soportados se dan en la zona de contacto con las aspas del montacargas.

Figura 69. Resultados de los esfuerzos para la condición 2.



A continuación se muestra la respuesta a las cargas de los componentes madera y metal de forma independiente, enfatizando en los resultados de los esfuerzos de tensión y el desplazamiento, esto con el fin de interpretar que función cumple cada uno de estos materiales en el carrete mixto (madera-metal) No24. Una vez estudiada cada una de las condiciones a las cuales se encuentra sometido el carrete, se hará un análisis de estos resultados. (Ítem 5.5)

Figura 70. Resultados de los análisis en la madera para la condición 2.

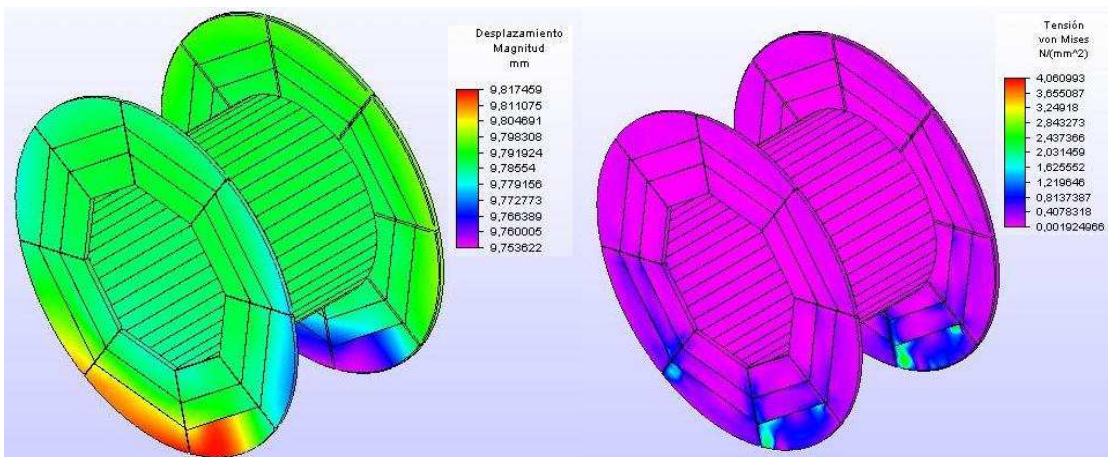
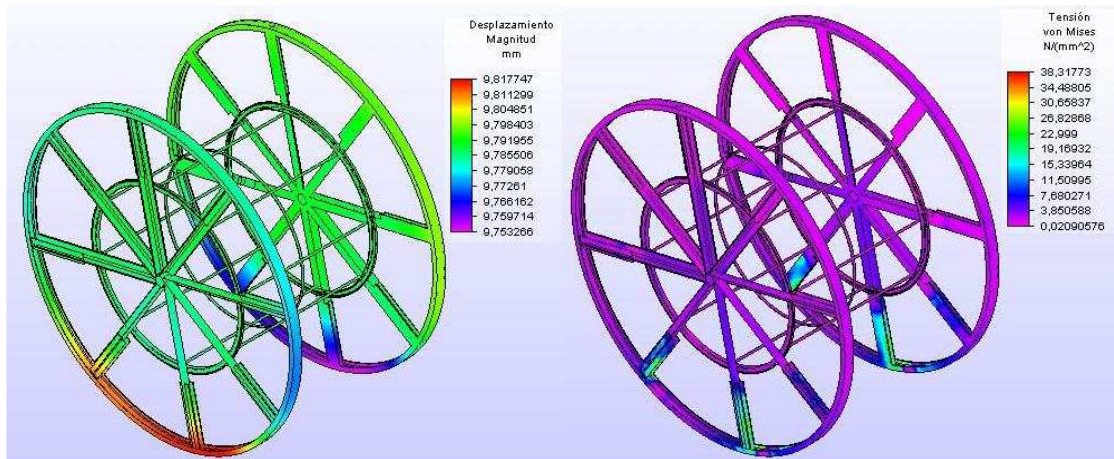


Figura 71. Resultados de los análisis en el acero para la condición 2.



➤ **Análisis.** Para realizar un análisis completo es necesario tener en cuenta los máximos desplazamientos o deformaciones del modelo, como también los esfuerzos que se generan en éste debido a la carga soportada por el carrete. Con el fin de garantizar los resultados de este análisis es necesario que el operario del montacargas cumpla con ciertas recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla como las siguientes:

- ◆ **Alineación de la uñas.** Para tomar el carrete verifique que las uñas se encuentren en posición horizontal y paralela al piso
- ◆ **Abertura de las uñas.** Esta debe ser adecuada al tamaño del carrete, de modo que al tomarlo, no raspe los flanges impulsando el carrete hacia delante, lo que puede producir su doblado.
- ◆ **Levantar el carrete.** Al subirlo la grúa no debe golpear el carrete. Para levantar, se debe hacer de modo vertical evitando cualquier tipo de inclinación, elevando a 30cm. de altura.
- ◆ **Traslado.** Debe efectuarse a una velocidad moderada que no exceda los 20 km/h
- ◆ **Descarga del carrete.** Al llegar al lugar de almacenamiento, se deben bajar las uñas que deben estar en posición horizontal y paralelas al piso y

posar ambos flanges en el suelo al mismo tiempo, evitando que el carrete golpee el piso.

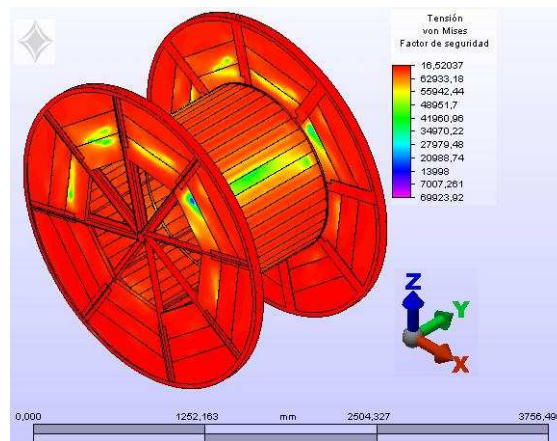
- ◆ **Retiro de uñas.** Una vez depositado el carrete en el piso, se retiran las uñas sin que estas rocen los flanges para evitar que el carrete se vaya hacia atrás y se produzca su doblez.

- ◆ **Asegurar.** Retiradas las uñas los carrete deben asegurarse fijándolos en el piso con cuñas, las que tienen por objeto evitar posibles movimientos de los carretes.¹⁴

Como se pudo observar en el análisis de desplazamientos del modelo los máximos desplazamientos se encuentran alrededor de los 10 mm aproximadamente por lo tanto es necesario que se tenga en cuenta este valor, debido a que aunque no sea un valor crítico, este se podría dar en zonas de baja ductilidad, presentándose fracturas en el carrete, afectando la integridad del mismo.

Debido a que en este proyecto se trabajara con el método de diseño de von Mises, se confrontara los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos de tensión de von Mises con el esfuerzo ultimo de cada material.

Figura 72. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos.



¹⁴ Recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla [en línea]. Monterrey: Tecno JAR S.A, 2006. [Consultado 26 de julio de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.tecnojar.com/tecnoshop/>

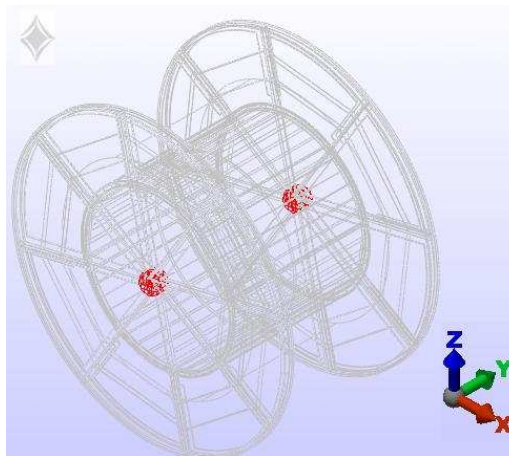
Como se puede observar en la figura 72, el mínimo factor de seguridad es de 16,52 lo que muestra que el máximo esfuerzo que se presenta en el carrete cuando se encuentra apoyado sobre las aspas del montacargas, es de 16 veces menor que el esfuerzo ultimo, por lo tanto se puede decir que el carrete mixto No 24 se encuentra bien diseñado para soportar su máxima carga cuando está apoyado en las aspas del montacargas.

5.3 CONSIDERACIÓN 3, CARRETE MONTADO EN MAQUINA DE EMBOBINADO.

El carrete está diseñado específicamente para empacar cable, debido a esto el carrete va estar sometido constantemente a que el cable sea embobinado en el, por lo tanto es necesario simular el carrete en el momento en el cual se encuentra montado en la máquina de embobinado.

- **Tipo de análisis.** Tensión estática con modelos de material lineales.
- **Tipo de restricciones.** Para esta consideración se restringió el carrete en los bujes debido a que este gira sobre ellos, como se muestra en la figura 73.

Figura 73. Restricciones del carrete para la condición 3.



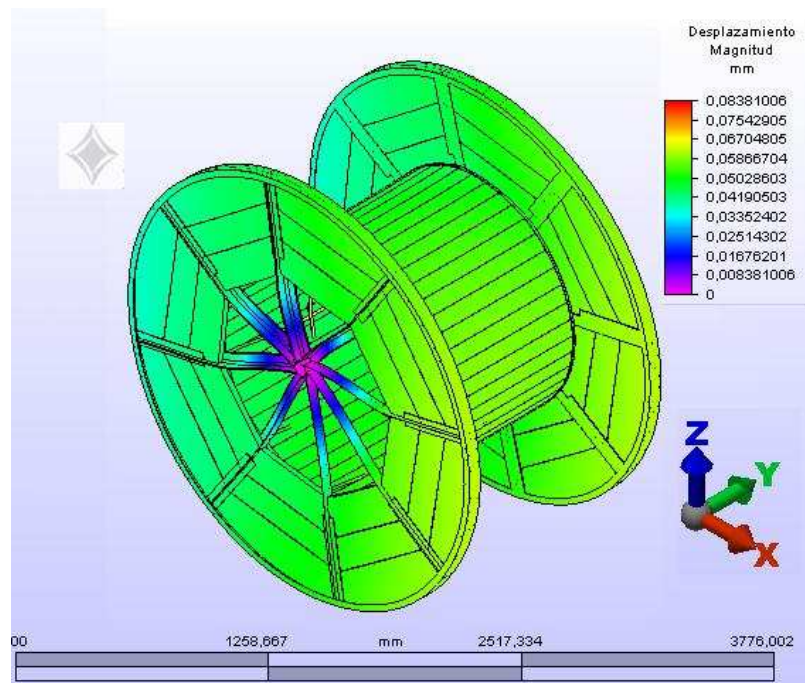
- **Tipo de carga.** La carga a la que fue sometido el carrete es la máxima carga para la cual fue diseñada esta referencia de carrete (6850 Kg), esta se ubico usando un cilindro hueco que se sitúa sobre el tambor del mismo; para garantizar

esta carga se calculo el volumen del cilindro a partir de la densidad del material y la masa. El cálculo del volumen necesario para garantizar la máxima carga a la que puede ser sometido el carrete se realizo en el ítem 5.1.

➤ **Resultados.** Con el fin de evaluar el comportamiento del carrete mixto No 24, se tomara los resultados de desplazamientos ocurridos en el, como también los esfuerzos a los que se encuentra sometido cuando se aplica la carga ejercida por el peso del cable, de acuerdo a esto se podrá obtener un factor de seguridad proporcionado por el software, el cual será muy útil para el análisis de estos resultados.

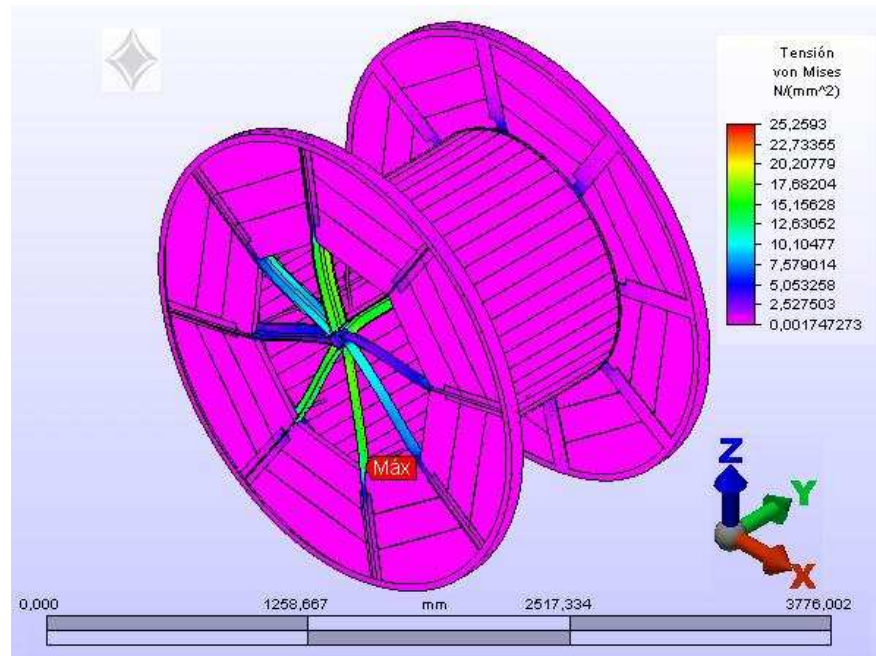
◆ **Desplazamiento (magnitud).** Los resultados suministrados por el software Algor, muestran que los desplazamientos se encuentran alrededor de 0,1, como se muestra en la figura 74.

Figura 74. Resultados de desplazamientos (Magnitud) para la condición 3.



◆ **Esfuerzos.** Los resultados de los esfuerzos se dan de acuerdo con la metodología de Von Mises por lo anteriormente especificado en el ítem 5.1. Los resultados se muestran en la figura 75, en la cual se puede observar que los máximos esfuerzos soportados se dan en los radios del carrete.

Figura 75. Resultados de los esfuerzos para la condición 3.



A continuación se muestra la respuesta a las cargas de los componentes madera y metal de forma independiente, enfatizando en los resultados de los esfuerzos de tensión y el desplazamiento, esto con el fin de interpretar que función cumple cada uno de estos materiales en el carrete mixto (madera-metal) No24. Una vez estudiada cada una de las condiciones a las cuales se encuentra sometido el carrete, se hará un análisis de estos resultados. (Ítem 5.5)

Figura 76. Resultados de los análisis en la madera para la condición 3.

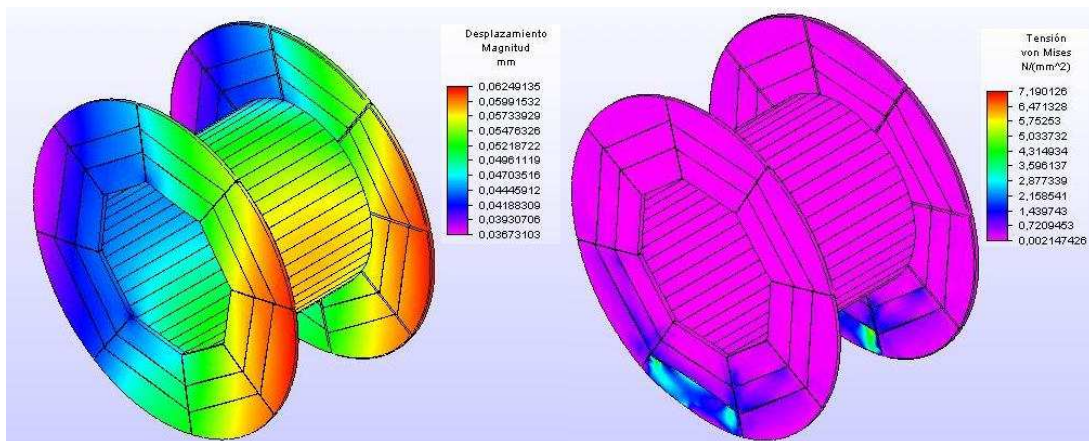
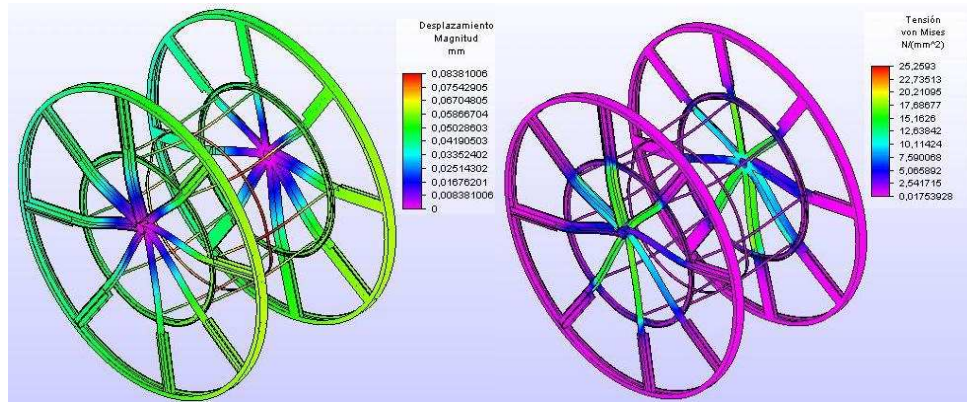


Figura 77. Resultados de los análisis en el acero para la condición 3.

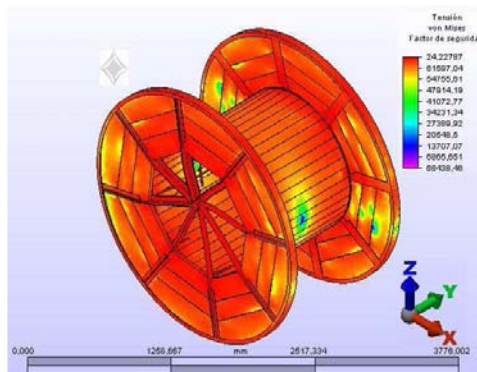


➤ **Análisis.** Para realizar un análisis completo es necesario tener en cuenta los máximos desplazamientos o deformaciones del modelo, como también los esfuerzos que se generan en éste debido a la carga soportada por el carrete.

Como se pudo observar en el análisis de desplazamientos del modelo el máximo desplazamiento se encuentra alrededor del 0,1 mm aproximadamente por lo tanto para este caso no es un factor influyente para el análisis, ya que el carrete podrá tener desplazamientos como este sin afectar su integridad, debido a que un desplazamiento como el mostrado en los resultados no es considerable si lo comparamos con las dimensiones del carrete.

Debido a que en este proyecto se trabajara con el método de diseño de von Mises, se confrontara los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos de tensión de von Mises con el esfuerzo ultimo de cada material.

Figura 78. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 3.



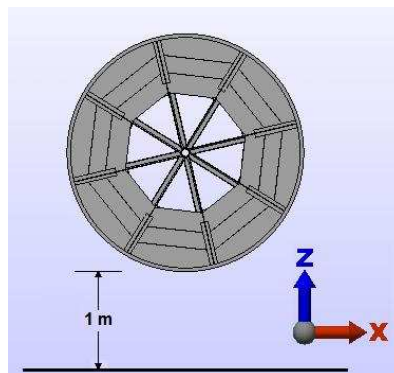
Como se puede observar en la figura 78, el mínimo factor de seguridad es de 24,22 lo que muestra que el máximo esfuerzo que se presenta en el carrete cuando se encuentra apoyado en sus bujes, es de 24 veces menor que el esfuerzo ultimo, por lo tanto se puede decir que el carrete mixto No 24 se encuentra bien diseñado para soportar su máxima carga cuando se encuentra montado en la máquina de embobinado. Es necesario pensar en que podría pasar cuando el carrete se pone en movimiento en esta máquina, debido al buen factor de seguridad mostrado por el software se puede decir que los esfuerzos aumentarían pero no sobrepasarán el esfuerzo último de los materiales de los cuales se encuentra construido el carrete mixto No 24.

5.4 CONSIDERACIÓN 4, CAÍDA DEL CARRETE DESDE UNA ALTURA DE 1 M.

Debido a las malas condiciones de trabajo al cual se encuentra sometido en ocasiones el producto, es necesario realizar el análisis de la caída del carrete desde cierta altura, caso que se puede presentar cuando los consumidores del producto no poseen herramientas para el desmonte de un vehículo de carga en el cual fue trasladado de un lugar a otro y por lo tanto tienden a dejarlo caer desde una altura aproximada a 1 m.

- **Tipo de análisis.** MES con modelos de material no lineales.
- **Tipo de restricciones.** Para esta condición la el tipo de restricción que se utilizo fue el de ubicar un plano de impacto el cual simule el piso, este fue ubicado a una distancia de 1m desde la parte inferior del carrete como se muestra en la Figura 79.

Figura 79. Plano de impacto a 1 m del carrete para la condición 4.



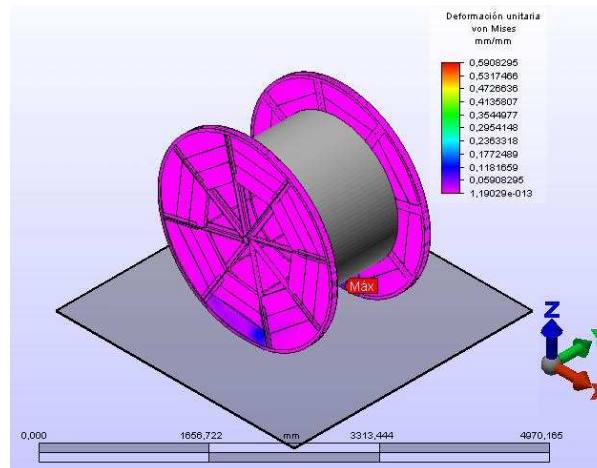
➤ **Tipo de carga.** La carga a la que fue sometido el carrete es la máxima carga para la cual fue diseñada esta referencia de carrete (6850 Kg), esta se ubico usando un cilindro hueco que se sitúa sobre el tambor del mismo; para garantizar esta carga se calculo el volumen del cilindro a partir de la densidad del material y la masa. El cálculo del volumen necesario para garantizar la máxima carga a la que puede ser sometido el carrete se realizo en el ítem 5.1.

➤ **Resultados.** Con el fin de evaluar el comportamiento del carrete mixto No 24, se tomara los resultados de desplazamientos ocurridos en el, como también los esfuerzos a los que se encuentra sometido cuando se aplica la carga ejercida por el peso del cable, de acuerdo a esto se podrá obtener un factor de seguridad proporcionado por el software, el cual será muy útil para el análisis de estos resultados.

◆ **Desplazamiento (magnitud).** Los resultados suministrados por el software no son validos como datos de estudio, debido a que el software toma el desplazamiento desde que el carrete cae de una altura de 1 m por lo tanto en este caso será necesario tomar como referencia de análisis los resultados de deformación unitaria.

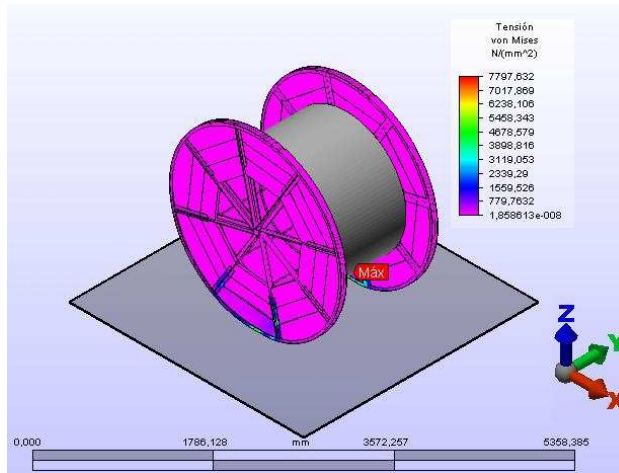
◆ **Deformación unitaria.** Las deformaciones unitarias que se presentan en el carrete cuando choca contra el piso después de caer de una altura de 1 m se presentan en la figura 80, la cual muestra que la mayor deformación unitaria que se presenta es de 0,59.

Figura 80. Deformaciones unitarias del carrete después de una caída libre de una altura de 1m.



♦ **Esfuerzos.** Los resultados de los esfuerzos se dan de acuerdo con la metodología de Von Mises por lo anteriormente especificado en el ítem 5.1. Los resultados se muestran en la figura 81, en la cual se puede observar que los máximos esfuerzos soportados se dan en la banda de rodamiento en la sección que hace contacto con el piso.

Figura 81. Resultados de los esfuerzos para la condición 4.



A continuación se muestra la respuesta a las cargas de los componentes madera y metal de forma independiente, enfatizando en los resultados de los esfuerzos de tensión y el desplazamiento, esto con el fin de interpretar que función cumple cada uno de estos materiales en el carrete mixto (madera-metal) No24. Una vez estudiada cada una de las condiciones a las cuales se encuentra sometido el carrete, se hará un análisis de estos resultados. (Ítem 5.5)

Figura 82. Resultados de los análisis en la madera para la condición 4.

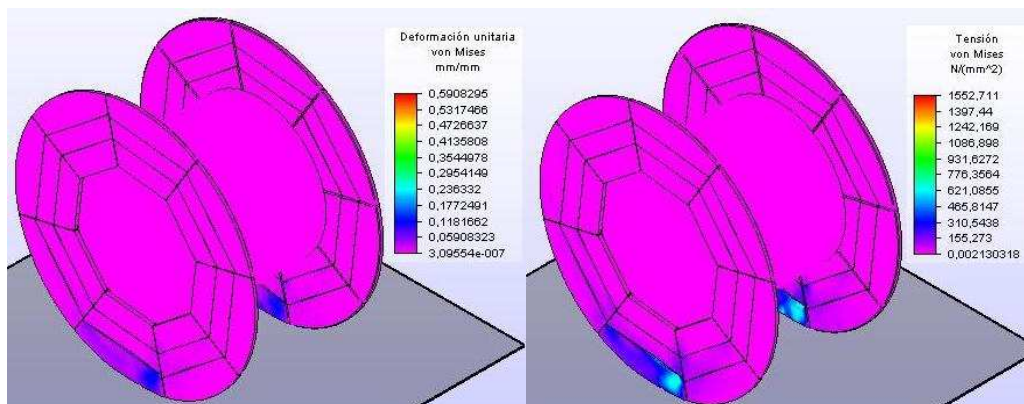
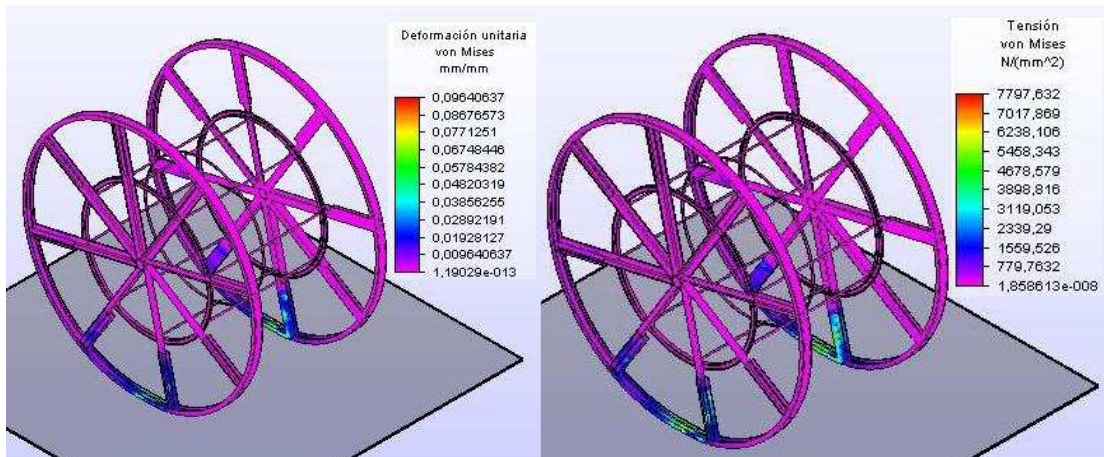


Figura 83. Resultados de los análisis en el acero para la condición 4.

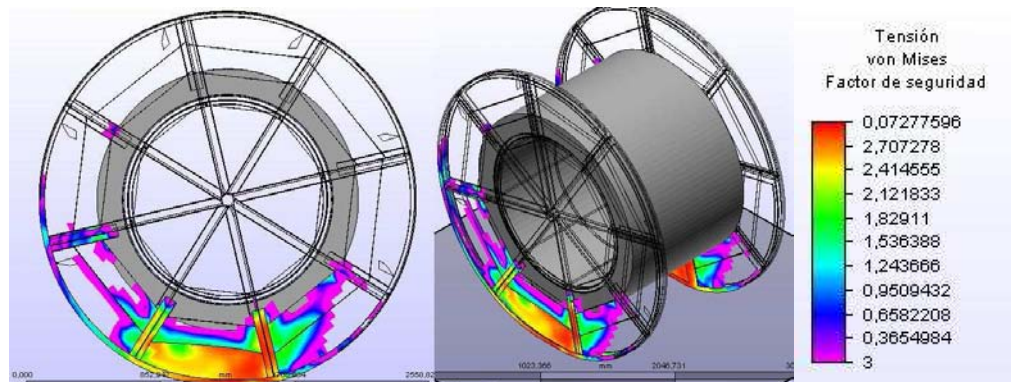


➤ **Análisis.** Para realizar un análisis completo es necesario tener en cuenta los máximos desplazamientos o deformaciones del modelo, como también los esfuerzos que se generan en éste debido a la carga soportada por el carrete.

Como se pudo observar en el análisis de deformaciones unitarias del modelo la máxima deformación se encuentra alrededor del 0,59 aproximadamente, por lo que si se compara esta deformación con la deformación unitaria del acero A36 obtenida en la prueba de tensión realizada en el ítem 4, en la que se puede observar que en la grafica esfuerzo-deformación unitaria (figura 27) la deformación máxima que el material puede alcanzar es de aproximadamente del 0,3, se puede decir que si el carrete cae de una altura de 1 m el material fallara, debido a que se superaría la mayor deformación unitaria que el material puede alcanzar.

Debido a que en este proyecto se trabajara con el método de diseño de von Mises, se confrontara los resultados obtenidos en el análisis de esfuerzos de tensión de von Mises con el esfuerzo ultimo de cada material. Los resultados de esta confrontación se pueden observar en la figura 84.

Figura 84. Factor de seguridad obtenido en el análisis por elementos finitos para la condición 4.



Como se puede observar el mínimo factor de seguridad es de 0,072 lo que muestra que el máximo esfuerzo que se presenta en el carrete cuando este se deja caer de una altura de 1 m, es mucho mayor que el esfuerzo ultimo, por lo tanto se puede decir que es muy probable que el carrete mixto No 24 falle por la zona de contacto, en la banda de rodamiento y por consecuencia fallaría también la tapa de madera, debido a esto se podría decir que el producto no se encuentra diseñado para soportar caídas como la anteriormente estudiada.

5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ELEMENTOS METAL-MADERA

En la siguiente tabla se puede observar los valores máximos obtenidos en los resultados de las simulaciones para cada una de ellas, en la cual se podrá realizar un análisis comparativo entre los elementos y así poder interpretar con mayor facilidad la función e importancia de cada uno de ellos.

Tabla 44. Resultados obtenidos para cada uno de los materiales que componen el carrete mixto No 24.

Caso	MADERA		METAL	
	Desplazamiento (mm)	Tensión (N/mm ²)	Desplazamiento (mm)	Tensión (N/mm ²)
1	1,093	7,19	1,093	65,697
2	9,817	4,06	9,817	38,317
3	0,062	2,965	0,084	25,259
4	Deformación Unitaria	Tensión (N/mm²)	Deformación Unitaria	Tensión (N/mm²)
	0,59	1552,711	0,096	7797,632

De acuerdo a los resultados que se han mostrado de los materiales que componen el carrete cuando este se encuentra sometido a las diferentes condiciones de trabajo analizadas anteriormente, se puede observar que la estructura metálica (Acero A36) es el elemento que soporta las mayores cargas, presentándose en ella también los mayores desplazamientos, también se puede concluir que los esfuerzos y desplazamientos mostrados en la madera indican que esta no se encuentra en el carrete para cumplir funciones de soporte de carga, sino esta tendrá una función mas de protección a la estructura y a el producto empacado en el carrete.

5.6 MODELO TEÓRICO.

Es importante validar los resultados obtenidos a partir del método de elementos finitos de esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad, por medio de otra metodología, en este caso con un modelo teórico de algunas partes específicas del carrete.

Para realizar el modelo teórico del carrete es necesario considerar la peor condición que se pueda presentar en el carrete y realizar una aproximación al modelo real, ya que con esta metodología se dificulta la simulación de todas las condiciones de trabajo, y del sistema como tal, de tal modo que si se analiza la situación más crítica se pueden garantizar los resultados para el resto de las condiciones de trabajo.

La aproximación del carrete para aplicar este modelo teórico se realizo considerando para el análisis del tambor una sección de este correspondiente a una duela, y la respectiva carga distribuida que actúa sobre esta, restringiéndola completamente en los extremos como realmente trabaja y evaluando su comportamiento crítico el cual sería la condición de flexión.

Para el análisis de la estructura del carrete se considero la condición más crítica para el carrete que sería cuando todo la carga del cable actúa sobre un radio en cada tapa de este, de tal forma que estos estén dispuestos de forma vertical y se puedan aproximar a una columna empotrada en los dos extremos.

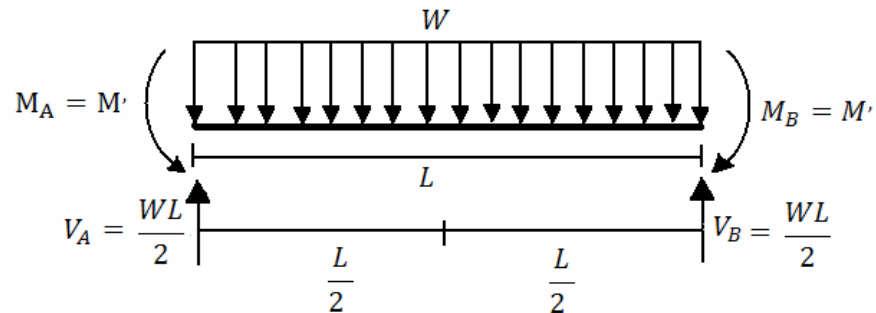
De esta forma a continuación se presenta el análisis de cada una de estas situaciones aplicando los conceptos de ingeniería mecánica correspondientes a la resistencia de materiales y al diseño mecánico.

➤ **Modelo teórico para el tambor.** Inicialmente se debe calcular la carga correspondiente a la sección del tambor seleccionada; El peso total del cable que soporta el tambor es de 6850kg, el cual en el Algor se distribuyo equitativamente entre los nodos del tambor, los cuales son en total 12890 de modo que a cada nodo le corresponde una carga de 0,531 Kg y si se tiene en cuenta que a cada duela le corresponden 293 nodos, la carga sobre cada duela será de 155,68 Kg que corresponden a 1527,23 N.

Esta carga no se puede aplicar de forma puntual sino uniformemente distribuida en la sección del tambor, la cual tiene una longitud de 1,2 m por lo cual esta sería de 1272,69 N/m.

En la figura 85 se presenta el diagrama de cuerpo libre de esta aproximación.

Figura 85. Diagrama de cuerpo libre de la aproximación del tambor.



Donde:

$$W = 1272,69 \text{ N/m.}$$

$$L = 1,2\text{m}$$

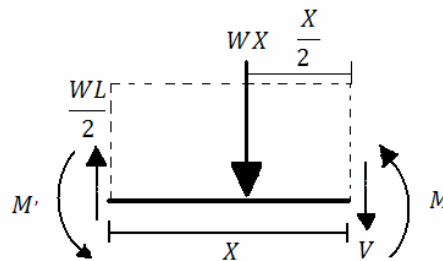
Al realizar la sumatoria de fuerzas en Y se encuentran los valores de las reacciones V_A y V_B lo cuales se pueden obtener gracias a la simetría del sistema.

$$V_A = V_B = \frac{WL}{2} = \frac{(1272,69 \text{ N/m})(1,2 \text{ m})}{2} = 763,615 \text{ N}$$

Al realizar la sumatoria de momentos se puede identificar que este es un problema estáticamente indeterminado, por lo cual es necesario abordarlo con la metodología de deflexión en vigas y ejes aplicando el cálculo de la pendiente y desplazamiento por integración.

Se toma un tramo de la sección como se muestra en la figura 86, se realiza la sumatoria de momentos en el punto de corte y se expresa M como M^I .

Figura 86. Diagrama de cuerpo libre en la sección de corte.



$$M_A = M_B = M^I$$

$$\sum M = 0 = M + \frac{Wx^2}{2} - \frac{WLx}{2} + M^I$$

$$M = \frac{WLx}{2} - \frac{Wx^2}{2} - M^I$$

Aplicando la ecuación de la metodología de deflexión en vigas y ejes, en función de la ecuación de momento obtenida para este caso en particular e integrando dos veces se tiene lo siguiente:

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

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{WLx}{2} - \frac{Wx^2}{2} - M^l$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{WLx^2}{4} - \frac{Wx^3}{6} - M^l x + c_1$$

$$EIV = \frac{WLx^3}{12} - \frac{Wx^4}{24} - \frac{M^l x^2}{2} + c_1 x + c_2$$

Una vez se tiene esta ecuación de la deflexión en función de la longitud es necesario evaluar las condiciones de frontera que se presentan en este sistema.

La deflexión debe ser cero en los extremos de la viga, ya que en estos puntos esta empotrada, de tal forma que:

Cuando $V=0$ y $X=0$

$$EI \times 0 = \frac{WL \times 0}{12} - \frac{W \times 0}{24} - \frac{M^l \times 0}{2} + c_1 \times 0 + c_2$$

$$c_2 = 0$$

De igual forma el valor de la pendiente debe ser cero en estos puntos, de tal forma que:

$$\text{Cuando } X = 0 \text{ y } \frac{dy}{dx} = 0$$

$$EI \times 0 = \frac{WL \times 0}{4} - \frac{W \times 0}{6} - M^1 \times 0 + c_1$$

$$c_1 = 0$$

Cuando $X = L$ y $V = 0$, de tal forma que :

$$EI \times 0 = \frac{WL^4}{12} - \frac{WL^4}{24} - \frac{M^1 L^2}{2} + 0 + 0$$

$$EI \times 0 = \frac{WL^4}{12} - \frac{WL^4}{24} - \frac{M^1 L^2}{2} + 0 + 0$$

$$0 = \frac{WL^4}{24} - \frac{M^1 L^2}{2}$$

$$0 = \frac{L^2}{2} \left(\frac{WL^2}{12} - \frac{M^1}{2} \right)$$

$$M^1 = \frac{WL^2}{12}$$

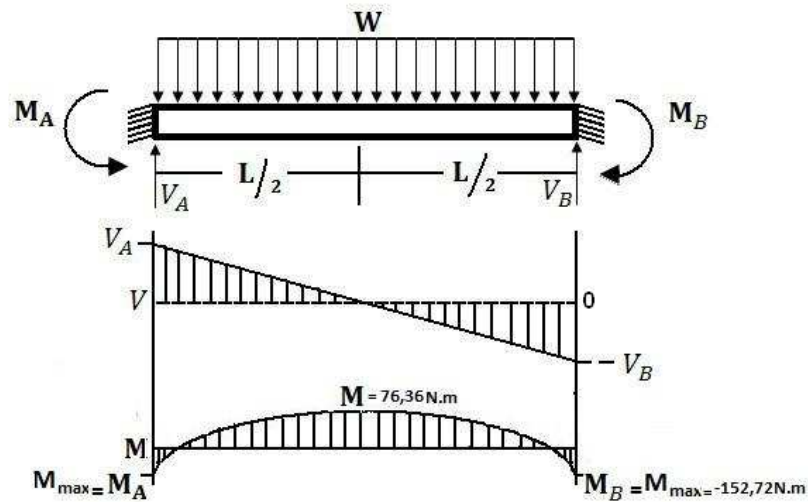
Es posible comprobar que la condición de $V=0$ cuando $X=L$ se satisface completamente pero en este caso no es necesario evaluarla porque ya han sido encontradas todas las incógnitas.

Reemplazando en esta ecuación se pueden obtener los valores de momento en los extremos de la viga.

$$M^1 = \frac{(1272,69 \text{ N/m})(1,2\text{m})^2}{12} = 152,72 \text{ Nm}$$

Al conocer todos los valores es posible realizar los diagramas de cortante y momento para obtener a partir de estos el momento máximo soportado por la viga.

Figura 87. Diagrama de cortante y momento flector.



Una vez obtenido el valor del momento máximo se calcula el esfuerzo máximo soportado por la viga a partir de la ecuación de flexión.

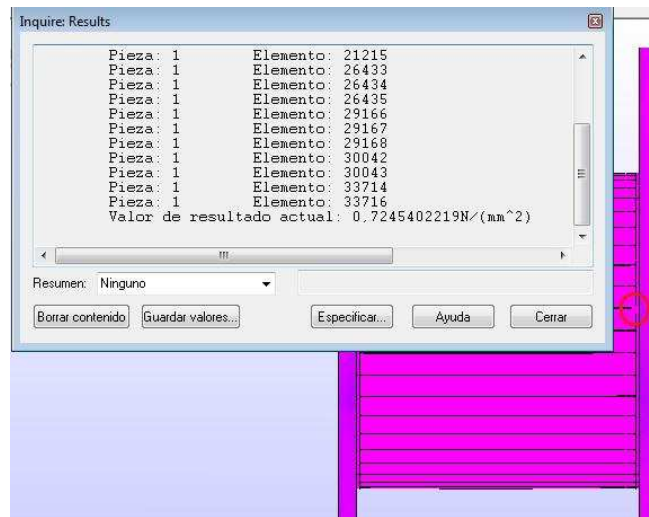
$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(1,2\text{m})(0,034\text{m})^3}{12} = 3,93e^{-6} \text{ m}^4$$

$$\sigma = \frac{(152,72\text{Nm})(0,017\text{m})}{3,93e^{-6} \text{ m}^4} = 660620,86 \text{ Pa} = 0,660 \text{ N/mm}^2$$

Este valor corresponde al máximo esfuerzo presentado en el tambor según el modelo teórico, y se compara con el valor obtenido por el método de elementos finitos el cual es de $0,7245 \text{ N/mm}^2$. Como se puede ver en la figura 88.

Figura 88. Valor del máximo esfuerzo en el tambor por el método de elementos finitos.



Por lo cual es posible validar la metodología de los elementos finitos ya que la diferencia entre estos valores es de 9,77%, lo cual es un valor aceptable teniendo en cuenta que el modelo teórico se hace con base en una aproximación del sistema real.

➤ **Modelo teórico para los radios.** Inicialmente se debe calcular la carga que soportara la columna en la condición más crítica es decir todo el peso del cable sobre dos radios.

$$P_{\max} = \frac{(6850\text{kg})(9.81\text{m/s}^2)}{2} = 33599,25\text{N}$$

Figura 89. Diagrama de la columna.



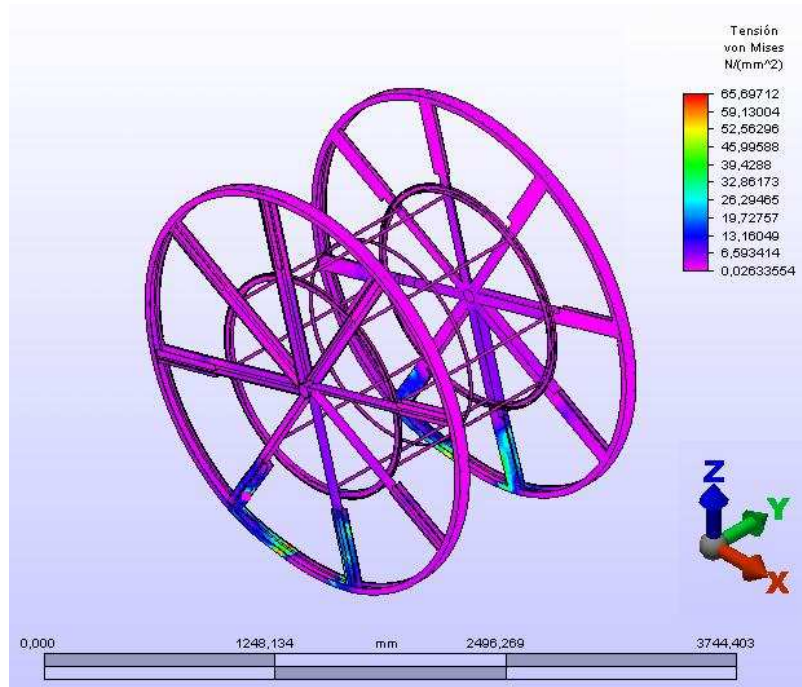
Donde $F = P_{\max} = 33599,25N$

Se considera el área del radio de $4,612 \times 10^{-4}m^2$ la cual se obtuvo del catálogo de perfiles del software ALGOR y aplicando la ecuación enunciada por la teoría para columnas se obtiene el valor del esfuerzo de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{33599,25N}{4,612 \times 10^{-4}m^2} = 7,283 \times 10^7 Pa = 72,83N/mm^2$$

Este valor corresponde al máximo esfuerzo presentado en los radios según el modelo teórico, y se compara con el valor obtenido por el método de elementos finitos el cual es de $65,69 N/mm^2$.

Figura 90. Esfuerzos obtenidos en la estructura por el método de elementos finitos.



Por lo cual es posible validar la metodología de los elementos finitos ya que la diferencia entre estos valores es de 9,8%, lo cual es un valor aceptable teniendo en cuenta que el modelo teórico se hace con base en una aproximación del sistema real.

5.7 PROPUESTA DE REDISEÑO.

A pesar de los buenos resultados obtenidos en los análisis por elementos finitos para los tres casos de carga estática, es importante ofrecer al cliente una propuesta de diseño mecánico que satisfaga al mismo, y que no afecte considerablemente la funcionalidad del carrete.

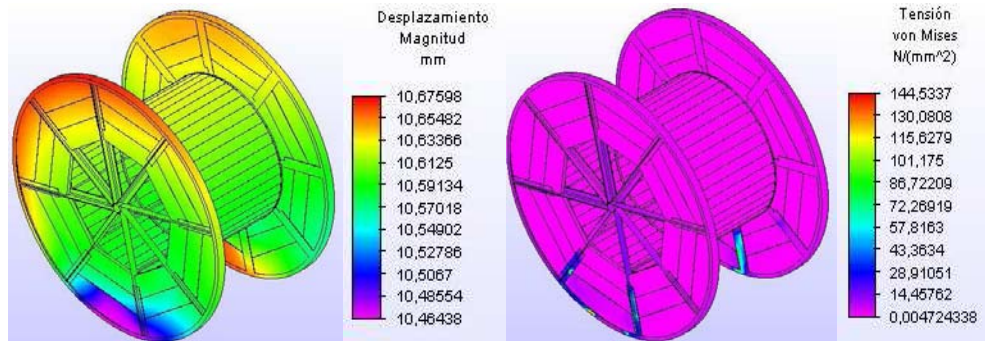
Debido a lo concluido en el ítem 5.5, acerca de la funcionalidad de cada uno de los materiales, se conoce que la función primordial de la madera es la de proteger el cable, debido a esto es importante enfocar el rediseño del carrete a la estructura metálica ya que esta es la que soportara las cargas experimentadas por el carrete.

En un principio se quiso cambiar todos los perfiles que componen el carrete mixto No 24, tanto las canales en U que componen las bandas de rodamiento como los perfiles en L que constituyen los radios; debido a que no es fácil encontrar un perfil en U con menor área y dimensiones que las del perfil utilizado en el carrete, se opto por realizar el cambio en los perfiles en L, sustituyendo los perfiles de dimensiones $3/16 \times 2 \frac{1}{2}$ in, por perfiles de $3/16 \times 2$ in, lo cual reducirá el peso del carrete, se ahorrará costos de fabricación por ser un perfil más pequeño y se le dará al cliente una nueva opción en caso de tener problemas para obtener los perfiles estándares del carrete mixto No 24.

➤ **Análisis por elementos finitos del carrete propuesto.** Este análisis se realizó para el caso más crítico observado anteriormente en el cual el carrete se encuentra apoyado sobre sus bandas de rodamiento, teniendo solamente dos puntos de apoyo, por lo cual si cumple con esta condición de trabajo, también cumplirá en las demás condiciones de trabajo a las cuales se encuentra sometido el carrete.

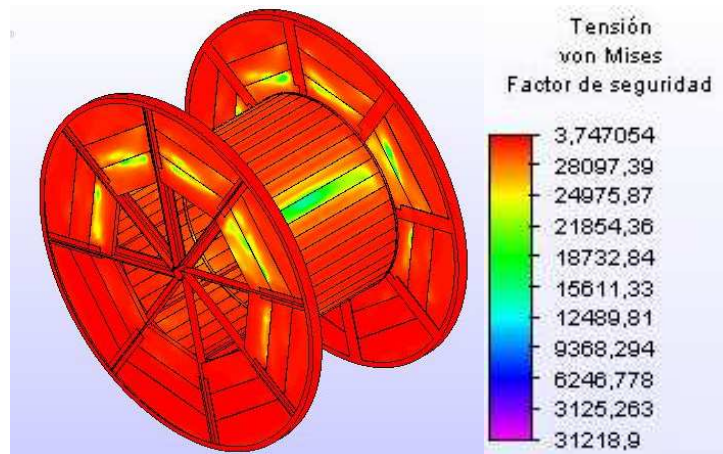
En la siguiente grafica se puede observar los esfuerzos soportados por el nuevo producto, como también los desplazamientos presentados en él.

Figura 91. Resultados obtenidos para el carrete propuesto.



Es probable que debido a que los perfiles del carrete propuesto son más pequeños los desplazamientos se hayan aumentado, ya que podrían tender a pandearse más fácil, pero si se observa la grafica de tensión, se puede ver que los esfuerzos no sobrepasan el esfuerzo último ni el esfuerzo de fluencia del material obteniendo un factor de seguridad por la metodología de Von Mises de 3,74 como se observa en el figura 92.

Figura 92. Factor de seguridad para el carrete propuesto.



Este factor de seguridad muestra claramente que el carrete puede ser construido con estos nuevos perfiles sin afectar considerablemente la funcionalidad del carrete, siendo confiable para el usuario del producto.

6. CONCLUSIONES

- Mediante la metodología de diseño QFD se logró cualificar y cuantificar los parámetros más relevantes para el cliente en cuanto al diseño del carrete mixto No 24, estos son la masa total, el material del cual se encuentra fabricado, las deformaciones ocasionadas por esfuerzos generados en él y el porcentaje de humedad si este se encuentra fabricado en madera.
- Al describir y evaluar el proceso de fabricación del carrete mixto No 24, se obtuvo características detalladas muy importantes de este proceso, las cuales permitieron realizar un modelo 3D del carrete, adecuado para los análisis por elementos finitos.
- Se realizaron pruebas a los materiales con el fin de conocer las propiedades mecánicas de cada uno de estos, obteniendo resultados satisfactorios tanto para el acero A 36 como para la madera Sajo, los cuales se suministraron al software Algor para realizar un análisis por medio del método de los elementos finitos más aproximado a el producto real.
- Es muy importante concluir que el modelo computacional del carrete mixto No 24, estudiado por el método de elementos finitos, arrojó resultados satisfactorios en cuanto al diseño estructural de este, debido a que la estructura se encuentra bien diseñada para soportar la máxima carga requerida en las condiciones estáticas a las que se realizó el análisis. Por lo contrario de acuerdo al análisis realizado en la condición de caída libre, la cual se presenta frecuentemente, no es recomendable que los usuarios del carrete mixto realicen esta acción.
- Se realizó un rediseño del carrete mixto No 24 que cumple con las condiciones de trabajo requeridas, sin causar grandes alteraciones en su funcionalidad.

7. RECOMENDACIONES

- Es importante tener en cuenta que la variación de los componentes químicos pueden causar variación en las propiedades físico-mecánicas de los materiales, debido a esto se recomienda hacer una revisión constante de el porcentaje de cada componente del acero A36, la cual se puede obtener del análisis químico suministrado por la empresa proveedora.
- Una vez realizado el análisis del comportamiento mecánico del carrete mixto (madera-metal) No24, se concluyo que el carrete se encuentra bien diseñado, pero a pesar del buen desempeño mostrado por los materiales que componen el producto, se recomienda utilizar perfiles de 3/16 x 2in, en caso de no contar con los perfiles estándares del carrete mixto No 24 y un material que sustituya la madera, por otro que no tenga problemas económicos, ambientales como la madera y además que contribuya con la fácil manufactura de este.

BIBLIOGRAFÍA

Acero ASTM A-36 (NTC 1920) [en línea]: Ficha técnica. Manizales: ACASA S.A, 2008. [Consultado 04 de Mayo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.acasa.com.co/productos/index.htm>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2008. 28 p. ASTM E23

_____. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2008. 36 p. ASTM E18

_____. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM, 2008. p. 25. ASTM E8/E8M

AREVALO, Rosven y LONDOÑO, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima: Sajo. Ibagué: AREVALO y LONDOÑO, 2005. 161 p.

Desarrollo tecnológico para fabricar carretes para empaque de cables, utilizando como materia prima tetra pak de origen post-industrial y post-consumo en sustitución de madera de bosque nativo [en línea]: Metodología de diseño. Santiago de Cali: Grupo de Investigación en Tecnologías para la Manufactura, 2008. [Consultado 10 de abril de 2008]. Disponible en Internet: <http://augusta.uao.edu.co/gitem/proyectos.html>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación del contenido de humedad para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2005. 3 p. NTC 206-1

_____. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1974. 5 p. NTC 784

_____. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1974. 5 p. NTC 785

_____. Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1969. 2 p. NTC 633

_____. Maderas. Determinación de la tenacidad. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1983. 7 p. NTC 1823

_____. Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1975. 6 p. NTC 944

_____. Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1975. 5 p. NTC 961

_____. Maderas. Ensayos con probetas pequeñas. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1992. 78 p. NTC 3377

_____. Maderas. Medición directa del contenido de humedad en la madera y materiales a base de madera. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2005. 16 p. NTC 206-2

_____. Maderas. Requisitos de las probetas pequeñas para los ensayos físicos y mecánicos de la madera. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1969. 2 p. NTC 301

_____. Maderas. Tableros de fibra. Determinación de la resistencia a la flexión. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1991. 5 p. NTC 2912

_____. Maderas. Toma de muestras para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1974. 5 p. NTC 787

_____. Materiales metálicos. Ensayo de dureza. Ensayo superficial Rockweel (Escala 15N, 30N, 45N, 15T, 30T, 45T). Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 1996. 10 p. NTC 3996

Modelado de secciones mixtas de hormigón-madera utilizando el Método de Elementos Finitos [en línea]. Chaco: U.N.N.E, 2004. [Consultado 20 de Agosto de 2008]. Disponible en Internet:
www.unne.edu.ar/Web/cyt/com2004/7-Tecnologia/T-008.pdf

Notas de clase de ingeniería asistida por computador. Profesor Héctor E. Jaramillo, MSc., Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, 2007

Quality function development (QFD) [en línea]: Despliegue de la función de calidad. Oaxaca: Instituto de innovación y calidad gubernamental, 2006. [Consultado 15 de abril de 2008]. Disponible en Internet:
http://www.eoaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI.

Recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla [en línea]. Monterrey: Tecno JAR S.A, 2006. [Consultado 26 de julio de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.tecnojar.com/tecnoshop/>

SKAKOON, James g. Detailed mechanical design: a practical guide. EE.UU: American Society of Mechanical Engineers, 2000. 216 p

T. CHANDRUPATLA, A. BELEGUNDU. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. 2 ed. México: Prentice Hall editores, 1999. 462 p

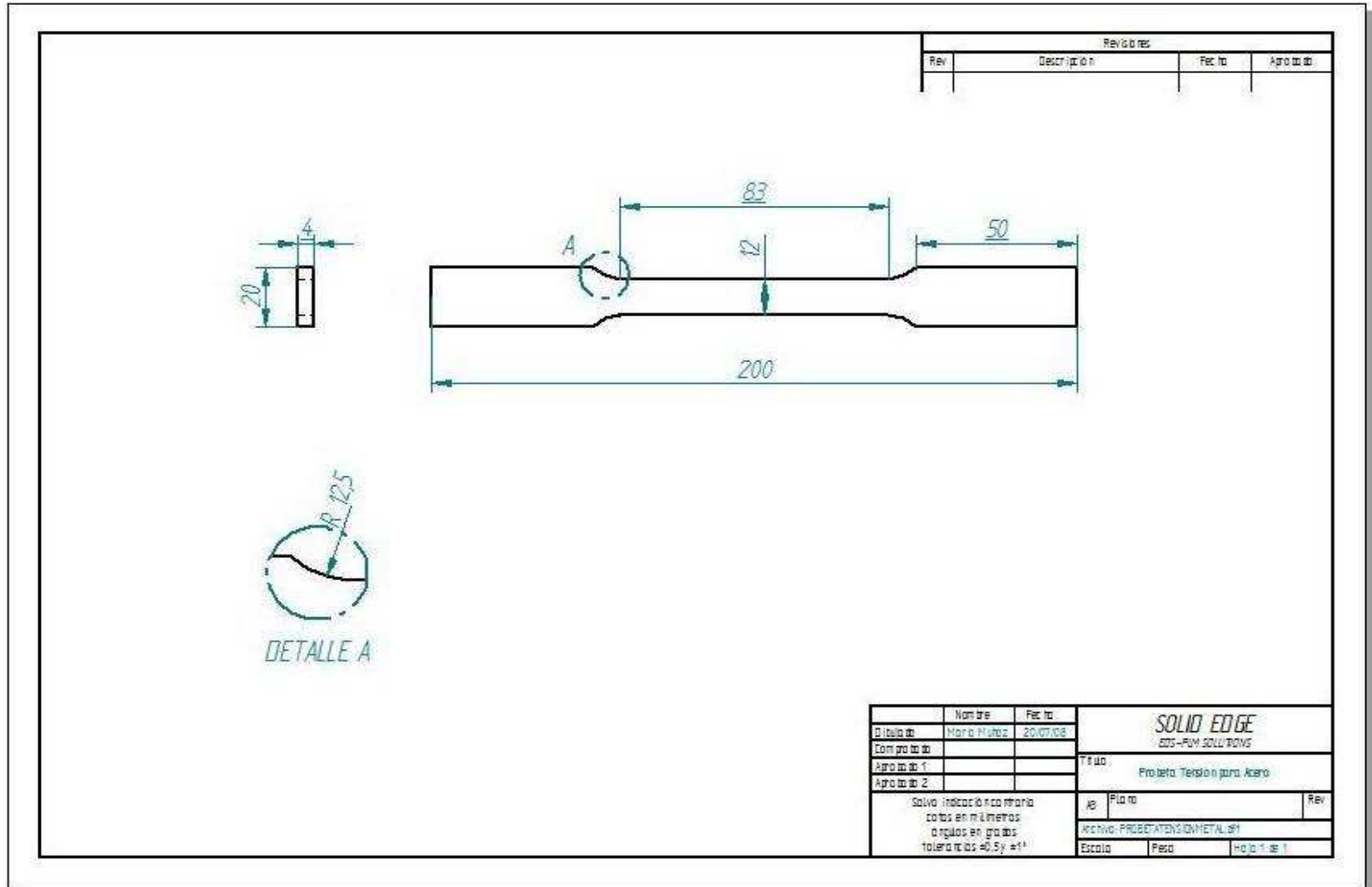
ANEXOS

Anexo A. Encuesta para evaluar la calidad de los carretes no. 24

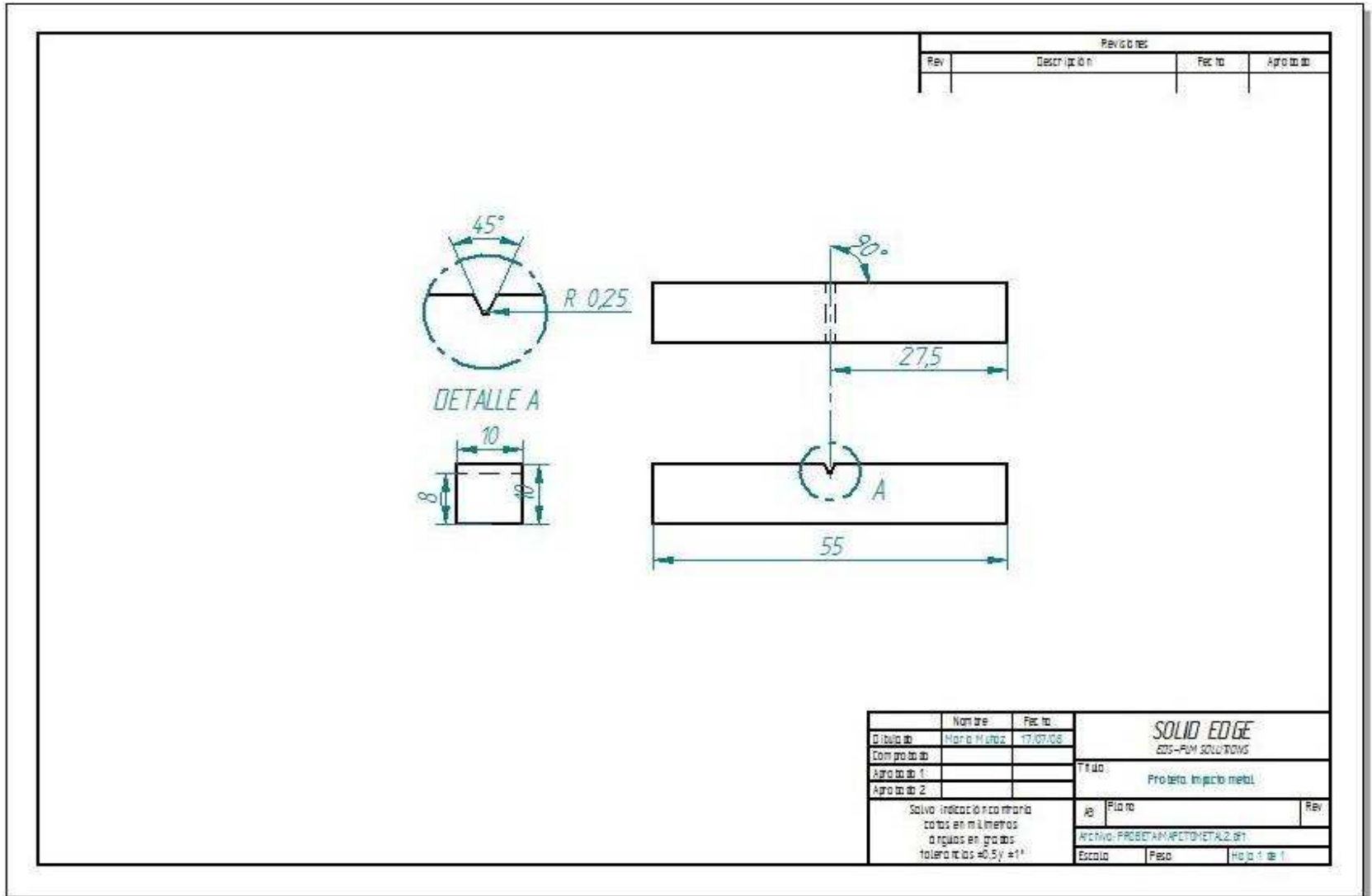
Evaluar para cada ítem la necesidad propuesta dando un nivel de importancia de 1 a 5, siendo 5 para una característica muy importante y 1 para una de menor importancia.

No	NECESIDAD	Importancia de 1 a 5
1	El carrete es fácil de reparar	
2	El carrete es liviano	
3	El carrete no le afecta el agua.	
4	El carrete es muy duradero	
5	El carrete es fácil de transportar	
6	El carrete es rígido	
7	El carrete es resistente al impacto	
8	El carrete soporta caídas	
9	El carrete soporta cargas considerables según su referencia.	
10	El carrete es resistente a la corrosión	
11	El carrete no afecta la integridad del producto empacado en el	
12	El carrete facilita el empaque del producto	
13	El carrete permite realizar pruebas al producto	
14	El carrete soporta altas temperaturas	
15	El carrete es de fácil ensamble.	
16	El carrete requiere tiempos de fabricación cortos	
17	El carrete es económico	
18	El carrete se fabrica en material reciclable.	
19	El carrete es visualmente estético	
20	El carrete esta protegido contra las bacterias	

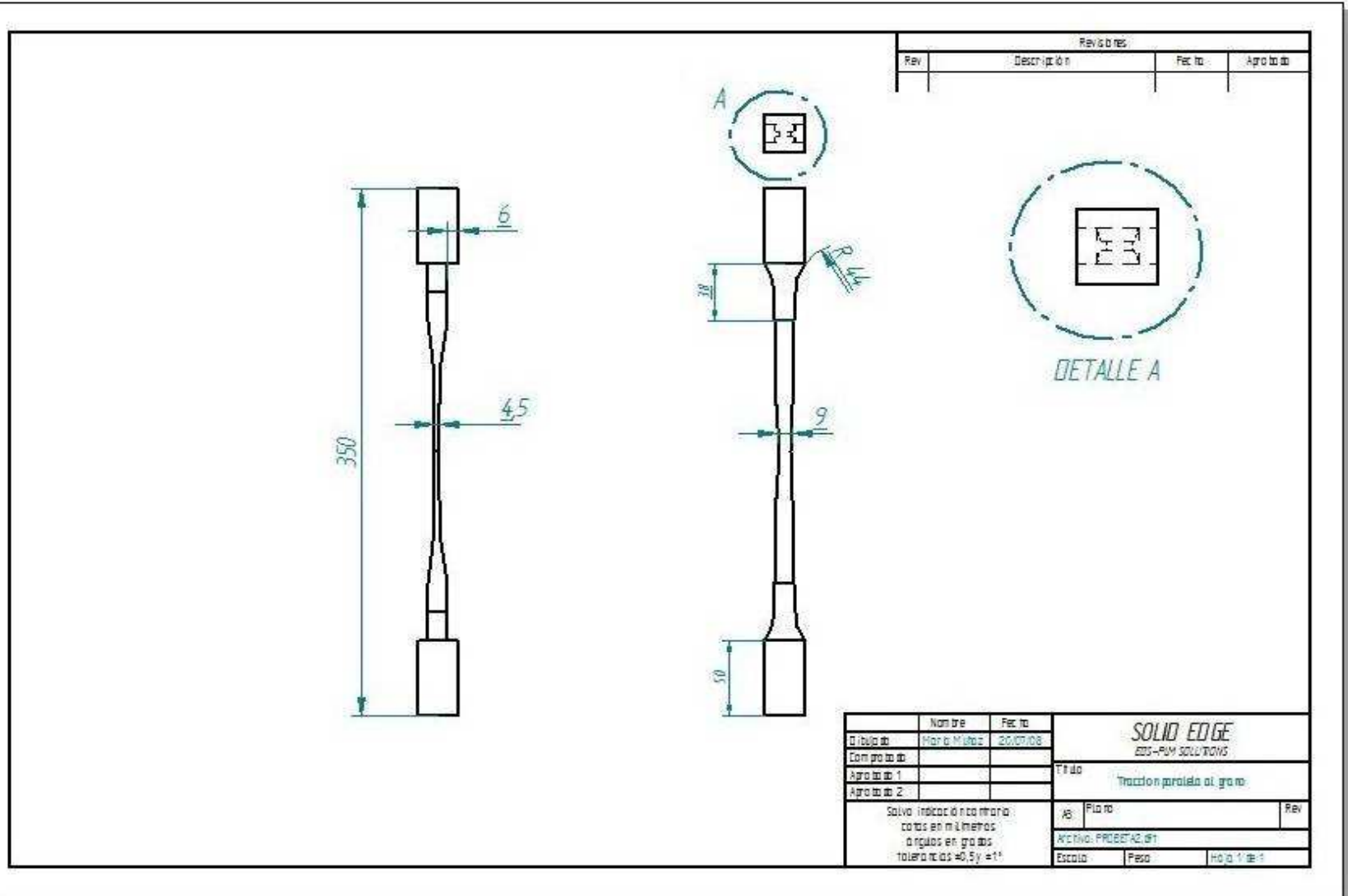
Anexo B. Plano de probeta para prueba de tracción, material acero.



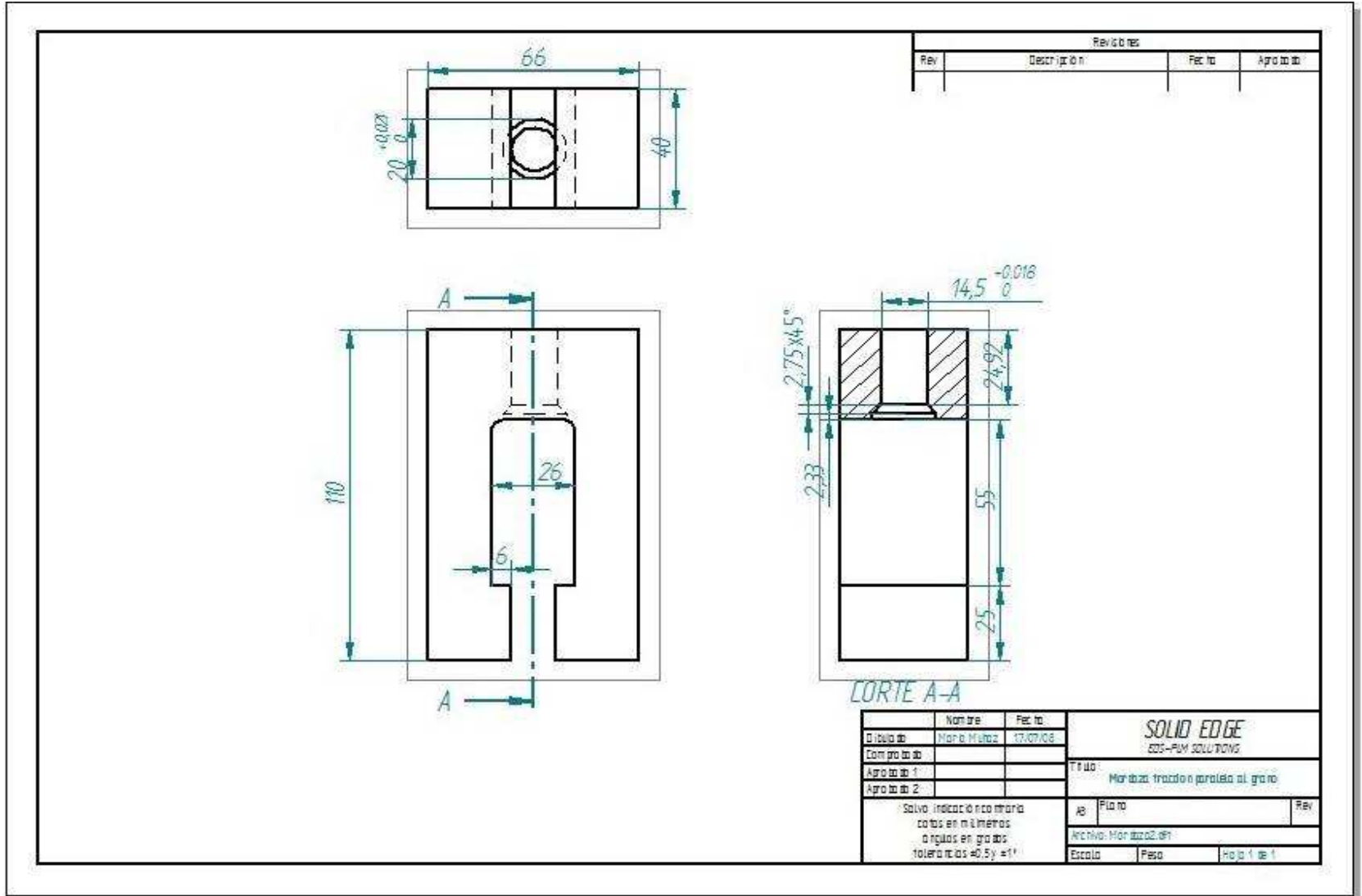
Anexo C. Plano de probeta para prueba de impacto.



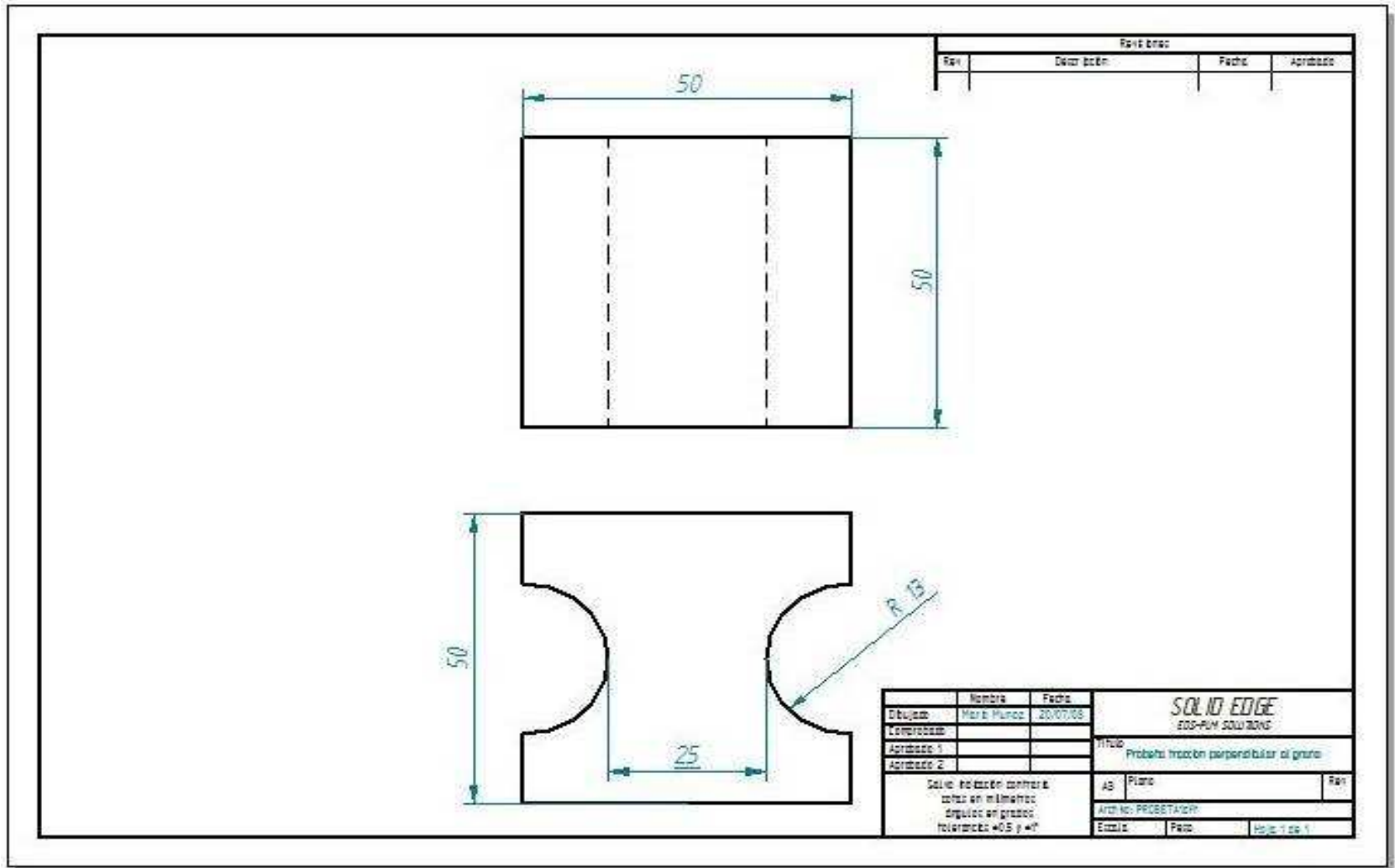
Anexo D. Plano de probeta para prueba de tracción de madera paralelo al grano.



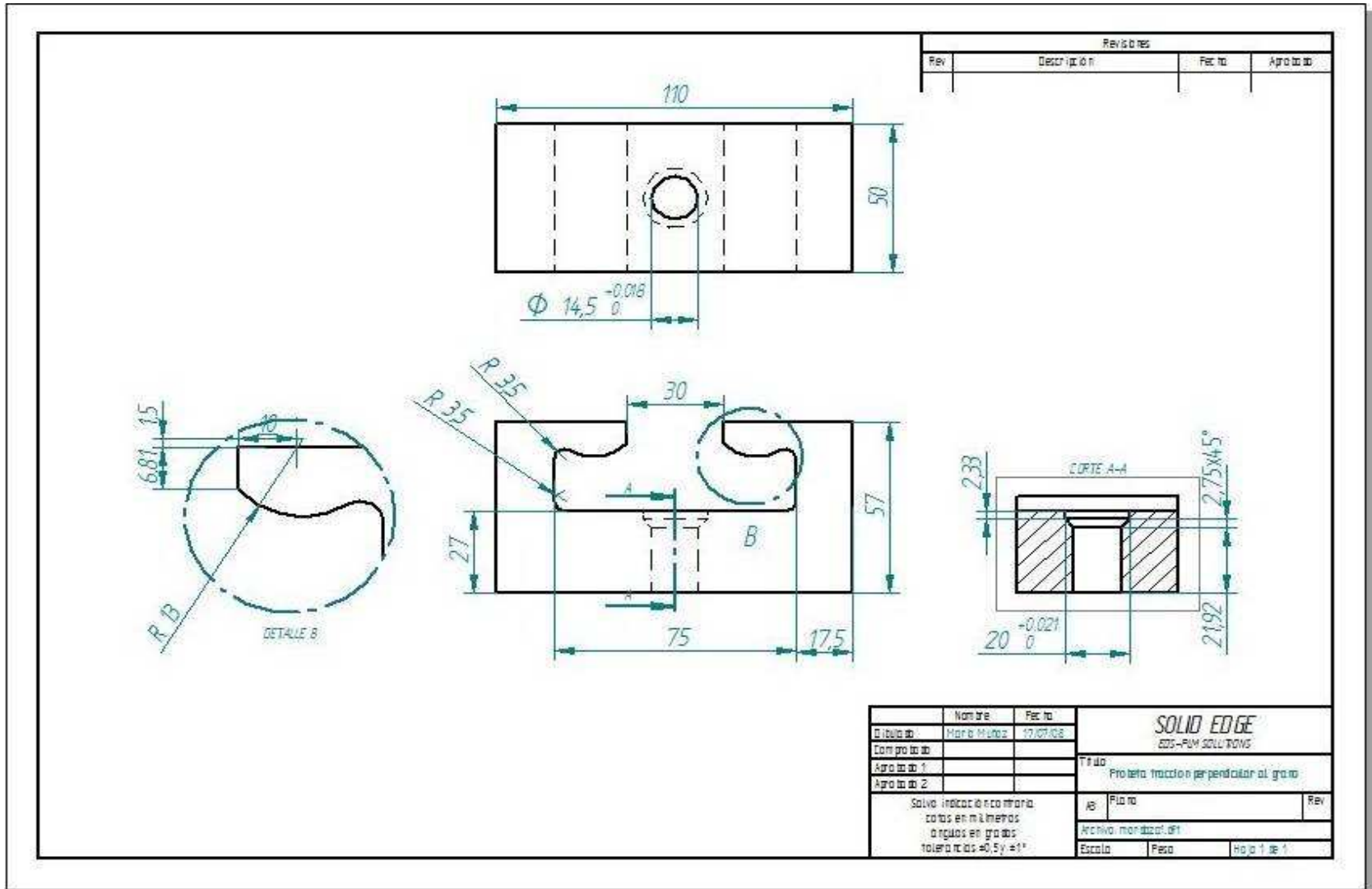
Anexo E. Plano mordaza para prueba de tracción de madera paralelo al grano.



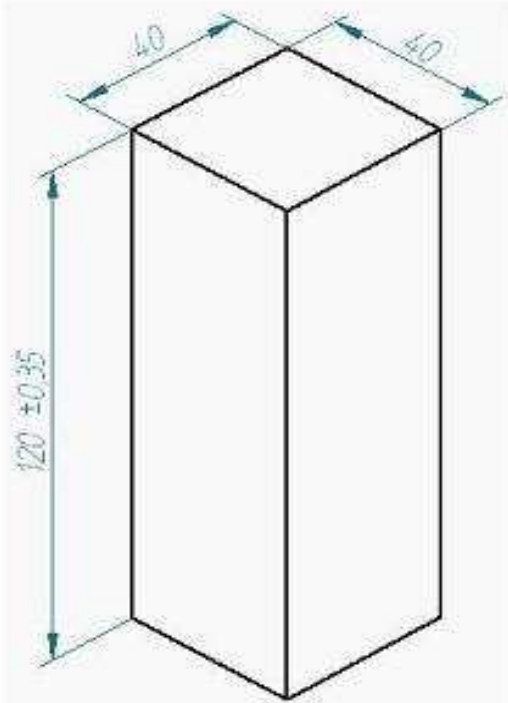
Anexo F. Plano de probeta para prueba de tracción de madera perpendicular al grano.



Anexo G. Plano mordaza para prueba de tracción de madera perpendicular al grano.



Anexo H. Plano de probeta para prueba de compresión de madera perpendicular al grano.

		Revisión					
		Rev.	Descripción	Fecha	Aprobado		
<p style="font-size: small;"> Salvo indicación contraria: todas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y ± 0.1 </p>		SOL NO EDGE 605-PUN SOLU BMS		TÍTULO			
		Dibujo: Madera Munda 20/07/08		Prueba compresión paralela al grano			
		Comprobado:		AS		Plano	
		Aprobado 1: Aprobado 2:		Archivos: prueba compresión.PPT		Rev.	
		Emitido:		Fecha:			

Anexo I. Plano de probeta para prueba de flexión de madera perpendicular al grano.

