

**ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE DE MADERA
No. 24 PARA EMPAQUES DE CABLES**

MABEL ANGELICA RAMOS LUCUMI

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

**ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN CARRETE DE MADERA
No. 24 PARA EMPAQUES DE CABLES**

MABEL ANGELICA RAMOS LUCUMI

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico.

**Director
MIGUEL ÁNGEL HIDALGO
Ingeniero Mecánico, MSc.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
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.

HÉCTOR ENRIQUE JARAMILLO S.
Jurado

CARLOS HERNÁN APONTE C.
Jurado

Santiago de Cali, 4 de Diciembre de 2008

AGRADECIMIENTOS

Al grupo de investigación de Tecnologías para Manufactura, GITeM, por sugerir y patrocinar este proyecto de investigación en conjunto con la empresa de Recuperados y Servicios Industrial, RSI Ltda.

Agradezco a la empresa Centelsa S.A. y a sus compañías proveedoras de carretes de madera por permitir realizar la investigación de campo para este proyecto y así plantearlo con un punto de vista más industrial.

Y al personal de los laboratorios de materiales, mecánica de sólidos y de proceso manufactura de la Universidad Autónoma de Occidente por el profesionalismo y dedicación que le prestaron al desarrollo de cada uno de los ensayos mecánico que fue necesario realizar.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. ANTECEDENTES	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	19
3.1. OBJETIVO GENERAL	19
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
4. METODOLOGÍA	20
5. DISEÑO DEL CARRETE DE MADERA No. 24	21
5.1 REQUERIMIENTOS DE FABRICACIÓN DE UN CARRETE DE MADERA (DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD, Q.F.D.)	21
5.1.1 Objetivos del D.F.D.	21
5.1.2 Resultados y Análisis	25
5.2 PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE UN CARRETE DE MADERA No. 24 (DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN)	28
5.2.1 Materiales que conforman el carrete de madera No. 24	28
5.2.2 Secuencia de mecanizado y ensamble	29
5.2.3 Dibujo CAD del carrete de madera No 24	31
6. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA	32
6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	32

	Pág.
6.2 PRUEBAS MECÁNICAS	33
6.2.1 Ensayo de tracción	33
6.2.2 Ensayo de compresión	44
6.2.3 Ensayo de flexión	49
6.2.4 Ensayo de impacto	52
6.2.5 Prueba para determinación de la densidad	55
7. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS	57
7.1 CREACIÓN DE UNA GEOMETRÍA	58
7.2 GENERACIÓN DE UNA MALLA	59
7.3 ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS	60
7.3.1 Situación 1: Colocado sobre el suelo	60
7.3.2 Situación 2: Suspendido sobre un eje	61
7.3.3 Situación 3: Transportado por un montacargas	62
7.3.4 Situación 4: Caídas	63
7.4 DEFINICIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS	65
7.4.1 Análisis lineal estático de esfuerzos	65
7.4.2 Análisis no lineal estático de esfuerzos	66
7.5 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS	66
7.5.1 Resultado del esfuerzo o tensión del carrete de madera No. 24	67
7.5.2 Resultados del factor de seguridad del carrete de madera No. 24	71
7.5.3 Resultados del desplazamiento del carrete de madera No. 24	75

	Pág.
8. MODELO TEÓRICO	79
8.1 ANÁLISIS DEL TAMBOR	80
8.1.1 Análisis teórico del tambor	80
8.1.2 Análisis por elementos finitos del tambor	86
9. PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL CARRETE DE MADERA No. 24 PARA EMPAQUE DE CABLES	87
10. CONCLUSIONES	88
11. RECOMENDACIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	93

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Encuesta realizada a expertos en el tema de carretes de madera.	22
Tabla 2. Notación para evaluar el nivel en la matriz de relaciones	24
Tabla 3. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano.	37
Tabla 4. Resultados del módulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano.	38
Tabla 5. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano.	38
Tabla 6. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano.	42
Tabla 7. Resultados del módulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano.	43
Tabla 8. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano.	45
Tabla 9. Resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano.	47
Tabla 10. Resultados del módulo de elasticidad. Ensayo de compresión paralela al grano.	48
Tabla 11. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano.	49
Tabla 12. Resultados de resistencia máxima a la flexión.	52
Tabla 13. Resultados de la resistencia al impacto.	54
Tabla 14. Resultados de la densidad	56

	Pág.
Tabla 15. Propiedades mecánicas de la madera tipo Sajo	64
Tabla 16. Esfuerzos máximos y mínimos de cada una de las situaciones del carrete de madera No 24.	70
Tabla 17. Factores de seguridad máximos y mínimos para cada una de las situaciones del carrete de madera No 24.	74
Tabla 18. Desplazamientos máximos y mínimos para cada una de las situaciones del carrete de madera No 24.	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Carrete de madera No 24 para el empaque de cables	15
Figura 2. Diagrama general de un proyecto de producción.	20
Figura 3. Diagrama comparativo de tiempos con y sin QFD.	23
Figura 4. Diagrama de Pareto de Necesidades de Clientes.	25
Figura 5. Diagrama de Pareto de Parámetros de Diseño.	26
Figura 6. Diagrama de Brechas de Necesidades de Clientes.	27
Figura 7. Dibujo CAD de los discos del carrete de madera.	30
Figura 8. Dibujo CAD del tambor del carrete de madera, sin discos laterales.	30
Figura 9. Dibujo CAD del carrete de madera No 24.	31
Figura 10. Probetas para el ensayo de tracción paralela al grano.	35
Figura 11. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de tracción paralela al grano.	35
Figura 12. Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción paralela al grano.	36
Figura 13. Esfuerzo vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano de la probeta #3.	37
Figura 14. Vistas de la probeta de ensayo de tracción perpendicular al grano.	40
Figura 15. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de tracción perpendicular al grano.	41
Figura 16. Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción perpendicular al grano.	41

	Pág.
Figura 17. Esfuerzo vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano de la probeta #3.	42
Figura 18. Probetas para el ensayo de compresión paralela al grano.	45
Figura 19. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de compresión paralela al grano.	46
Figura 20. Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión. Gráfica de Esfuerzo vs. Deformación.	46
Figura 21. Esfuerzo vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de compresión paralela al grano de la probeta #5.	48
Figura 22. Probetas para el ensayo de flexión.	51
Figura 23. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de flexión.	51
Figura 24. Probeta de ensayo para prueba de impacto tipo Charpy.	53
Figura 25. Máquina para prueba de impacto tipo Charpy.	54
Figura 26. Probeta #2 del ensayo de impacto fracturada.	55
Figura 27. Probetas de ensayo para determinación de densidad.	56
Figura 28. Método de elementos finitos como técnica integradora.	57
Figura 29. Diagrama del procedimiento para análisis usando el método de elementos finitos.	58
Figura 30. Dibujo CAD del carrete de madera No. 24.	59
Figura 31. Dibujo CAE del carrete de madera No. 24 mallado.	60
Figura 32. Modelo CAE del carrete de madera No 24 con 2 puntos de apoyo.	61

	Pág.
Figura 33. Modelo CAE de carrete de madera No 24 suspendido sobre un eje.	62
Figura 34. Máquina montacargas (grúa horquilla) sujetando un carrete.	62
Figura 35. Modelo CAE de carrete de madera No 24 sujetado por un montacargas.	63
Figura 36. Modelo CAE del carrete de madera No 24 situado a 1m del suelo	64
Figura 37. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está colocado en el suelo.	67
Figura 38. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está suspendido sobre un eje.	68
Figura 39. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está siendo transportado por un montacargas.	69
Figura 40. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo.	70
Figura 41. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 cuando se encuentra sobre el suelo.	71
Figura 42. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 cuando está suspendido sobre un eje.	72
Figura 43. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 siendo transportado por un montacargas.	73
Figura 44. Presentación de los factores de seguridad en el carrete de madera No 24 cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo.	74
Figura 45. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando se encuentra sobre el suelo	75

	Pág.
Figura 46. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando se encuentra suspendido sobre un eje.	76
Figura 47. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 siendo desplazado por un montacargas.	77
Figura 48. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo	78
Figura 49. Elementos utilizados para el análisis teórico.	79
Figura 50. Diagrama de cuerpo libre de una duela del tambor.	80
Figura 51. Diagrama de cuerpo libre del tramo cortado de la duela del tambor.	81
Figura 52. Curva de deflexión de la duela en el tambor.	82
Figura 53. Diagrama de cortante y momento para una duela del tambor.	84
Figura 54. Presentación de los esfuerzos en el tambor cuando el carrete está sobre el suelo.	86
Figura 55. Presentación del factor de seguridad del carrete de madera No 24 en su rediseño.	87

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Casa de Calidad	93
Anexo B. Matriz de relaciones	94
Anexo C. Tabla de evaluación de las necesidades del cliente	96
Anexo D. Tabla de evaluación de los parámetros de diseño	97
Anexo E. Plano del carrete de madera No 24	98
Anexo F. Plano de la probeta del ensayo a tracción paralela al grano	99
Anexo G. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción paralela al grano	100
Anexo H. Plano de la probeta del ensayo a tracción perpendicular al grano	101
Anexo I. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción perpendicular al grano	102
Anexo J. Plano de la probeta del ensayo a compresión paralela al grano	103
Anexo K. Plano de la probeta del ensayo a flexión	104

RESUMEN

Con el ánimo de participar en el desarrollo del sector investigativo de la Universidad Autónoma de Occidente, de la mano del Grupo de Investigación en Tecnologías para la Manufactura (GITEM) de la universidad, y en contribuir con la innovación y desarrollo de carretes para cables a nivel nacional, el grupo de investigación GITEM, quienes desean desarrollar e implementar en la empresa Recuperados y Servicios Industriales Ltda. (R.S.I.) la tecnología que permita utilizar envases TetraPak, de origen post-industriales y post-consumo para fabricar carretes para empaque de cables eléctricos y telefónicos, contribuyendo a la sustitución o disminución del uso madera en su fabricación.

Así que, para implantar un parámetro de comparación, con este proyecto se pretende evaluar el comportamiento mecánico de los carretes de madera No. 24 que constan de unos discos laterales de 2.4 metros de diámetro y un tambor o núcleo de 1.4 metros de diámetro por 1.2 metros de longitud (ver figura 1) y, de ser necesario, se propone ciertos parámetros de diseño que conlleven, básicamente, a la disminución del uso de la madera tipo Sajo (Nombre científico: *Camposperma Panamensis* Standl) para la fabricación de los carretes de madera para cables.

Figura 1. Carrete de madera No 24 para el empaque de cables.



INTRODUCCIÓN

Actualmente, existen grandes industrias que utilizan los carretes de madera de diversos tamaños y formas para el empaque de sus productos como cables eléctricos, telefónicos, entre otros, porque les permite transportar con mayor facilidad su producto.

En Colombia, la fabricación de estos tipos de carretes consume ciertas cantidades de madera que son obtenidas de los bosques nativos de la Costa Pacífica; además, para obtener la madera con dimensiones determinadas se requiere una pieza con dimensiones aun mayores para que, después del proceso de aserrado, cepillado, etc., se logre producir la pieza deseada, es decir que para obtener un metro cúbico de madera dimensionada, se requieren 1.51m^3 de madera en bloque, para los cuales a su vez se requieren de 1.5 a 2.0 veces esa cantidad de madera en pie (árboles en edad de ser cortados). La diferencia entre el volumen de madera en bruto y la madera dimensionada se convierte en subproductos como cantoneras, tablillas delgadas, aserrín, viruta y leña, cuyo precio de venta no alcanza a cubrir una mínima parte del valor pagado por la madera en bruto; adicional a esto, se invierte un 53% sobre el costo de la madera en bruto en costos como transporte, cargue y descargue, aserrado, cepillado, etc.

Y como todo recurso natural, la madera es muy susceptible al incremento en su costo debido a factores naturales como son los ciclos de lluvias, que se presentan en Colombia por ejemplo el Fenómeno del Niño, y ocasionan periodos de sequía en las zonas de cultivo de la Costa Pacífica, estas alzas en los precios se debe, en cierta parte, a que los troncos de madera recién cortados por los aserradores no pueden ser sacados de los bosques a las quebradas y de éstas a los ríos, posteriormente a los aserríos, ocasionándose una escasez temporal de madera.

1. ANTECEDENTES

Actualmente, en Colombia se fabrican carretes de madera para cables siguiendo la norma NTC 3787 que es ratificada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas Y Certificación (ICONTEC).

En esta norma se establece las características que debe tener la madera para la fabricación de carretes, como su preparación, secado, tratamiento, tratamiento preservativo, humedad y densidad; también señala las dimensiones básicas y tolerancias que deben tener los carretes y parámetros de fabricación de carretes.

Para el estudio de esta norma, se necesitó de la participación de diferentes empresas que utilizan el carrete de madera para su producto, son productores de carretes de madera o son proveedores de la materia prima (madera). Entre estas empresas están:

- A y P Ltda.
- Carretes y Maderas Cedsa
- Centelsa, Cables de Energía y Telecomunicaciones S.A.
- Codensa S.A.
- Colcarretes Ltda.
- Emcocables S.A.
- Industria Maderera.
- Bolivariana.
- Procables.

2. JUSTIFICACIÓN

A partir de la serie de problemáticas que trae la producción de carretes de madera, las cuales se sintetizan en:

- Alto desperdicio en el proceso de madera.
- Baja productividad de la mano de obra.
- Ninguna posibilidad de aprovechar los residuos del proceso en la misma línea de producción.
- Periodos de escasez y alza de precio de la madera.

Dado que los carretes de madera son pioneros en esta industria, se propone realizar un análisis al comportamiento mecánico de los carretes de madera que conlleve a disminuir la cantidad de madera que se consume y desperdicia en su fabricación y permita establecer unos parámetros que sirvan de bases para los nuevos diseños de carretes que sustituyan la madera por otro material que sea reciclable.

3. OBJETIVO

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento mecánico del diseño de un carrete de madera No.24, utilizado para el empaque de cable y desarrollar una propuesta de rediseño.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar con el fabricante de carretes los requerimientos con los cuales es fabricado el carrete No.24, y dar especificaciones cualitativas y cuantitativas de los requerimientos.
- Describir y evaluar el proceso de fabricación del carrete de madera No.24, y obtener parámetros de fabricación.
- Mediante la metodología CAD* / CAE^{1*} realizar el proceso de ingeniería inversa al carrete No.24 para obtener un modelo computacional calibrado al modelo real del carrete.
- Realizar una propuesta optimizada de rediseño del carrete No.24.

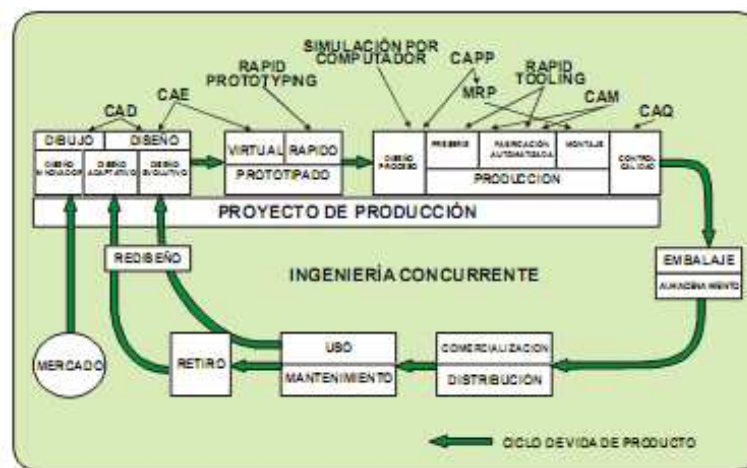
* CAD: *Computer Aided Design* [Dibujo Asistido por Computador]

** CAE: *Computer Aided Engineering* [Ingeniería Asistida por Computador]

4. METODOLOGÍA

Para el estudio del comportamiento mecánico del carrete de madera No 24, es conveniente realizar las tres actividades iniciales que se estipula en una estructura de un proyecto de producción, como la mostrada en la figura 2, que son el dibujo (CAD), el diseño y prototipado virtual (CAE), pero guardando la libertad que estas actividades proporcionan para su ejecución.

Figura 2. Diagrama general de un proyecto de producción.



Fuente: CAPUZ RIZO, Salvador. Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño del producto. 2 ed. Madrid: Alfaomega, 2001. p. 14.

Pero para estas actividades se debe determinar una serie de requisitos para su desarrollo como los requerimientos y parámetros de fabricación del carrete de madera para su dibujo y diseño (CAD), datos que se obtienen, organizan y ponderan usando las herramientas de un método llamado Despliegue de la Función de Calidad (QFD); además, se necesario realizar diferentes ensayos de laboratorio a la madera para obtener sus propiedades mecánicas como su resistencia a la tracción, compresión, flexión, impacto y absorción de agua, que permitan obtener un modelo computacional del carrete calibrado al modelo real usando la metodología CAD/CAE que nos ayude a realizar una propuesta optimizada del diseño del carrete de madera No 24, respetando las normas existentes, nacionalmente, como lo es la norma NTC 3787.

5. DISEÑO DEL CARRETE DE MADERA No 24

Como se menciona antes, un producto de cumplir con ciertos procesos previos a la producción y comercialización, como lo es el diseño.

Para realizar un buen diseño de un producto, ya sea una creación o transformación, se aconseja cumplir una serie de requisitos que permite determinar los factores relevantes de un producto.

5.1 REQUERIMIENTOS DE FABRICACIÓN DE UN CARRETE DE MADERA (DESPLIEGUE DE FUNCIÓN DE CALIDAD, Q.F.D.)

Dado que estos requerimientos de fabricación provienen de la funcionalidad del carrete de madera en la industria, se utiliza un método para obtener, analizar y evaluar esos aspectos externos que influyen en el carrete, este método se denomina Despliegue de Función de Calidad (QFD).

QFD son las siglas que corresponden a la expresión inglesa de “Quality Function Deployment” traducida normalmente como “Despliegue de la Función de Calidad”, se originó en Japón en 1960. Desde sus inicios fue considerada parte del instrumental de la gestión total de la calidad y fue diseñada específicamente para la creación de nuevas aplicaciones y productos.

5.1.1 Objetivos del Q.F.D.: El Q.F.D. consta primordialmente de dos objetivos:

- Asegurar que el producto va a responder a las necesidades y expectativas de los clientes. Este objetivo es simplemente la definición de Calidad “satisfacer las necesidades y expectativas de los clientes.

Para conocer cuáles son las necesidades para un carrete de madera para cables No 12, fue necesario realizar una encuesta por correo electrónico, ver tabla 1, a una muestra que consta de personas expertas en la producción y comercialización de carretes de madera que son las encargadas de esta área en la empresa Centelsa y algunas de sus empresas proveedoras como lo es RSI Ltda.:

- Economista Eduardo Baena.
- Ing. William Castaño.
- Ing. Oscar Perlaza.
- Ing. Diego Fernando Salguero.

Tabla 1 – Encuesta realizada a expertos en el tema de carretes de madera.

No	NECESIDAD	•
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 a los golpes laterales.	
8	El carrete soporta caídas.	
9	El carrete soporta las cargas consideradas según su referencia.	
10	El carrete es resistente a la humedad.	
11	El carrete no afecta la integridad del cable.	
12	El carrete facilita el empaque del producto.	
13	El carrete permite realizar pruebas al producto.	
14	El carrete soporta inadecuadas condiciones de transporte	
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 recuperable.	
19	El carrete tiene una apariencia agradable.	
20	El carrete está protegido contra las bacterias.	

En esta encuesta es para evaluar cada necesidad propuesta dando un nivel de importancia de 1 a 5, siendo 5 para una característica muy importante y 1 de menor importancia, esto con el fin de ponderar las necesidades en cada una de las siguientes clasificaciones:

□ Proceso de fabricación

- El carrete es de fácil ensamble = 3.3
- El carrete es reparable = 4.3
- El carrete requiere corto tiempo de fabricación =2.7
- El carrete es económico = 3.7

□ Manejo del carrete

- El carrete es fácil de transportar = 3.3
- El carrete es liviano = 2
- El carrete facilita el empaque del producto = 4.7
- El carrete permite realizar pruebas al producto = 4.3

- Calidad del carrete
 - El carrete está protegido contra las bacterias = 4.3
 - El carrete es tolerante al agua = 4.7
 - El carrete es duradero = 4
 - El carrete es resistente a la humedad = 4.7
 - El carrete soporta inadecuadas condiciones de trabajo = 4.3

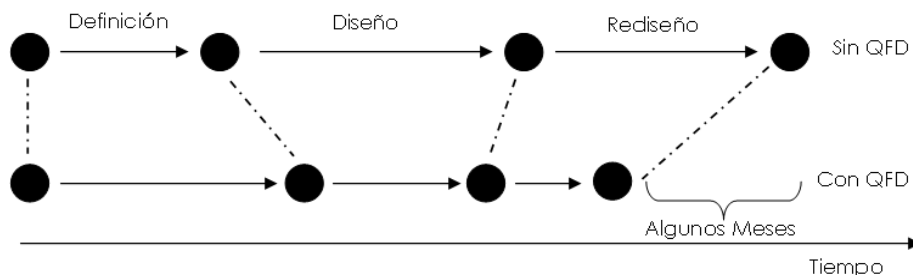
- Condiciones de trabajo del carrete
 - El carrete es rígido = 4.3
 - El carrete es resistente a golpes laterales = 4.7
 - El carrete soporta caídas = 4
 - El carrete soporta las cargas consideradas según su referencia = 4.7

- Protección del producto empacado en él
 - El carrete no afecta la calidad del cable = 5

- Estética del carrete
 - El carrete tiene una apariencia agradable = 4

- Acortar el periodo de tiempo que va desde la concepción del producto (o de las modificaciones a realizar) hasta su producción y/o lanzamiento. Con este objetivo se refiere a amplificar las posibilidades de atinar a la primera en el diseño del producto. Esto consiste, principalmente, en dedicar más tiempo a la definición de cuáles deben ser sus características técnicas, para hacerlo de una forma organizada y eficaz, esto implica tener que dedicar menos tiempo a introducir modificaciones en el diseño original y en la producción.

Figura 3. Diagrama comparativo de tiempos con y sin QFD.



Fuente: Despliegue de la función de calidad Q.F.D. [en línea] Oaxaca México: Instituto de innovación y calidad gubernamental, febrero de 2008. [Consultado 2 de Abril, 2008]. Disponible en Internet: [http://www.e-oaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%](http://www.e-oaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20), p. 5.

Así que, la casa de la calidad obtenida en este proyecto, al aplicar la metodología de la Asociación Latinoamericana de QFD, se presenta en el anexo A; cuyos parámetros de diseño que son definidas por las características técnicas, se especifican a continuación; y al ser conectadas con las necesidades de los clientes se obtiene la Matriz de Relaciones que se encuentra en el anexo B.

- Masa total: Es la masa total del carrete.
- Humedad: Porcentaje de absorción de agua del material del carrete.
- Deformación: Es la deformación que se podría presentar en el carrete por efectos externos.
- Cota Dinámica: Determina la resiliencia o flexión dinámica de la madera, y está ligado a su capacidad de absorber energía.
- Material: Tipo de madera en que es fabricado el carrete (teniendo en cuenta las propiedades mecánicas).
- Carga del cable: El peso del cable que sea empacado en el carrete.
- Temperatura: Es la temperatura que soporta el carrete.
- Costo de fabricación por unidad.
- Tiempo de producción.
- Número de piezas a ensamblar para obtener el producto terminado.

✓ **La Matriz de Relación.** Mejorar una determinada característica puede incidir positiva o negativamente en otra, por lo que es fundamental identificar el grado de relación que existe entre estas, tanto a nivel de sinergias como refutaciones, priorizando el desempeño de una frente a otra en función al peso relativo dentro del producto. Este nivel de relación se evalúa de forma numérica dependiendo la intensidad según se percibe en la tabla 2.

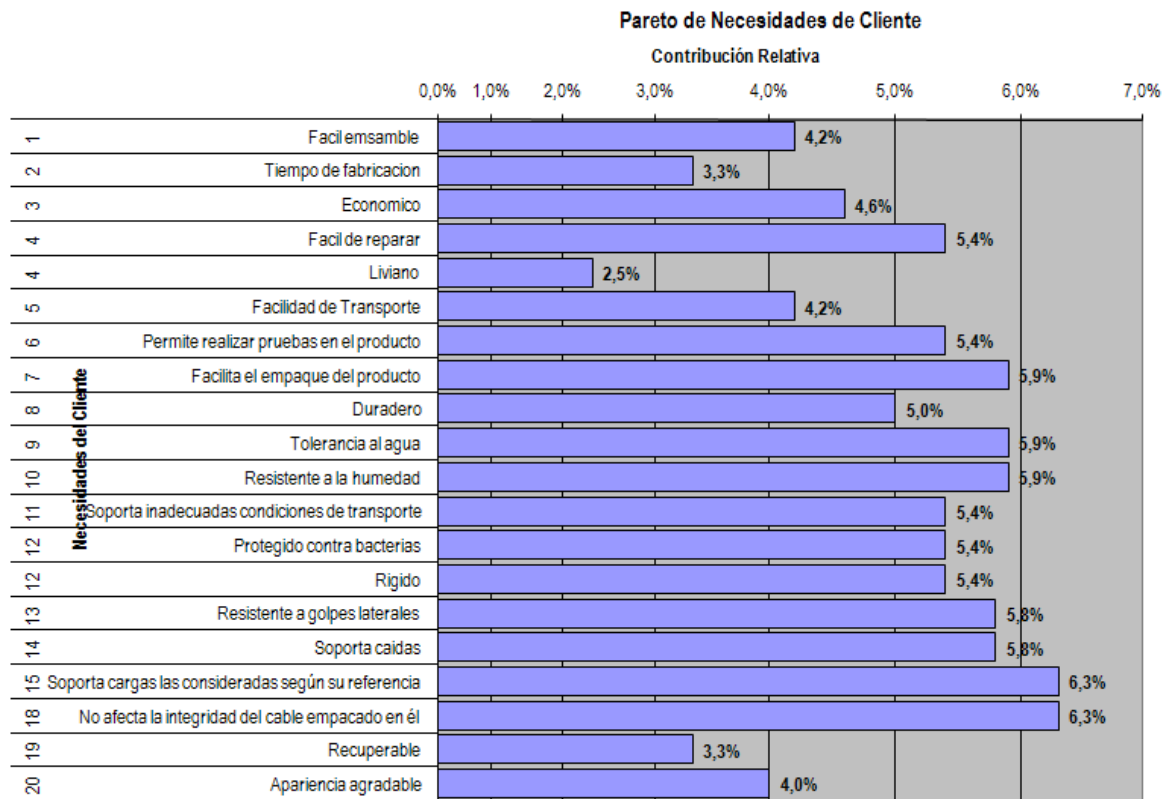
Tabla 2 - Notación para evaluar el nivel en la matriz de relaciones.

0	No existe relación o se tiene duda
1	Existe una relación débil
3	Existe una relación media
9	Existe una relación fuerte

Para plantear una Matriz de Relaciones¹, como la que se muestra en el anexo A, se requiere establecer un nivel de relación entre las necesidades y los parámetros de diseño, de forma que mida el alcance o relevancia que tiene una sobre la otra.

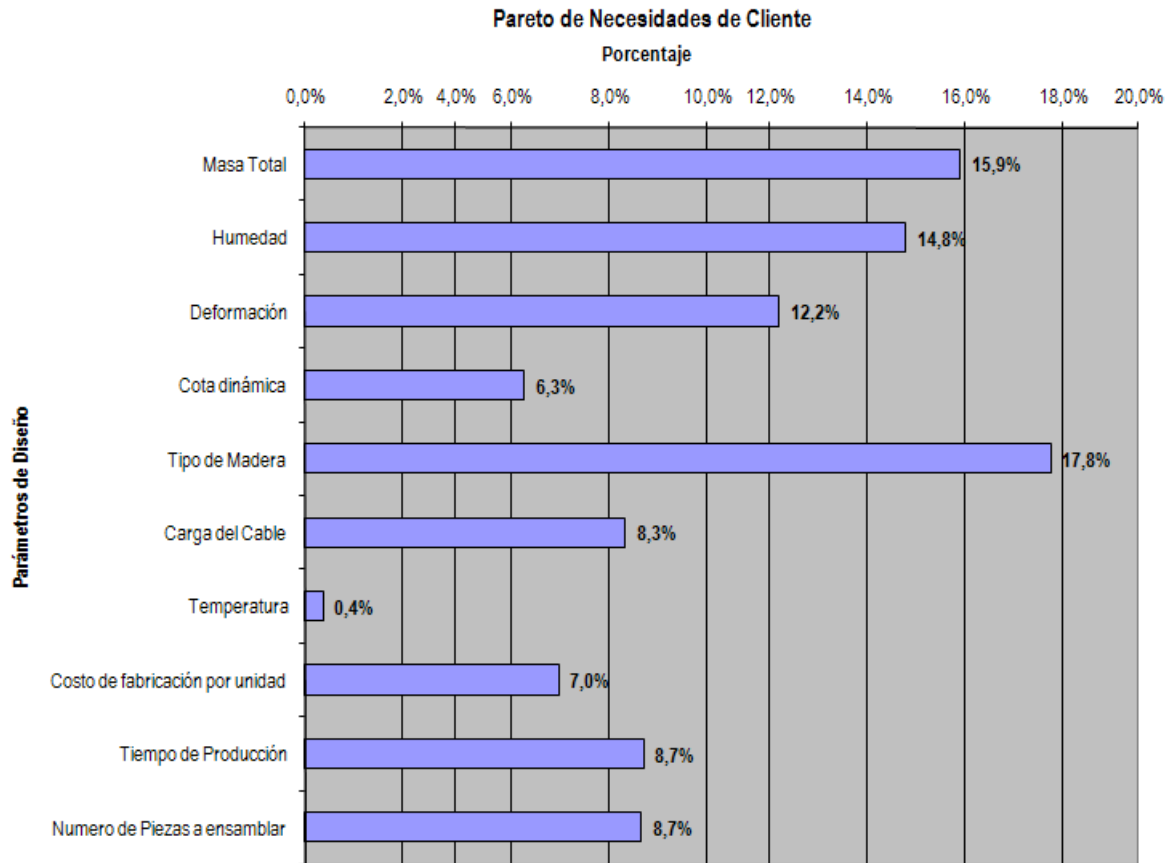
5.1.2 Resultados y Análisis. En el anexo C y D se logra establecer adecuadamente, por medio del peso ponderado, la importancia de las necesidades según los parámetros y de los parámetros según las necesidades, respectivamente; esto con el fin de determinar cuáles son los factores que, en realidad, tienen una mayor relevancia para el diseño de los carretes de madera, como lo muestra las figuras 4 y 5.

Figura 4 – Diagrama de Pareto de Necesidades de Clientes.



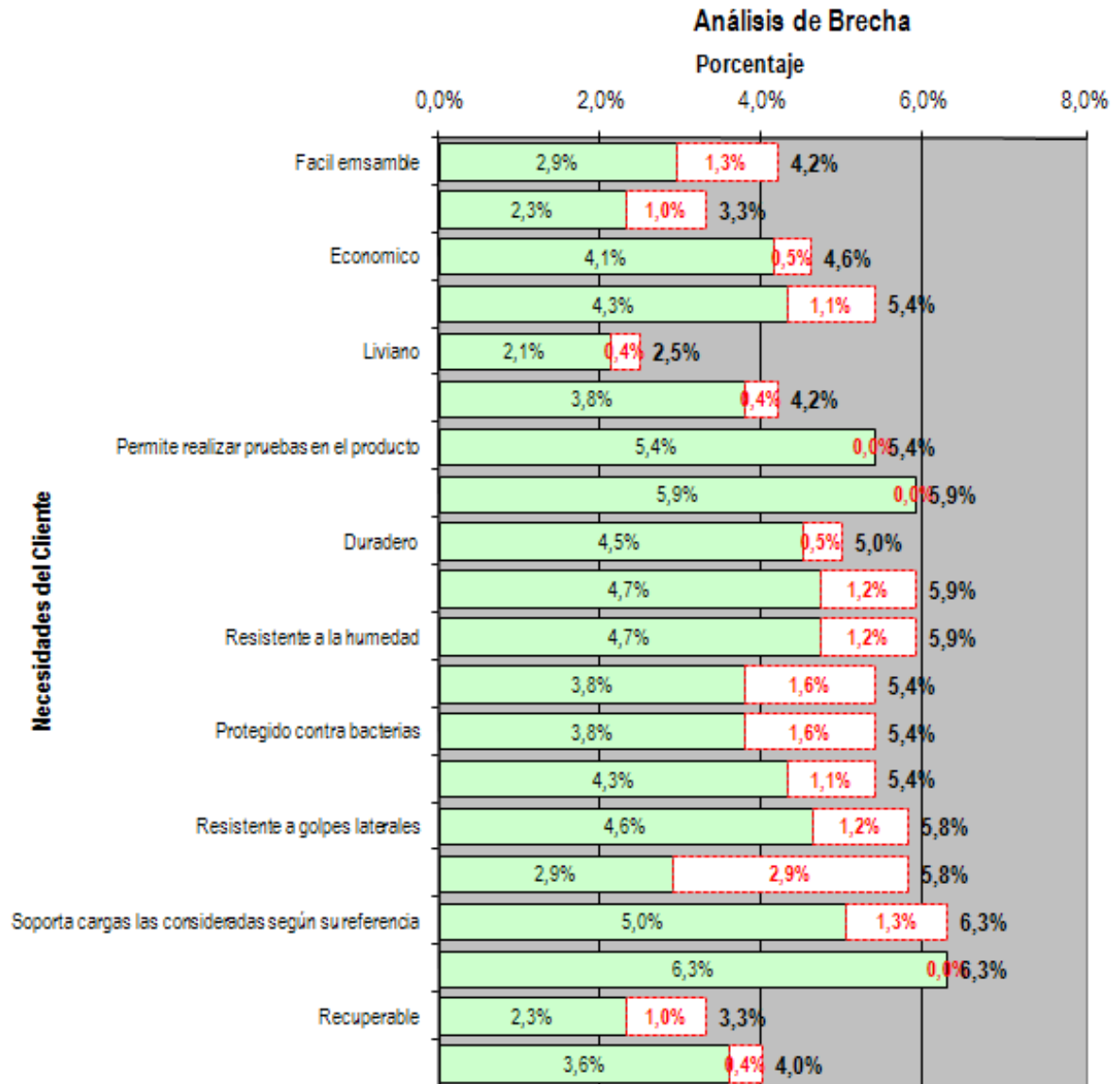
¹Matemáticas para el QFD: Matriz de Relaciones, versión 050704. México D.F.: Asociación Latinoamericana de QFD, 2008. 1 Archivo de computador.

Figura 5 – Diagrama de Pareto de Parámetros de Diseño.



Reconociendo esto, se establece que las necesidades respecto a las condiciones de trabajo son de mayor importancia para poder realizar el rediseño del carrete de madera para cables No 24 y que al optimizar estas necesidades al máximo se logra una ganancia porcentual sobre ellas (brecha absoluta ponderada, BAP) y van a contribuir en un porcentaje mayor en la mejora del rediseño en su totalidad (brecha absoluta relativa, BAR); esta relación se puede observar con mayor claridad en la figura 6, donde la BAR son los valores en fondo claro y representa el tamaño de la oportunidad.

Figura 6 – Diagrama de Brechas de Necesidades de Clientes



Si siguiendo esta recomendación se puede mejorar la calidad del carrete de madera en la proporción que se permita considerar el desarrollo del rediseño del carrete de madera para cables No 24.

5.2 PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE UN CARRETE DE MADERA No 24 (DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN)

Como parte fundamental, la madera debe cumplir con ciertos requisitos para se utilizada en la construcción de los carretes, entre ellos están:

- El porcentaje de humedad: La madera debe tener menos de 20% de humedad para que sea más sencillo maquinarlo y disminuir las plagas y bacterias que se encuentran en ella. Esto se logra por medio de un secado en horno con aire caliente durante 4 a 6 días.
- Madera sin imperfecciones: Debido a las malas condiciones que adquieren los troncos de madera en su transporte, la madera presenta nudos, ralladuras, huecos, etc. que modifican sus propiedades óptimas. Estos defectos no se logran corregir solo se eliminan cortando y/o cepillando la sección afectada.
- Madera no contaminada: La madera contiene insectos que afectan la vida útil de la madera y, por ende, su comercialización; por esto, también, se seca la madera y finalmente se inmuniza con químicos que no afectan el material.

5.2.1 Materiales que conforman el carrete de madera No 24. Después que la madera cumple estos requisitos, se puede comenzar a ensamblar las diferentes partes que conforman un carrete de madera No 24:

- Tablas de madera: Con dimensiones de 45 x 250 x 2400 mm (aunque pueden cambiar dependiendo la ubicación que estas tomen en el disco).
- Duelas de madera para el tambor: Tienen un perfil circular de 32 x 110 mm y un largo de 1.22 m.
- Bujes tipo 3.
- Cazuelas calibre 14.
- Clavos helicoidales de 4 x 1/8 pulgadas.
- Espárragos de acero ASTM 1020 calibrado de 5/8 x 55 pulgadas.
- Tornillos, tuercas y arandelas.

5.2.2 Secuencia de mecanizado y ensamble. Este proceso generaliza los métodos de producción de los carretes de madera, ya que la producción susceptible a la maquinaria, herramientas y mano de obra:

- **Ensamble de los discos o tapas del carrete:** Se colocan las tablas de madera, una seguida de otra, de forma longitudinal hasta completar un ancho de 2.4m (aproximadamente 10 tablas de madera) y sobre ellas, formando un ángulo de 90° respecto a la dirección de las tablas en la parte inferior, se colocan varias tablas de madera, una tras otra, hasta completar los 2.4m de longitud. Para unir estas tablas, se usan 3 cordones circulares de clavos (mínimo 2 clavos por tabla) con diámetros aproximados de 76, 166 y 228cm, cuya cabeza deben estar hundidas en la madera mínimo 2mm y doblarse la punta, ver figura 7.
- **Forma de los disco del carrete:** Usando una máquina que gira el disco (la pieza) mientras va cortando en forma circular con una sierra grande y realiza el ruteado en la parte inferior de 32mm de espesor y 5mm de profundidad, finalmente taladra un agujero en el centro del disco de 10cm de diámetro.
- **Orificios en los discos:** Se mueve el disco a un taladro vertical que realiza 8 agujeros de 5/8 pulgadas sobre un radio de 66.5cm para los espárragos, 8 agujeros de 17mm que forman un cuadrado de 30cm que son para asegurar el buje en el disco, un agujero de 5cm que será el orificio impulsor del carrete y un agujero inclinado 45° que facilita en empaque del cable en el carrete.
- **Se coloca el buje y se asegura sobre el disco con los tornillos.** También se ponen las cazuelas en los orificios para los espárragos. Y con esto se finalizan la construcción de los discos.
- **Para hacer el tambor,** se usa un soporte especial que mantiene los dos discos en formas verticales y equidistantes a 1.2m; se introducen los espárragos en los cazuelas de un disco a otro, conservando sus extremos libres; luego se insertan las duelas una por una en el ruteado, asegurándose que el espacio entre ellas sea mínimo, hasta conseguir la forma cilíndrica del tambor, ver figura 8.
- **Finalmente,** se aseguran muy bien los espárragos con las tuercas y se inmuniza el carrete.

Figura 7. Dibujo CAD de los discos del carrete de madera.

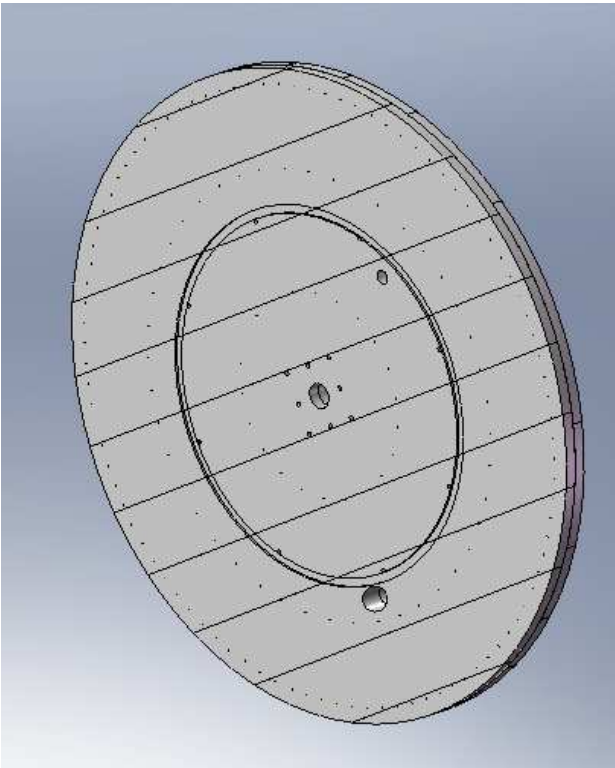
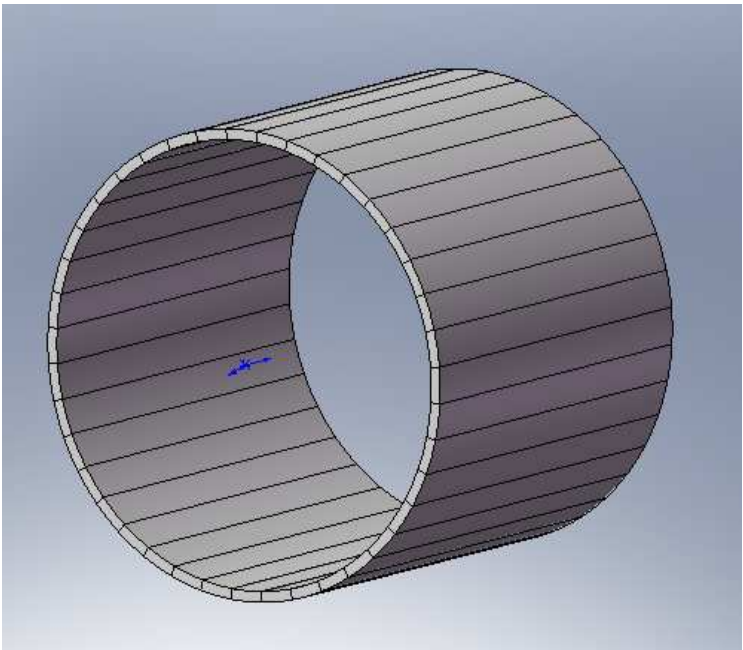
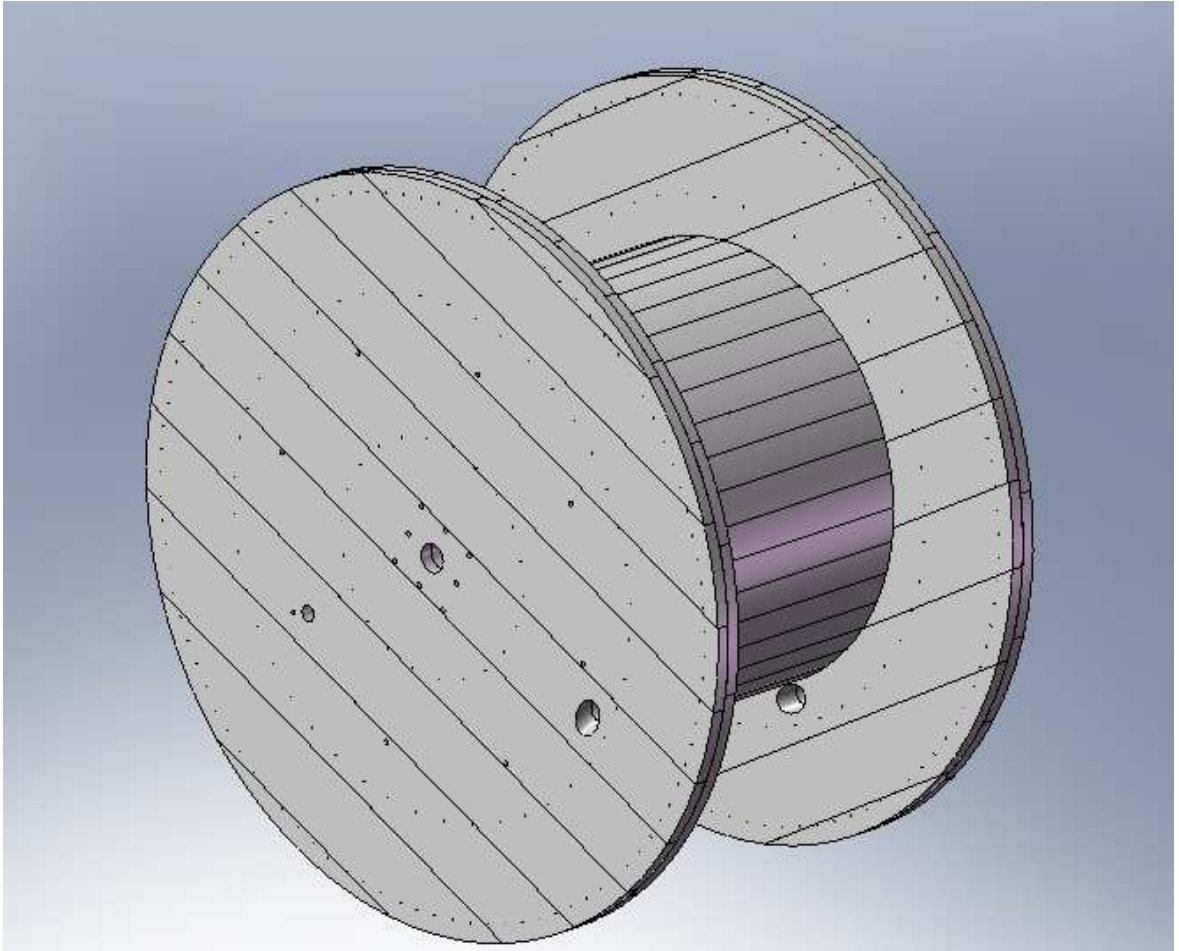


Figura 8. Dibujo CAD del tambor del carrete de madera, sin discos laterales.



5.2.3 Dibujo CAD del carrete de madera No. 24. Siguiendo el plano del carrete que se encuentra en el anexo E y los anteriores pasos de ensamble del carrete, se logra crear un modelo CAD, con el software Solid Edge®, que asume cada una de las tablas de madera como sólidos independientes ensamblados entre si, como se observa en la figura 9, donde también se muestra sus dimensiones generales.

Figura 9. Dibujo CAD del carrete de madera No 24. Unidades en mm.



6. PROPIEDADES MECANICAS DE LA MADERA

Unos de los requisitos más importantes para realizar un análisis CAE es reconocer las propiedades del material con que es fabricado el elemento a analizar. Por esta razón, es necesario determinar las propiedades mecánicas de la madera con la que se producen los carretes que se pretenden analizar.

Los carretes de madera No 24 se pueden fabricar con diferentes tipos de madera, siendo la madera tipo Sajo (*Camptosperma Panamensis Standl*) de las más comunes, por su economía y por dejarse trabajar más fácilmente, y como segunda opción la madera tipo Pino (*Pinus*), por sus buenas propiedades aunque no sea muy económica.

Dado que este análisis es para carretes generales, es sensato determinar las propiedades de la madera tipo Sajo.

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

Nombre científico: *Camptosperma Panamensis Standl*.
Familia: *Anacardiáceas*.

Este tipo de arboles se encuentran desde Nicaragua hasta Ecuador en la región Pacífica, porque crecen en los bosques húmedos tropicales con suelos inundados por agua dulce, al nivel del mar. Esta madera es llamada de diferentes maneras como Orey en Colombia, Brasil, Costa Rica y Estados Unidos; Aures u Hoary en Panamá.

El árbol alcanza alturas hasta de 28m y 50cm de diámetro. Posee raíces tablares bajas, redondas y agudas. Tronco recto, cilíndrico y de color dorado. La corteza externa es de color café grisáceo, con apariencia escamosa y con fisuras poco profundas. El fruto es una drupa de forma ovoide.

La albura es de color blanco rosáceo con transición gradual al duramen de color marrón rosáceo, a veces con bandas grises. Olor y sabor ausentes o no distintivos. Brillo mediano, grano recto, textura mediana y veteado satinado poco pronunciado. Es una madera fácil de trabajar con herramientas comunes y no ofrece ninguna dificultad a los procesos de maquinado. Posee una buena admisión y retención de clavos y da un buen acabado; por eso es usado en la carpintería, ebanistería, etc. Tiene una durabilidad natural baja y no es resistente al ataque de hongos e insectos.

6.2 PRUEBAS MECÁNICAS.

Para realizar correctamente las pruebas mecánicas que determinan las propiedades de la madera, se siguen las instrucciones para los diferentes ensayos que se encuentran en las siguientes normas técnicas colombianas, ICONTEC:

- NTC 3377. Maderas. Ensayos con probetas pequeñas.
- NTC 961. Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano.
- NTC 944. Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano.
- NTC 663. 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.

Todas las probetas de las diferentes pruebas se realizan con madera de un mismo lote que es secada en un horno de aire por 6 horas; con este proceso, la madera tipo sajo, obtuvo una humedad relativa promedio del 12%.

A continuación, se describe cada una de los ensayos mecánicos que serán posteriormente analizados para obtener las propiedades generales de la madera tipo Sajó.

6.2.1 Ensayo de Tracción. Teniendo en cuenta que la madera es un material anisotrópico, es necesario realizar dos pruebas de tracción: una paralela al grano (en la dirección de las fibras) y otra de forma perpendicular al grano, porque esto influye en las propiedades de la madera por el efecto que ejercen los granos sobre las cargas.

- **Ensayo de tracción paralela al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción de dirección paralela al grano 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 F. Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo de mordazas indicada en la norma NTC 944, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo G.

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

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 de madera No 24.

◊ **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 787¹, y las dimensiones especificadas en el anexo D. Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes máquinas:

- 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 de 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 12% durante 72 horas antes de realizar el procedimiento.

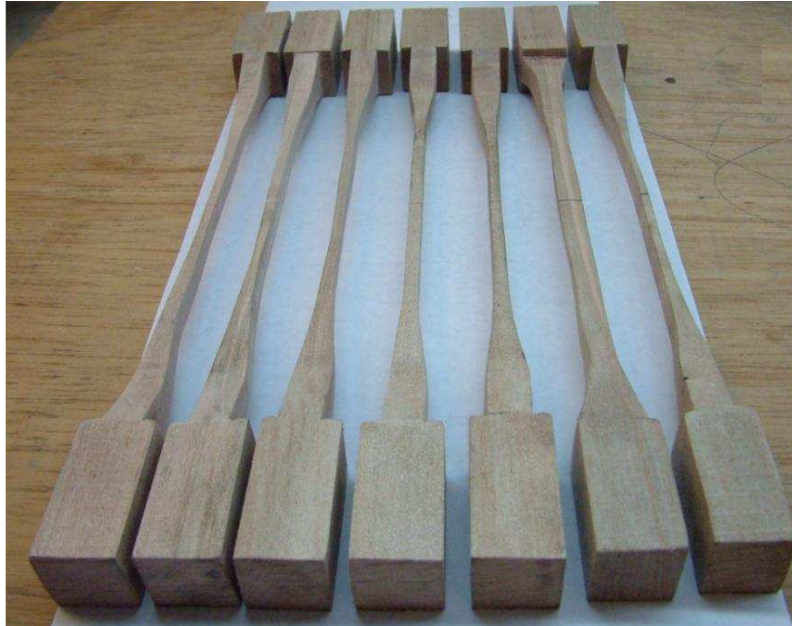
◊ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 2 de ensayo de prueba, ver figura 10.

◊ **Velocidad de ensayo.** Siguiendo lo enunciado por la norma NTC 994: "Las probetas se colocan y se mantienen durante el ensayo de tal forma que la cruceta móvil se desplace a una velocidad de 1.00 ± 0.25 mm/min y de modo que las mordazas, con probeta montada, tiendan a separarse entre sí².

¹ INSTITUTO COLOMBIANO NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Toma de muestras para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. p. 3. NTC 787

² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. p. 3. NTC 944

Figura 10. Probetas para el ensayo de tracción paralela al grano.



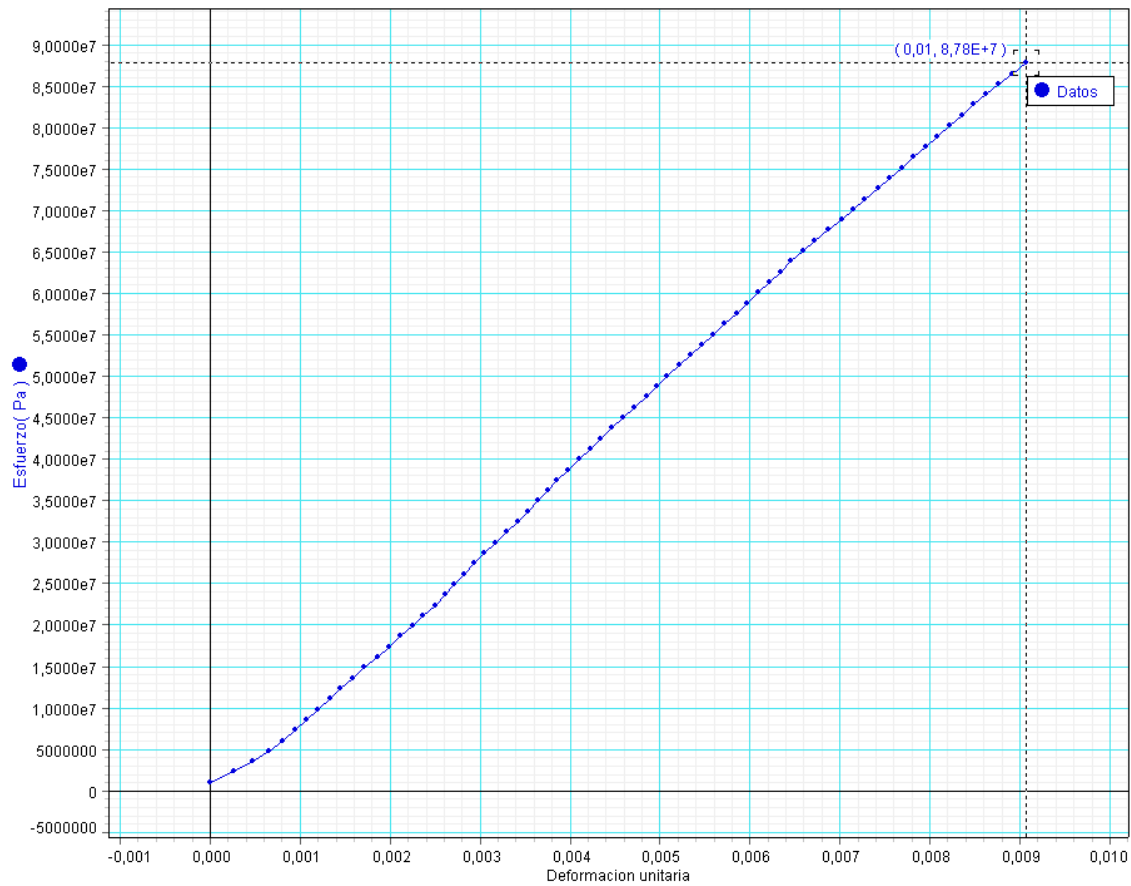
◇ **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. ver figura 11.

Figura 11. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de tracción paralela al grano.



◇ **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, este no presenta zona plástica, como se muestra en la figura 12, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura ya que no se puede referenciar el punto de fluencia.

Figura 12. Esfuerzo vs. Deformación sin zona de plástica. Ensayo de tracción paralela al grano.



◊ **Esfuerzo último.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 1 y un área transversal en la probeta de 40.5mm²:

Ecuación 1. Esfuerzo último del material.

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

Donde:

σ_{ult} = Esfuerzo ultimo máximo [Pa].

F_{max} = Fuerza máxima soportada por la probeta [N].

A = Área transversal de la probeta [m²].

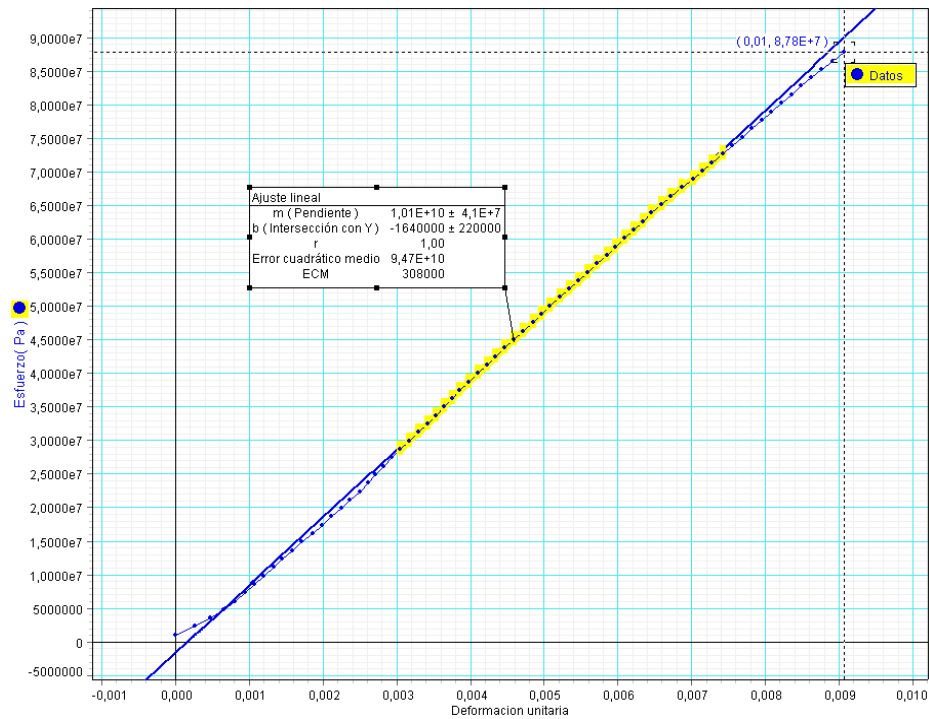
Los resultados obtenidos para el valor de tensión en el punto de ruptura del material se presentan a continuación en la tabla 3, que al realizarles un análisis estadístico se determina en esfuerzo último promedio.

Tabla 3. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo último [MPa]
1	4819.5	119
2	3555.9	87,8
3	5062.5	125
4	4293.0	106
5	5143.5	127
Promedio		113,0
Desviación estándar		16,3

◊ **Módulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el Módulo de elasticidad del Sajo el cual corresponde a la pendiente de la gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria, se utilizo el software Data Studio®. En la figura 13 se pude observar la gráfica esfuerzo s. deformación unitaria de la probeta 3, la cual presento un Módulo de elasticidad de 10,1GPa.

Figura 13. Esfuerzo Vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano de la probeta #3.



Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 4, cuyo análisis estadístico determina el Módulo de elasticidad promedio.

Tabla 4. Resultados del Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Módulo de elasticidad [GPa]
1	13,0
2	10,1
3	13,0
4	12,5
5	12,6
Promedio	12,2
Desviación estándar	1,2

◊ **Deformación en la prueba.** El cálculo de la elongación se realizó a partir de la relación que existe entre la longitud inicial de referencia y la longitud final de referencia (Deformación %). En la tabla 5 se muestra los valores de deformación porcentual de los ensayos realizados en esta prueba.

Tabla 5. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción paralela al grano.

Probeta	Deformación [%]
1	1,091
2	0,907
3	1,236
4	1,024
5	1,242
Promedio	1,099
Desviación estándar	0,1

- **Ensayo de tracción perpendiculares al grano.** El método se basa en aplicar una carga continua de tracción en dirección perpendicular al grano 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 H. Debido a la geometría de la probeta fue necesario implementar el tipo de mordazas indicada en la norma NTC 961¹, con la geometría y dimensiones mostradas en el anexo I.

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

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 de madera No 24.

◊ **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 transversales 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 787², y las dimensiones especificadas en el anexo G.

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

- 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 vertical MORGON Modelo MD-30A: Utilizando una broca para madera de 25 pulgadas de diámetro para darle a las probetas el arco correspondiente a su dimensionamiento final.

¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. p. 3. NTC 961

² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Toma de muestras para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007, p. 3. NTC 787,

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

◊ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba, ver figura 14.

◊ **Velocidad de ensayo.** Las especificaciones de la norma NTC 961, que indica: "Las probetas se colocan y se mantienen durante el ensayo en tal forma que la cruceta móvil se desplace a una velocidad de 2.5mm/min, continuando el ensayo hasta que se produzca la ruptura de la probeta"¹.

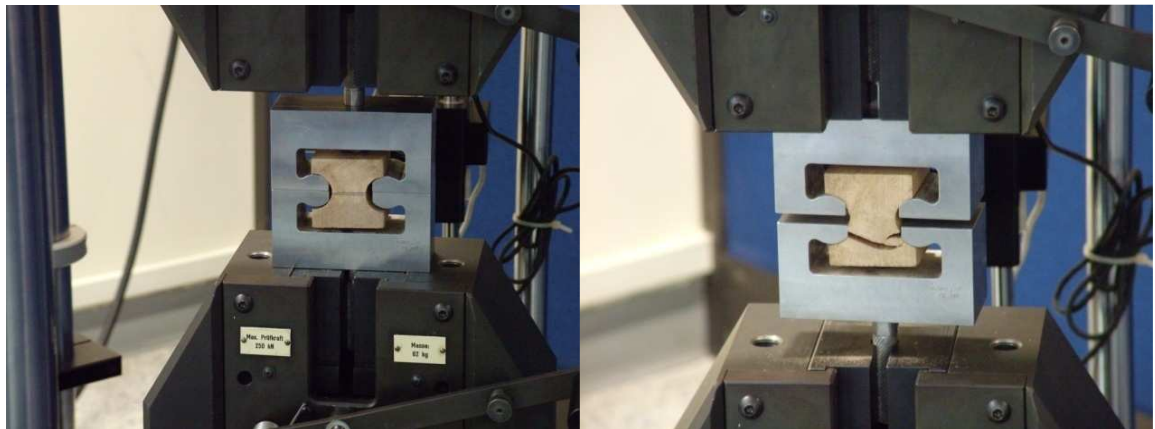
Figura 14. Vistas de la probeta de ensayo de tracción perpendicular al grano.



◊ **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. ver figura 15.

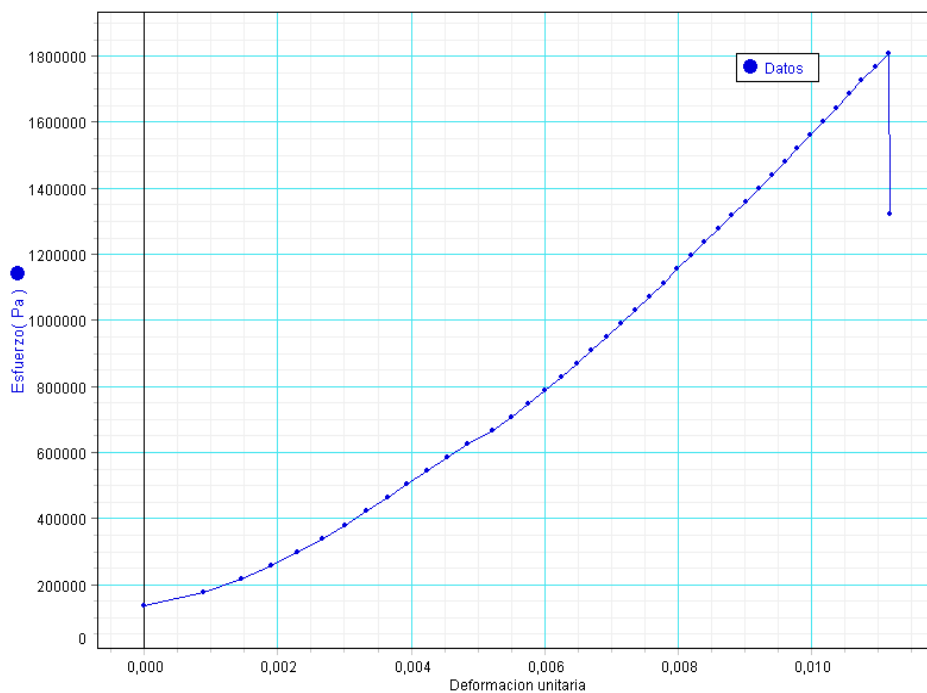
¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007, p. 3. NTC 961

Figura 15. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de tracción perpendicular al grano.



◊ **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba.** Debido al comportamiento frágil del material, en el sentido perpendicular al grano de la madera tampoco presenta fluencia, como se muestra en la figura 16, por lo tanto se hará el registro de la tensión en el punto de ruptura.

Figura 16. Esfuerzo vs. Deformación sin zona plástica. Ensayo de tracción perpendicular al grano



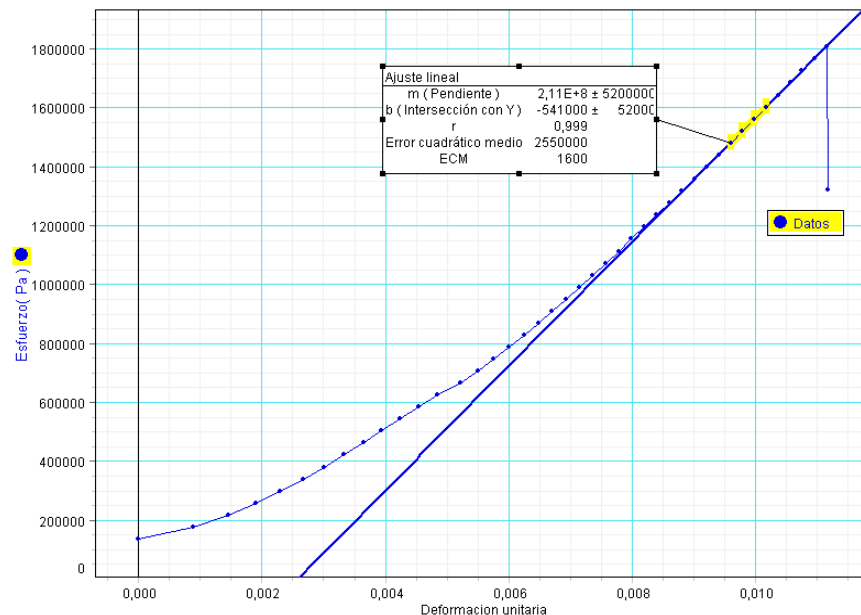
◊ **Tensión en el punto de ruptura.** La tensión en el punto de ruptura o también conocida como esfuerzo último se encontró utilizando la ecuación 1, anteriormente mencionada (página 37), y un área trasversal de 1250mm^2 ; cuyos resultados se encuentran en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del esfuerzo último para el ensayo de tracción perpendicular al grano.

Probeta	Fuerza máxima [N]	Esfuerzo último [MPa]
1	2149,4	1,72
2	2389,6	1,91
3	2259,3	1,81
4	2051,7	1,64
5	1583,5	1,27
Promedio		1,67

◊ **Módulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el Módulo de elasticidad de la madera tipo Sajo en sentido perpendicular a los granos de la madera, el cual corresponde a la pendiente de la gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria, se utilizó el software Data Studio®. En la figura 17 se logra observar la gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria de la probeta 3, la cual presentó un Módulo de elasticidad de $0,21\text{GPa}$.

Figura 17. Esfuerzo vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano de la probeta #3.



Los valores arrojados por la prueba para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 7, que al realizar un análisis estadístico, se encuentra un Módulo de elasticidad para la madera promedio.

Tabla 7. Resultados del Módulo de elasticidad. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

Probeta	Módulo de elasticidad [GPa]
1	0,23
2	0,31
3	0,21
4	0,22
5	0,22
Promedio	0,24
Desviación estándar	0,04

◊ **Deformación en la prueba.** El cálculo de la elongación se realizó a partir de la relación que existe entre la distancia entre las mordazas al iniciar la prueba y al finalizarla (Deformación %), cuyos datos se encuentran en la tabla 8 de cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 8. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de tracción perpendicular al grano.

Probeta	Deformación [%]
1	0,797
2	0,86
3	1,117
4	0,967
5	0,78
Promedio	0,9
Desviación estándar	0,1

6.2.2 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 los granos de la madera. Pero particularmente se va a realizar solo el ensayo de compresión paralela al grano, esto es porque usualmente en la industria de fabricación de carretes de madera se dispone la madera de esta forma para aprovechamiento de la madera.

• **Ensayo de compresión axial o paralela al grano.** El procedimiento que se llevo a cabo para la realización del ensayo de compresión para la probeta con fibras paralelas la longitud, se hizo en base a la norma NTC 784¹. Para la realización de este ensayo se empleo la probeta con la forma y dimensiones indicadas en el anexo J.

◊ **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 Ltda. – División de empaques de madera. Estos valores serán comparados con los datos de esfuerzo máximo a la ruptura encontrados en el libro “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima”²

◊ **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 J.

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

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

¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano. Instituto Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007, p.3. NTC 784

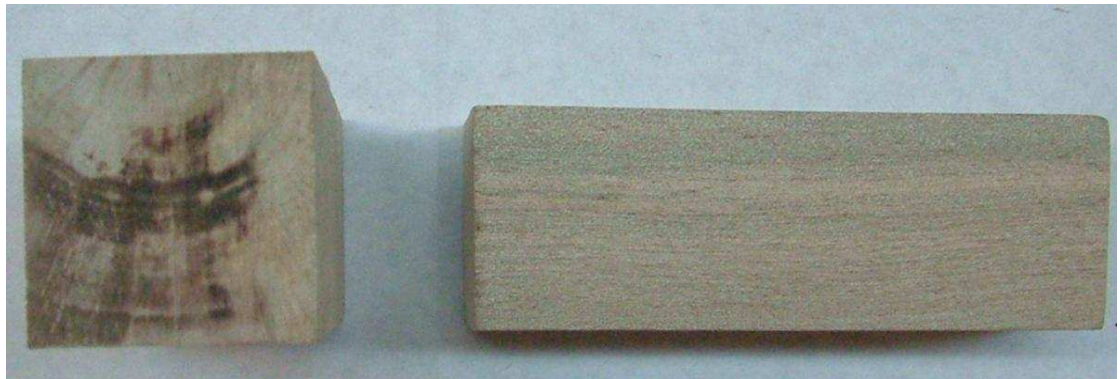
² ARÉVALO FUENTES, Rosven Libardo y LONDOÑO ARANGMANUAL, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué: Impresiones Conde, 2005. p. 116.

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

◊ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba, ver figura 18.

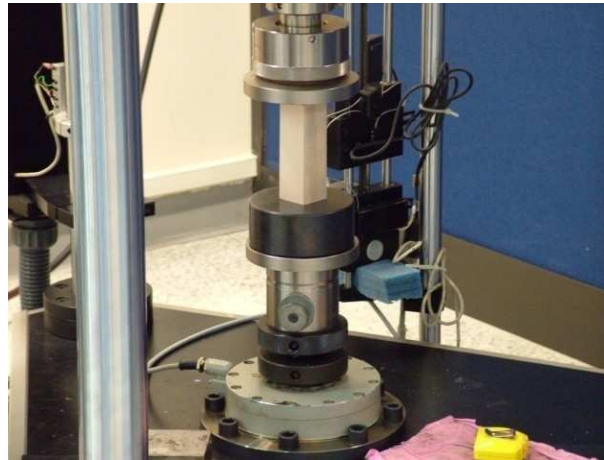
◊ **Velocidad de ensayo.** Debido a que se sigue el procedimiento indicado en la norma NTC 784, esta menciona en la sección de procedimiento (numeral 6.4.1) que: “la carga se aplico sobre las caras transversales, en forma continua y durante todo el ensayo para que se produzca una deformación de 0,6mm/min. Los valores para la curva de esfuerzo-deformación se toman aun después de la rotura de la probeta”.

Figura 18. Probetas para el ensayo de compresión paralela al grano.



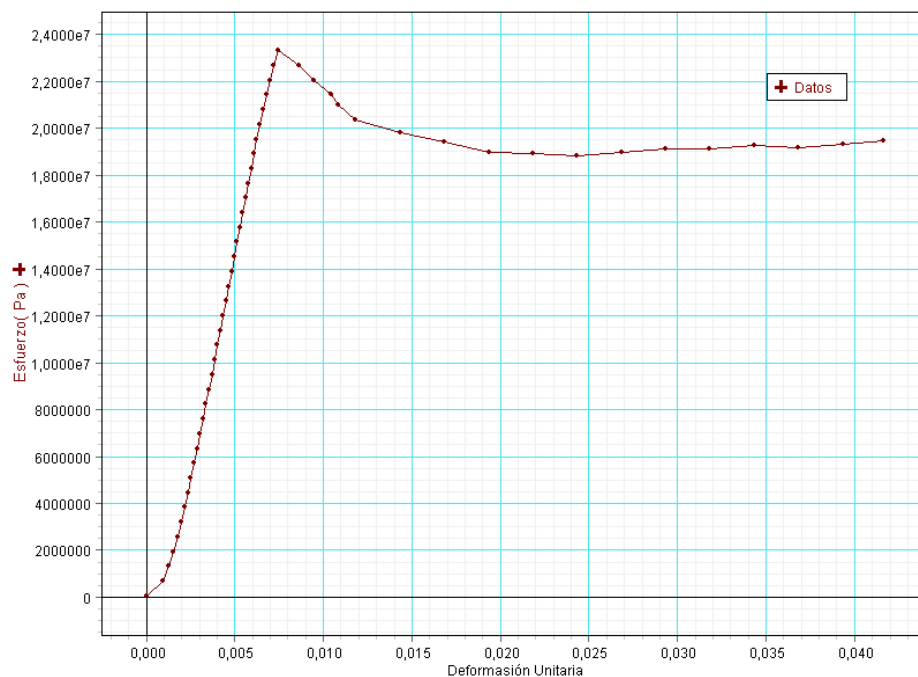
◊ **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3, ver figura 19.

Figura 19. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de compresión paralela al grano.



◇ **Esfuerzo de fluencia obtenido en la prueba de compresión.** Al igual que en la prueba de tracción, en esta prueba la madera presenta un comportamiento frágil, 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 20.

Figura 20. Comportamiento frágil de la madera sometida a compresión. Gráfica de Esfuerzo vs. Deformación.



◊ **Esfuerzo último por compresión.** La resistencia máxima a la ruptura o también conocida como esfuerzo último por compresión se encontró utilizando la ecuación 2 y un área de 1600mm².

Ecuación 2. Resistencia máxima a la ruptura del material.

$$\sigma = \frac{P}{S}$$

Donde:

σ = Esfuerzo ultimo máximo [Pa].

P= Carga máxima soportada por la probeta [N].

A = Superficie de la sección transversal de la probeta antes del ensayo [m²].

Los resultados obtenidos para el valor de esfuerzo último del material a compresión se presentan a continuación en la tabla 9, que al realizar un análisis estadístico se determina un valor promedio.

Tabla 9. Resultados de esfuerzo último por compresión paralela al grano.

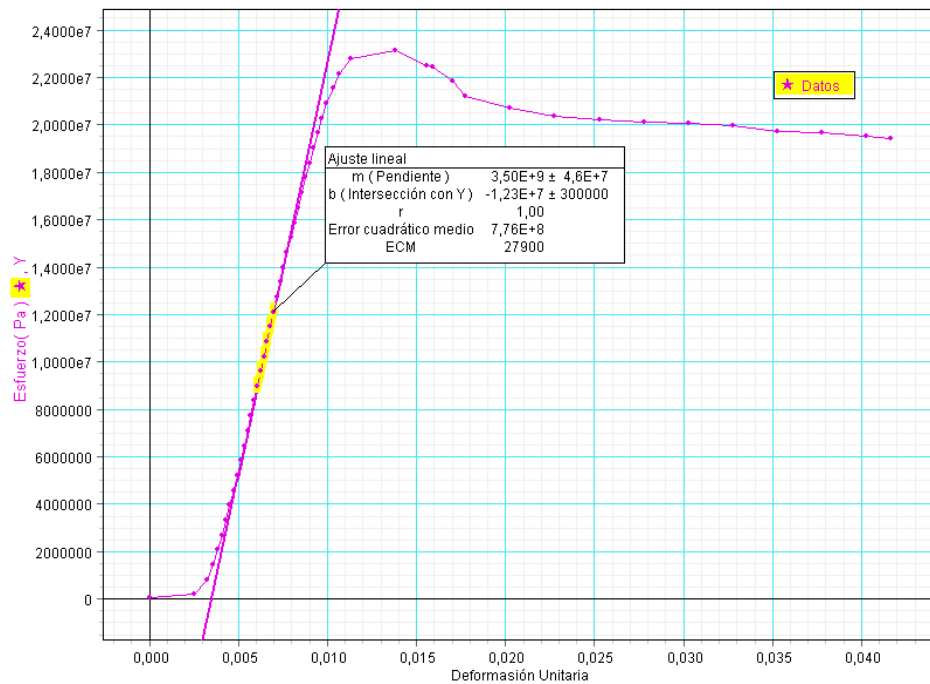
Probeta	Carga máxima [N]	Esfuerzo último [MPa]
1	36100	22,6
2	35197	22,0
3	37603	23,5
4	36585	22,9
5	35599	22,2
Promedio		22,6
Desviación estándar		0,58

Como se mencionó anteriormente, al comparar los datos encontrados en este ensayo, se puede determinar que existe una desigualdad importante entre estos dos estudios, esto pudo surgir por diferencias en aspectos como el porcentaje de humedad, tiempo de vida y tiempo en el cual fue cortado el árbol que se utilizó para el análisis.

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 grano.

◊ **Módulo de elasticidad obtenido de la prueba.** Con el fin de calcular el Módulo de elasticidad de la madera tipo Sajo sometido a compresión, identificado como la pendiente de la gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria, se utilizó el software Data Studio®. En la figura 21 se observa la gráfica esfuerzo vs. deformación unitaria de la probeta #5, la cual presentó un Módulo de elasticidad de 3,5GPa.

Figura 21. Esfuerzo vs. Deformación unitaria: Módulo de elasticidad. Ensayo de compresión paralela al grano de la probeta #5.



Los valores arrojados por este ensayo para este parámetro se presentan a continuación en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados del Módulo de elasticidad.

Probeta	Módulo de elasticidad [GPa]
1	3,85
2	3,92
3	3,38
4	3,87
5	3,59
Promedio	3,72

Debido a que no se logro encontrar antecedentes de resultados de Módulo 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 de madera No 24.

◊ **Elongación en la prueba.** El cálculo de la elongación se realizo a partir de la relación que existe entre la distancia en que se encuentran las mordazas al iniciar la prueba y al terminarla (Deformación %). En la tabla 11 se muestra los valores de deformación porcentual de las pruebas realizadas en este ensayo y un valor promedio entre ellas, producto de un análisis estadístico.

Tabla 11. Resultados de la deformación porcentual. Ensayo de compresión paralela al grano.

Probeta	Deformación [%]
1	1,46
2	1,5
3	1,43
4	1,43
.5	1,78
Promedio	1,5
Desviación estándar	0,1

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 de madera No 24.

6.2.3 Ensayo de flexión. Este ensayo estudia el comportamiento de un material al aplicarse una carga en el centro de una probeta, que para este estudio es de madera tipo Sajo, la cual se encuentra apoyada en sus extremos. Finalmente, se determina la resistencia a partir de una carga máxima, de una distancia determinada entre los apoyos y de unas dimensiones de la probeta.

Para realizar este ensayo se empleo una probeta con las dimensiones mostradas en el anexo K; en la cual la dirección del grano de la madera corre paralelamente al eje longitudinal de la probeta como lo indica la norma NTC 663¹.

¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007, p.3. NTC 663

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

Mientras se llega a estas características, estos valores serán comparados con los datos de encontrados en el libro “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima”¹.

◊ **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 K.

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

- 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.

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

◊ **Cantidad de probetas ensayadas.** El ensayo se realizó para un lote de 5 probetas y 1 de ensayo de prueba.

◊ **Velocidad de ensayo.** Según la norma NTC 663 en la sección de procedimiento, numeral 6.3.1, que dice: “la probeta debe cargarse de forma continua y constante para obtener una deformación de 2,5mm por minuto, hasta la rotura”.

¹ ARÉVALO FUENTES, Rosen Libardo y LONDOÑO ARANGMANUAL, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué: Impresiones Conde, 2005. p. 116.

Figura 22. Probeta para el ensayo de flexión.



◇ **Clasificación de la máquina.** Máquina universal de ensayos UTS 200.3. ver figura 23.

Figura 23. Máquina universal de ensayos UTS 200.3: Ensayo de flexión.



◇ **Resistencia máxima a la flexión:** Para determinar esta característica de la madera tipo Sajo, se requiere usa la ecuación 3 con los datos arrojados en las 5 pruebas, cuyos resultados se encuentran en la tabla 12 con una análisis estadístico que establece un valor promedio.

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

Donde:

σ_{\max} = Resistencia máxima a la flexión [Pa].

P = Carga de rotura [N].

L = Distancia entre los soportes [m].

a = Ancho de la probeta en la dirección radial [m].

e = Altura de la probeta en la dirección tangencial [m].

Tabla 12. Resultados de resistencia máxima a la flexión.

Probeta	Carga máxima [N]	Resistencia máxima [MPa]
1	1080	72,9
2	1150	77,6
3	1080	72,9
4	1050	70,9
5	1140	77,0
Promedio		74,3
Desviación estándar		2,90

La comparación de este valor promedio (74.3MPa) con el establecido por el documento anteriormente mencionado (67.5MPa) genera una pequeña desigualdad del 10%, esto se debe por las variaciones en aspectos como el porcentaje de humedad, tiempo de vida y tiempo en el cual fue cortado el árbol de dónde provino la madera utilizada en las pruebas. Estos aspectos son muy importantes ya que generan variaciones en las propiedades mecánicas de la madera.

Debido a que el objetivo de estas pruebas es caracterizar los materiales de los cuales está hecho el carrete de madera No 24, se utilizara el resultado obtenido experimentalmente por la prueba de flexión.

6.2.4 Ensayo de impacto. Se realizo el ensayo de impacto en la máquina de ensayos Charpy, 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

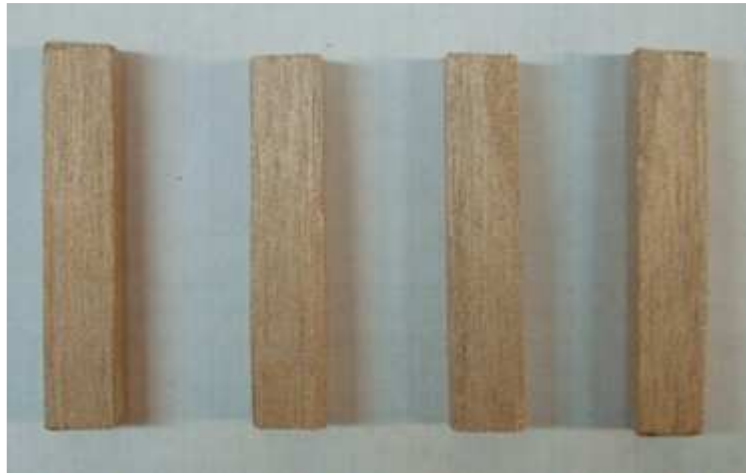
◊ **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la resistencia a la ruptura de la madera tipo Sajo, obtenido de la empresa Cobres de Colombia Ltda. – División de empaques de madera, en probetas de ensayo estándar sin muesca, con un 12% de humedad relativa.

◊ **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 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 24.

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

- 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 24. Probeta de ensayo para prueba de impacto tipo Charpy.



◇ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23°C y humedad relativa de 12% durante 72 horas 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 25. Máquina para prueba de impacto tipo 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 13, cuyo análisis estadístico provee un valor promedio de resistencia al impacto.

Tabla 13. Resultados de la resistencia al impacto.

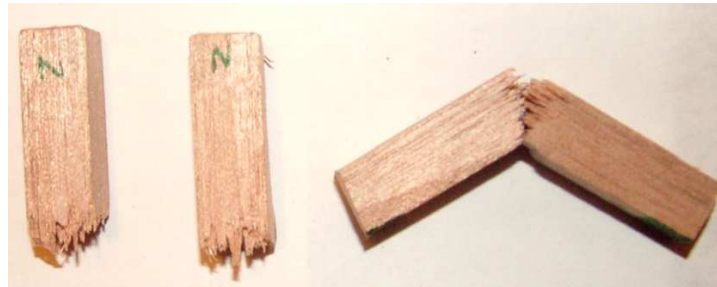
Probeta	Resistencia al impacto [J]	Angulo de barrido [°]
1	7,84	296
2	6,86	298
3	7,84	296
4	7,84	296
5	7,84	296
6	9,8	295
7	7,35	297
8	7,35	297
9	7,84	297
Promedio	7,84	296
Desviación estándar	0,81	0,88

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 proporcionados por el documento “Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento de Tolima”¹ (19.5J) se puede encontrar una grande diferencia (59.9%) debido 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.

Figura 26. Probeta #2 del ensayo de impacto fracturada.



6.2.5 Prueba para determinación de la densidad. Para determinar la densidad de en material solo es necesario obtener la masa y las dimensiones del material pesado.

◊ **Objetivo.** Este ensayo permite determinar la densidad de la madera tipo Sajo, obtenido de la empresa Cobres de Colombia Ltda. – División de empaques de madera, con un 12% de humedad relativa.

◊ **Método de preparación de las probetas.** Las probetas se prepararon a partir de una tabla de 20mm x 50mm y una longitud de 200mm; se obtuvieron en promedio 20 probetas de las cuales solo 5 fueron utilizadas para el ensayo. Para la fabricación de estas probetas se usaron las siguientes máquinas:

- Cepilladora de madera SCM F5L: Se usa para darle un acabado prolijo y recto de los tablones de madera.
- Sierra caladora de banco *Gamma 16"*: Utilizando una hoja P/Caladora OLSON #5 SIN PIN para dar las dimensiones finales a las probetas.

¹ ARÉVALO FUENTES, Rosven Libardo y LONDOÑO ARANGMANUAL, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué: Impresiones Conde, 2005. p. 101

Figura 27. Probetas de ensayo para determinación de densidad.



◊ **Procedimiento de acondicionamiento.** Las probetas de ensayo se acondicionaron a 23°C y humedad relativa de 12% durante 72 horas 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 5 probetas.

◊ **Clasificación de la máquina.** Balanza Navigator Modelo NOB110, Ohaus Corporation.

◊ **Resultados de la densidad.** Al realizar las mediciones de las probetas, tanto de dimensiones como de masa, se obtienen los datos planteados en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados de la densidad.

Probeta	Dimensiones [m]			Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]
1	0,020	0,027	0,021	1,15E-05	0,005	427,64
2	0,021	0,020	0,026	1,11E-05	0,005	431,61
3	0,027	0,018	0,021	1,00E-05	0,005	459,24
4	0,018	0,021	0,027	9,98E-06	0,005	470,89
5	0,027	0,021	0,019	1,06E-05	0,005	444,45
Promedio						446,77

7. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

En la mecánica de un sólido deformante como la de un carrete de madera, las aplicaciones prácticas pueden agruparse en dos grandes familias según el tipo de problemas asociados:

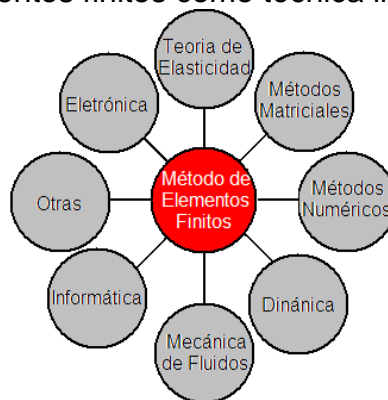
- **Sistemas discretos:** El sólido a analizar está dividido de forma natural, en elementos claramente definidos.
- **Sistemas continuos:** El sólido no puede ser dividido en forma natural en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo.

Siendo el caso de un sistema continuo el tipo de problema que genera el carrete de madera, se hace referencia al cálculo estructural, el método de elementos finitos (F.E.M.), que puede ser entendido como una generalización de estructuras al análisis de sistemas continuos.

En el método de elementos finitos se supone que el comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide, queda definido por un número finito de parámetros (grados de libertad) asociados a los puntos que en dicho momento se une al resto de los elementos de su entorno (nodos). Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación.

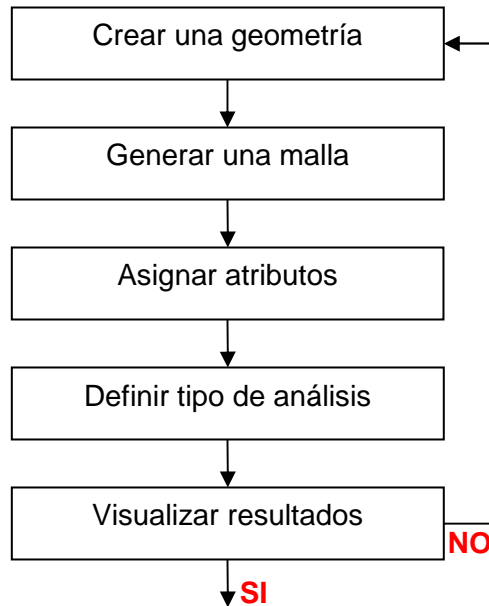
A partir de lo anterior, se aprecia que el método de elementos finitos es una poderosa técnica numérica que permite calcular esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en partes y estructuras mecánicas, civiles, aeronáuticas, marinas y otras disciplinas de la ingeniería.

Figura 28. Método de elementos finitos como técnica integradora.



Para el análisis del carrete de madera No 24 usando el método de elementos finitos, es necesario realizar una serie de pasos, ver figura 29, para obtener los resultados del análisis:

Figura 29. Diagrama del procedimiento para análisis usando el método de elementos finitos.

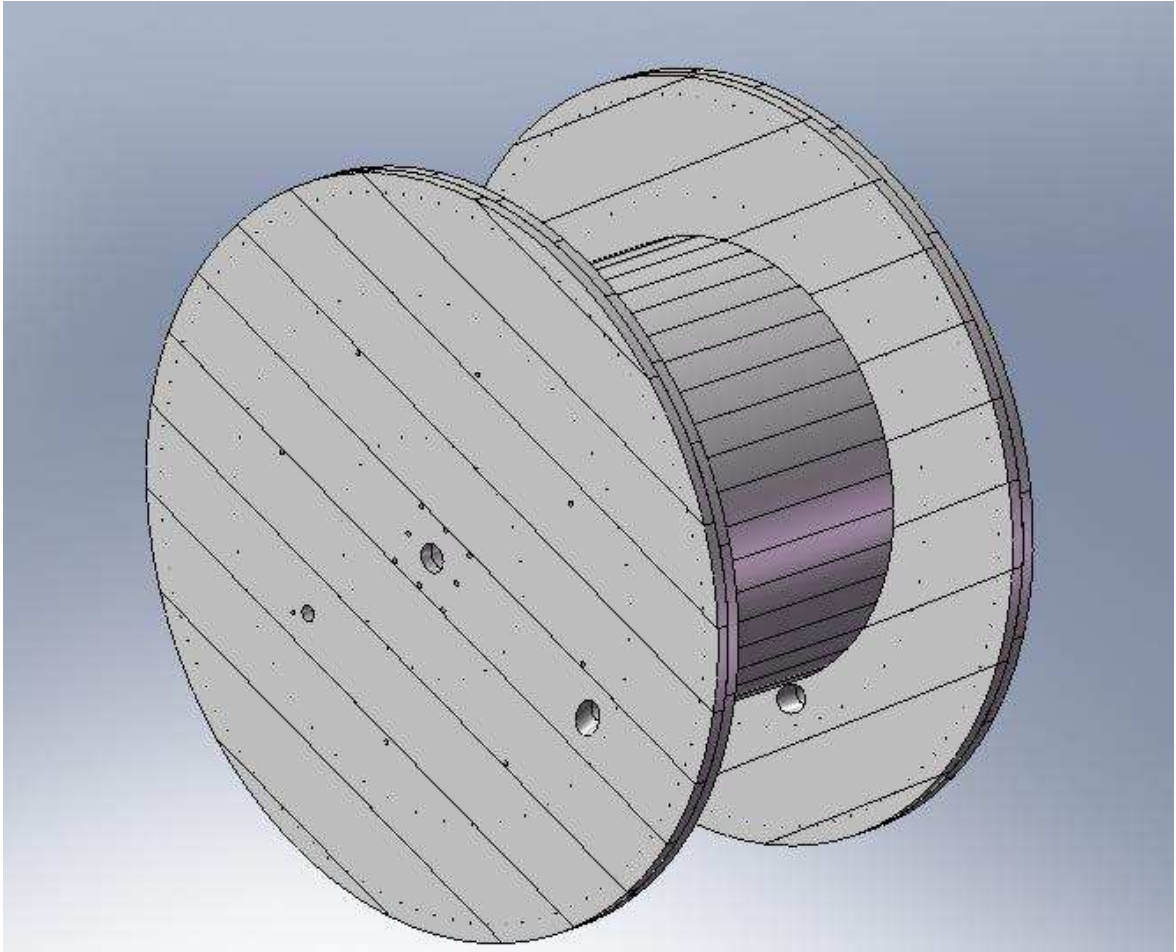


7.1 CREACIÓN DE UNA GEOMETRÍA.

El objetivo de este paso es realizar un modelo continuo tridimensional del carrete, usando la metodología CAD (Solid Edge® y Solid Work®) que señale las características geométricas del carrete de madera No. 24.

En la figura 30 se puede observar la geometría del carrete de madera No. 24, sometido a una carga máxima proporcionada por el cable que es enrollado en él. Esta carga solo afecta el lado superior del tambor dado que el cable que se encuentra al lado inferior esta colgando.

Figura 30. Dibujo CAD del carrete de madera No. 24.

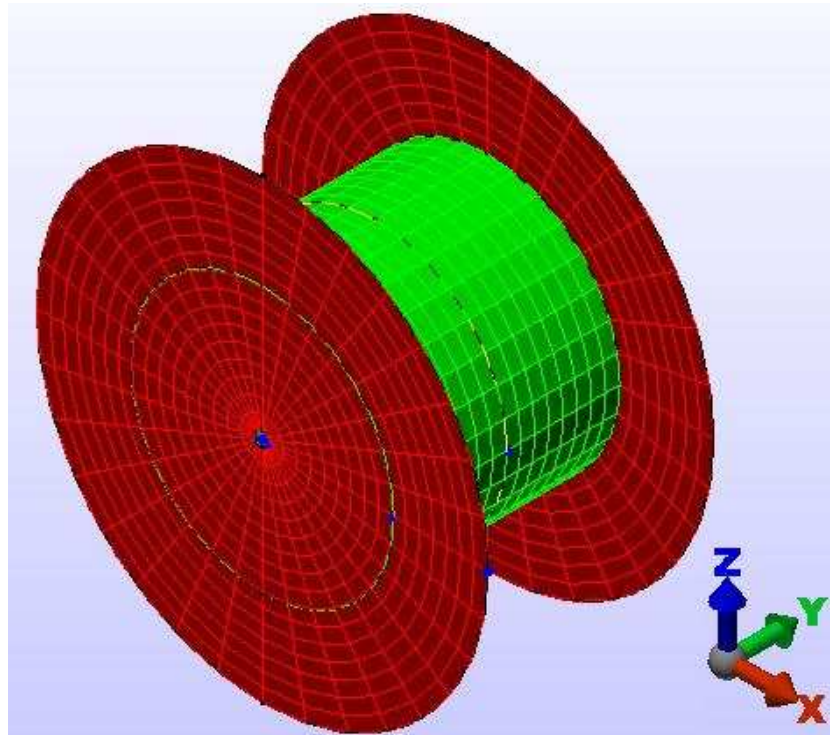


7.2 GENERACIÓN DE UNA MALLA.

Este paso se realiza con el fin de obtener un modelo discreto a partir del modelo continuo del carrete de madera No 24, que permita realizar el análisis del sólido usando el método de elementos finitos.

A partir de este paso se utiliza la metodología CAE, ya que este proceso de discretización requiere de una herramienta computacional dada la complejidad de la geometría y operaciones; el software aquí utilizado es Algor® por la facilidad de trabajo y efectividad en su análisis, ver figura 31.

Figura 31. Dibujo CAE del carrete de madera No 24 mallado.



7.3 ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS.

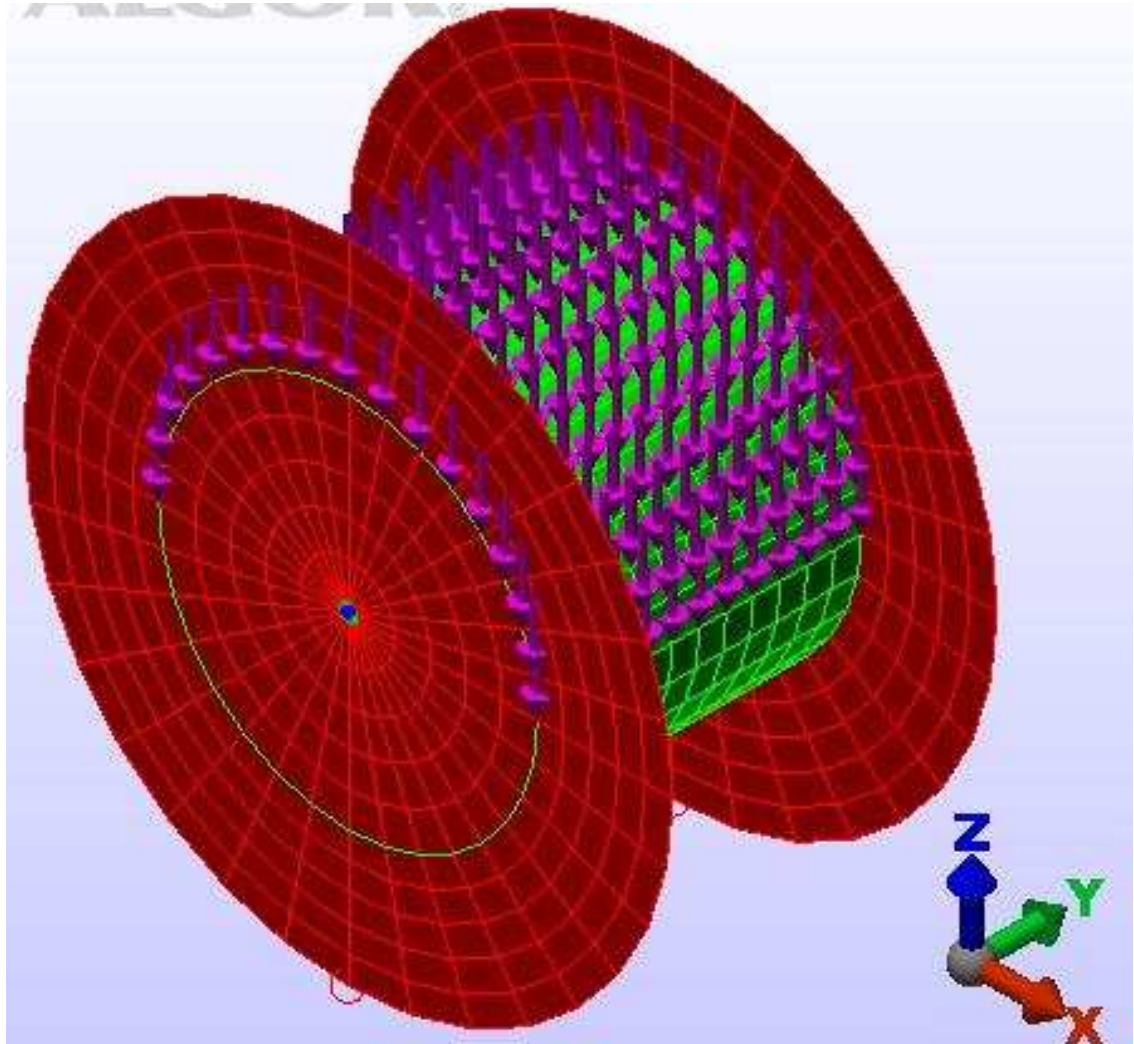
Al asignar atributos al carrete se refiere a los factores externos a la geometría del carrete que afectan el comportamiento de este, como lo son las fuerzas y/o cargas que se le aplican al carrete, el material de carrete y del cable enrollado en él, restricciones de movimiento, temperaturas, velocidades, etc.

Dada la cantidad de factores que pueden afectar el desempeño del carrete No 24, se requiere realizar un análisis para cada una de estas situaciones:

7.3.1 Situación 1: Colocado sobre el suelo. El carrete de madera se encuentra ubicado sobre el suelo, teniendo dos puntos de contacto con el suelo (uno en cada disco del carrete), y soportando todo el peso del cableado que corresponde a 6855kg.

Dado lo anterior, se crean dos restricciones de traslación y dos de rotación (T_x , T_z , R_x , R_z) en los dos puntos del carrete que tienen contacto con el suelo, siendo estos puntos el soporte del carrete de madera, ver figura 32.

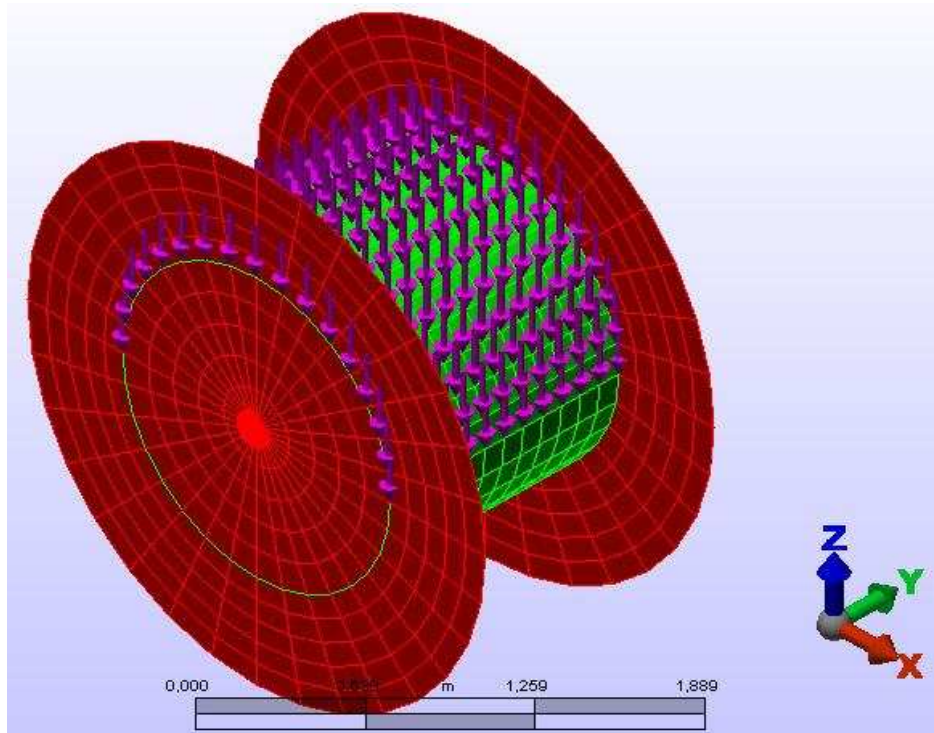
Figura 32. Modelo CAE del carrete de madera No 24 con 2 puntos de apoyo.



7.3.2 Situación 2: Suspendingo sobre un eje. Esta situación es cuando el carrete se encuentra suspendido sobre un eje que atraviesa todo el carrete por medio del buje, mientras éste se encuentra cargando el cableado (6855kg).

Dada esta situación, el orificio central de los disco del carrete de madera destinado para insertar el buje, no tendrá restricciones de traslación ni rotación respecto al eje axial del carrete (T_y , R_y), ver figura 33.

Figura 33. Modelo CAE del carrete de madera No 24 suspendido sobre un eje.



7.3.3 Situación 3: Transportado por un montacargas. Debido a que el carrete es un elemento utilizado para transportar cables, este debe ser trasladado de un lugar a otro: el método más común y sencillo para transportar carretes de madera son utilizando un montacargas (grúa horquilla) que, como se observa en la figura 34, posee dos ganchos que sujetan el carrete por los lados de los discos y lo elevan a una altura alrededor de 30cm para poder mover el carrete de madera.

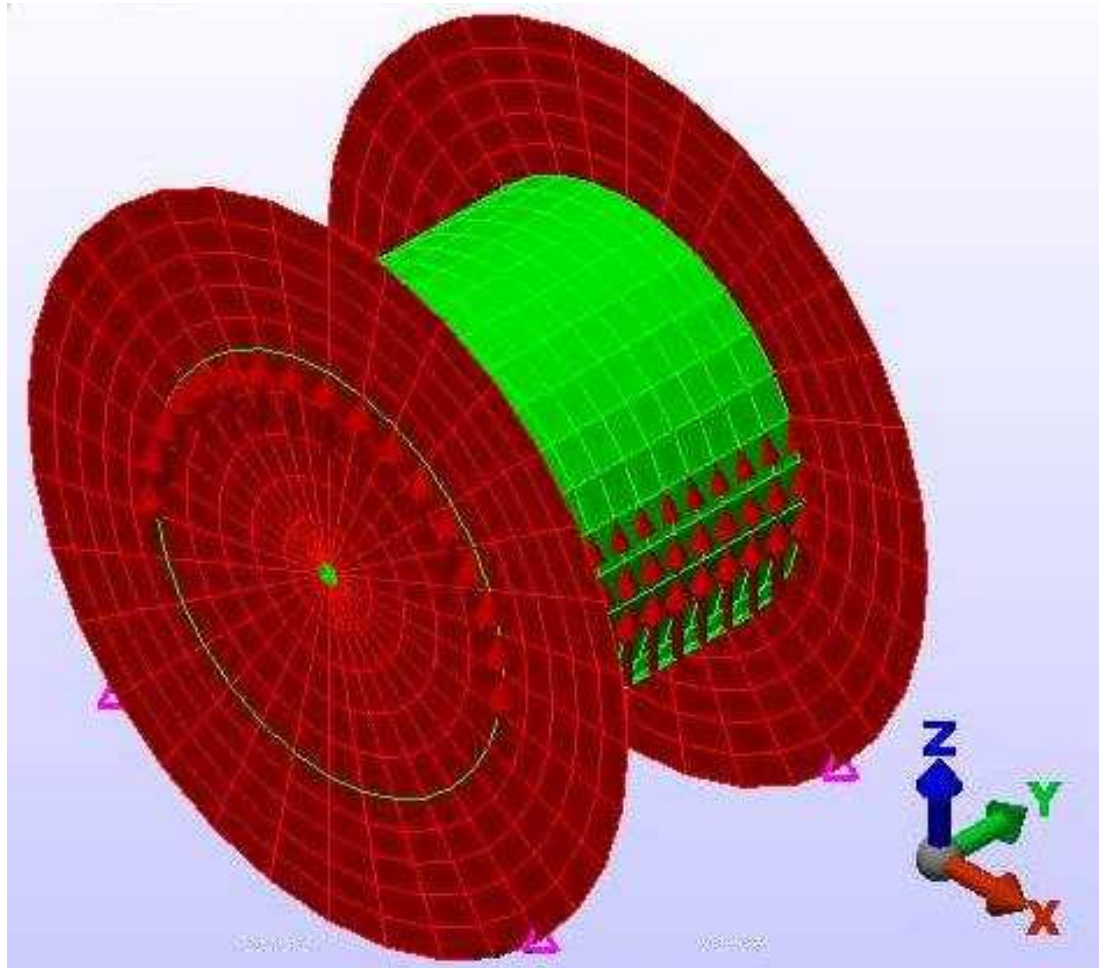
Figura 34. Máquina montacargas (grúa horquilla) sujetando un carrete.



Fuente: PHELPS DODGE INTERNATIONAL CORPORATION. Recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla [En línea]. Monterrey: Tecnojar S.A, 2008. [Consultado 30 de junio de 2008]. Disponible en internet: <http://www.tecnojar.com/tecnoshop/index.php?act=viewProd&productId=250>

En este caso, el modelo CAE del carrete se encuentra con 4 nodos que poseen dos restricciones de traslación (T_x y T_z) y las restricciones de rotación en todas sus direcciones. Estos puntos, dos en cada disco, se encuentran a la misma altura (aproximadamente 30cm) y a cada lado del disco, situado en sus bordes, como se ve en la figura 35.

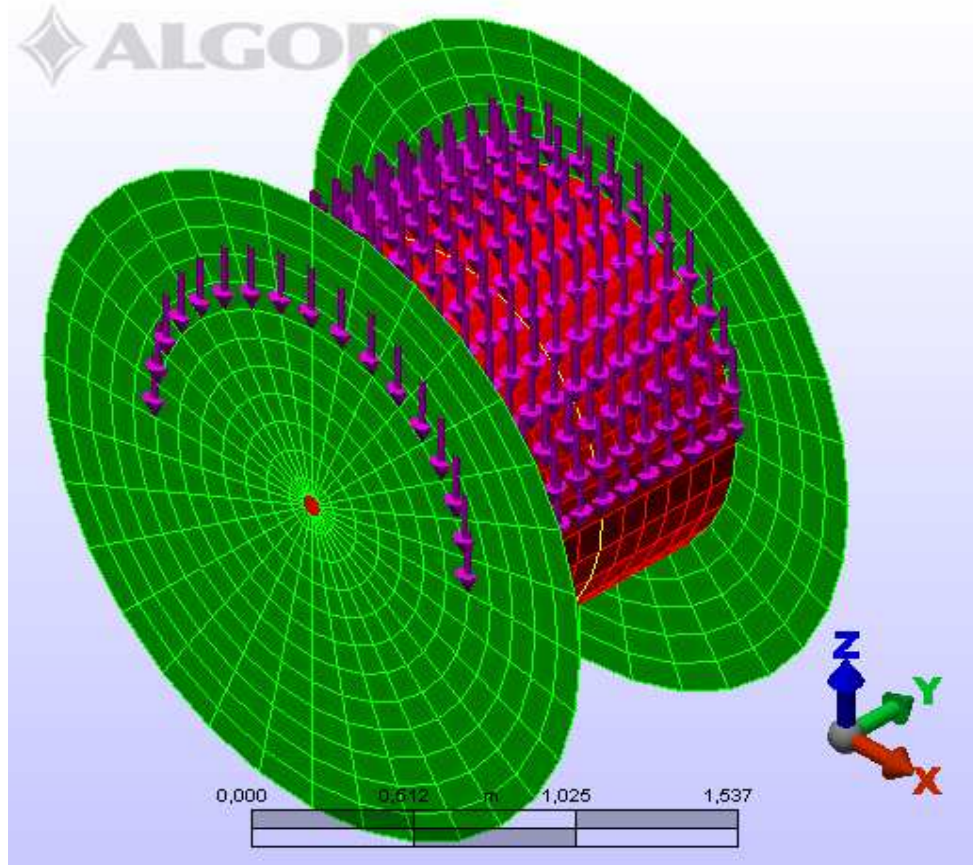
Figura 35. Modelo CAE de carrete de madera No 24 sujetado por un montacargas.



7.3.4 Situación 4: Caídas. Aunque esta situación debe evitarse en los carretes de madera No 24, muchas veces el carrete es lanzado desde plataformas y/o camiones de un metro de altura, aproximadamente.

Dada la constancia de esta situación, es necesario revisar que el comportamiento del carrete respecto a la una caída de 1m de altura sobre el suelo, ver figura 36.

Figura 36. Modelo CAE del carrete de madera No 24 situado a 1m del suelo.



Las propiedades del material del carrete, que son indispensables para el desarrollo de la metodología CAE, se encuentran resumidas en la tabla 14, producto de la investigación realizada e informada en el capítulo 2 de esta tesis.

Tabla 15. Propiedades mecánicas de la madera tipo Sajo. Material ortotrópico.

PARÁMETRO		VALOR	UNIDADES
Densidad		446,77	Kg.m ⁻³
Módulo elástico	Eje local 1	12200000000	N.m ⁻²
	Eje local 2	2400000000	N.m ⁻²
Módulo elástico a cortante		3720000000	N.m ⁻²
Coeficiente de Poisson		0,28	
Coeficiente de dilatación térmica	Eje local 1	0,00000378	°C ⁻¹
	Eje local 2	0,0000103	°C ⁻¹

7.4 DEFINICIÓN DEL TIPO DE ANÁLISIS.

El tipo de análisis es un parámetro muy importante de especificar al utilizar la metodología CAE, puesto que cada análisis tiene una serie de parámetros iniciales que producen ciertos efectos en el comportamiento final del objeto de análisis. Los siguientes son algunos de los tipos de análisis que realiza el software Algor®:

- Análisis lineal estático de esfuerzos.
- Análisis no lineal estático de esfuerzos.
- Simulación de eventos mecánicos.
- Análisis de fatiga.
- Análisis de frecuencias naturales y formas modales.
- Transferencia de calor en estado estable y transitorio.
- Análisis de fluidos en estado estable e inestable.
- Análisis de pandeo.

Pero para las cuatro situaciones en las que será analizado el carrito de madera No 24, se utilizará solo dos de los anteriores tipos de análisis:

7.4.1 Análisis lineal estático de esfuerzos. Es el tipo más común de FEA. Permite el estudio del esfuerzo, tensión, desplazamiento y fuerzas axiales que derivan de la carga estática. Este tipo de análisis suele ser suficiente para situaciones en las que las cargas son conocidas y el tiempo de pico de tensión es evidente.

En este análisis se aplican cargas estáticas (como las fuerzas o presiones) a un modelo de elementos finitos en un análisis estático de estrés. Luego, se añaden los datos del material elástico, las limitaciones y otra información como la dirección de la gravedad. Las fuerzas estáticas se asumen constantes a lo infinito, para un período de tiempo, mientras que el esfuerzo, el movimiento y la deformación sean pequeños. De la misma forma, se supone que el material no se deforma más allá de su límite elástico y que cualquier resultado por efectos dinámicos de la carga son insignificantes (es decir, los efectos inerciales pueden ser omitidos), conocido como equilibrio mecánico.

Dada las características anteriores, se establece que para las tres primeras situaciones (carrete colocado sobre el suelo, suspendido sobre un eje y transportado por un montacargas) se usa este tipo de análisis.

7.4.2 Análisis no lineal estático de esfuerzos. Permite el estudio del esfuerzo, la tensión y el desplazamiento en los sistemas con geometría y/o material no lineal pero movimiento despreciable. En este tipo de análisis, la carga puede causar gran deformación, una deformación permanente más allá del punto de fluencia del material y punto de tensiones residuales. Los efectos de la masa son ignorados debido a la ausencia de movimiento, sin embargo, el contacto entre las partes de un mecanismo o entre partes independientes pueden ser manipulados.

El análisis no lineal estático de esfuerzos produce un análisis más preciso que los resultados en el análisis lineal estático de esfuerzos para los modelos donde la carga concentrada va más allá que el punto de fluencia del material. Por lo general, esta concentración de esfuerzos se produce cerca de limitaciones o alrededor de pequeñas características geométricas, tales como los filetes y los agujeros. El aumento se debe a que el análisis lineal estático produce esfuerzos sobre la base de la primera forma del objeto, mientras que el análisis no lineal estático determina el esfuerzo basándose en la forma de deformación del objeto para un material no lineal.

Así que para el análisis del carrete de madera en la última situación que es caída, es indispensable utilizar este tipo de análisis dada las mejoras que esta implica.

7.5 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS.

Este, como último paso para el análisis por elementos finitos, es el más importante dado que visualiza el comportamiento del carrete en cada una de las situaciones; se evalúan los esfuerzos a los que está sometido el carrete, el factor de seguridad con el que fue diseñado y los desplazamientos de cada una de las partes que conforma el carrete.

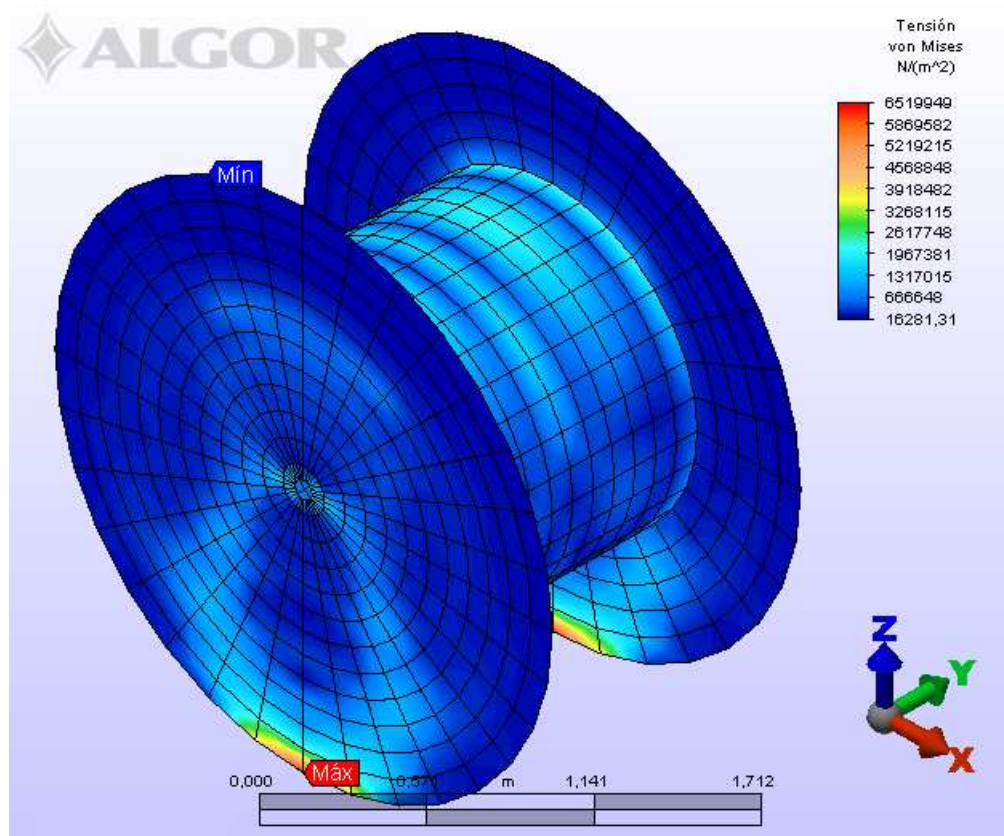
Así que, para cada una de las situaciones de trabajo que en este proyecto se ha señalado se evaluarán los esfuerzos, factores de seguridad y desplazamientos, resultados del análisis realizado mediante la herramienta computacional Algor®.

7.5.1 Resultados del esfuerzo o tensión del carrete de madera No 24. Este resultado determina, primordialmente, la resistencia estática del carrete de madera No 24 en cada una de las situaciones, usando el criterio de Von Mises dado que trabaja con el esfuerzo ultimo del material, siendo esta característica muy conveniente para el tipo de material del carrete ya que la madera no presenta un rango de cedencia bien definido.

A continuación están los resultados del esfuerzo o tensión del carrete de madera No 24 para cada uno de los casos usando el criterio de Von Mises.

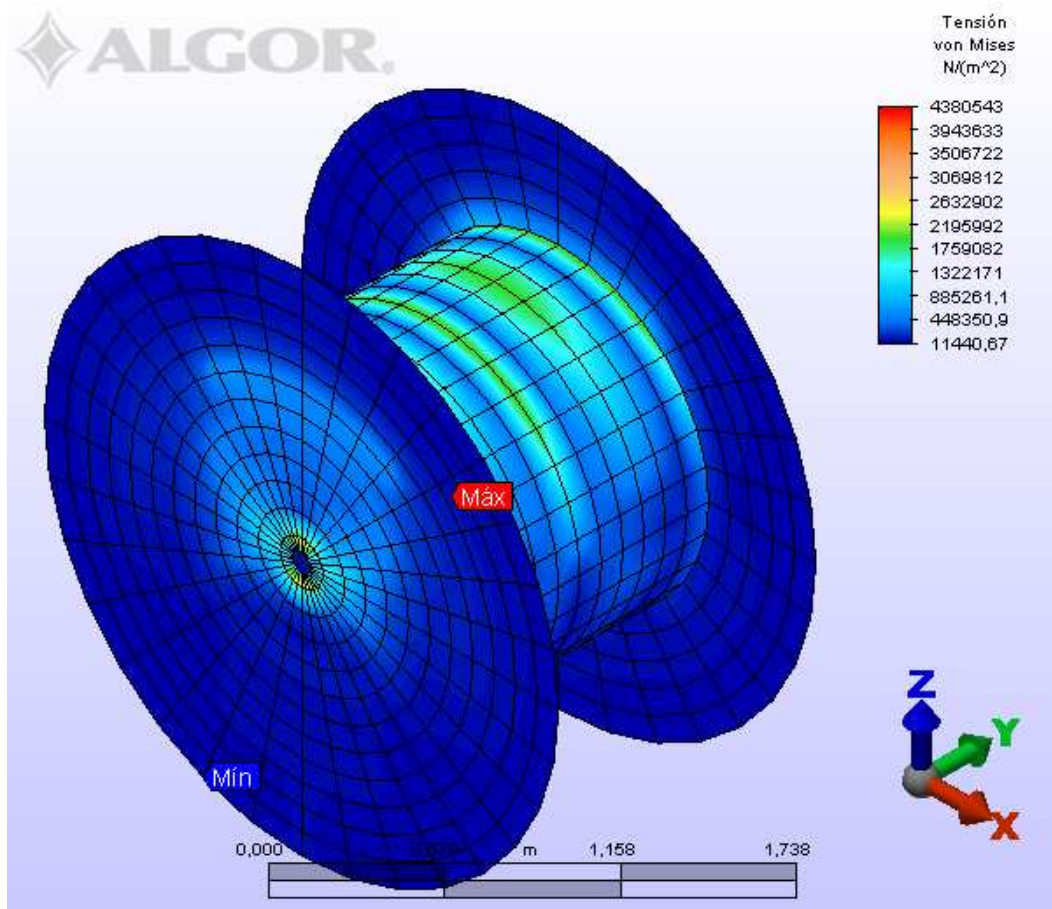
- **Situación 1: Colocado sobre el suelo.** Esta es una situación muy común para el carrete, por lo que se debe tomar más atención a los resultados aquí mostrados: El carrete de madera No 24 presenta un esfuerzo máximo de 6,52MPa que se crea alrededor del punto que se encuentra en contacto con el suelo; mientras que el esfuerzo mínimo se encuentra en la parte superior de los discos y tiene una magnitud de 16,28kPa, ver figura 37.

Figura 37. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está colocado en el suelo.



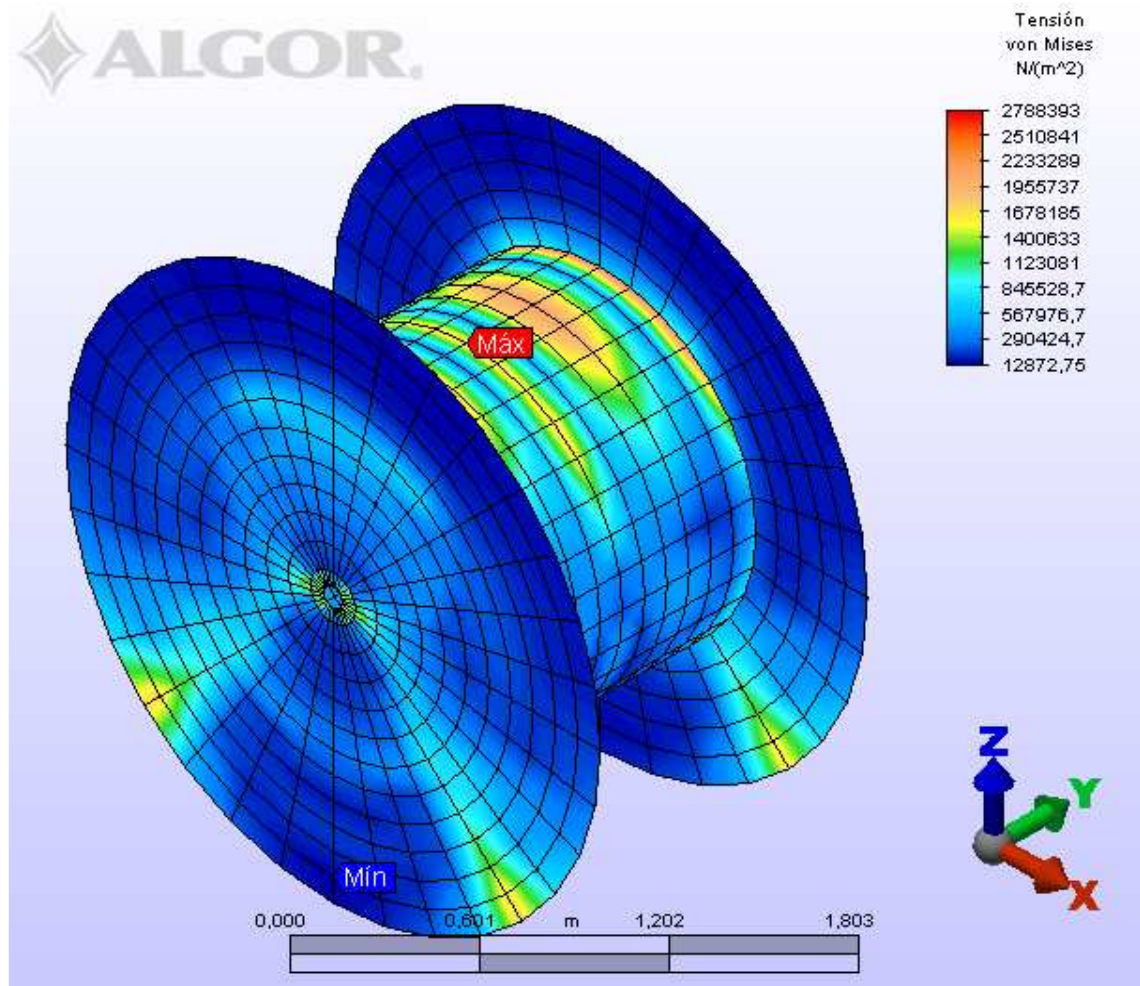
- **Situación 2: Suspendido sobre un eje.** Dado que esta es una situación normal de operación, es decir que al momento de utilizar el cable, el carrete se encuentra en esta situación. Los esfuerzos encontrados en el carrete de madera No 24 son: Hay un esfuerzo máximo de 4,38MPa que se crea alrededor del orificio destinado para el buje del carrete tanto en los discos laterales como en la central y un esfuerzo mínimo de 11,44kPa que se encuentra en la parte inferior de los discos. Ver figura 38.

Figura 38. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está suspendido sobre un eje.



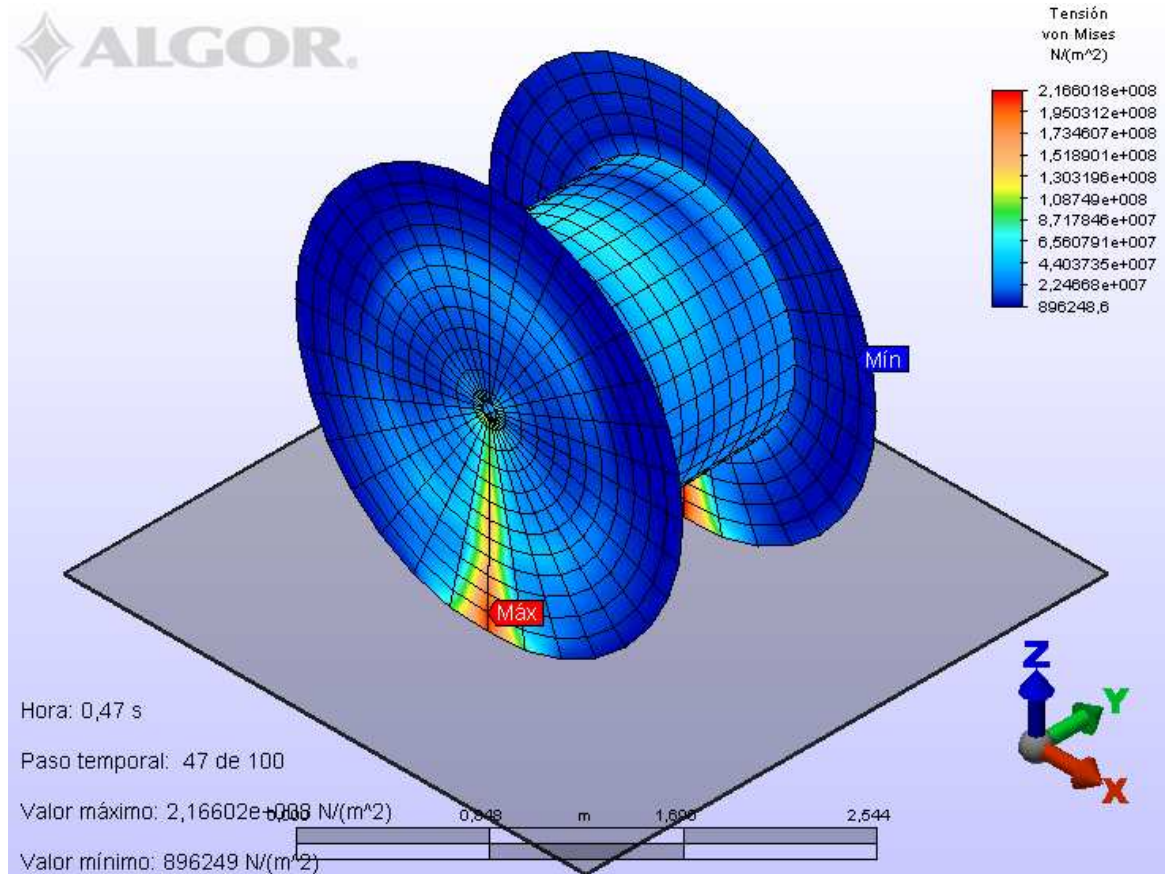
- **Situación 3: Transportado por un montacargas.** El carrete de madera No 24 es transportado comúnmente por un montacargas. Esta situación genera los siguientes valores limites de esfuerzos: Un esfuerzo máximo de 2,79MPa que se forma alrededor del tambor donde este coincide con la central y un esfuerzo mínimo de 12,87kPa se encuentra en la parte inferior de los discos laterales. Ver figura 39.

Figura 39. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está siendo transportado por un montacargas.



- **Situación 4: Caída.** Dado que este análisis es diferente a los anteriores, esta vez se planteará el peor caso durante la caída, la cual corresponde al momento en que el carrete de madera No 24 choca con el suelo. Este impacto genera un esfuerzo máximo de 216,6MPa en el extremo del disco lateral que está en contacto con el suelo y un esfuerzo mínimo de 896,2kPa a los extremos laterales de los discos. Ver figura 40.

Figura 40. Presentación de los esfuerzos en el carrete cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo.



Después de tener los resultados anteriores se establece que el caso crítico, en cuanto a los esfuerzos, se presenta en la situación 4, cuando el carrete se encuentra cayendo desde una altura de 1m, ver tabla 16.

Tabla 16. Esfuerzos máximos y mínimos de cada una de las situaciones del carrete de madera No 24.

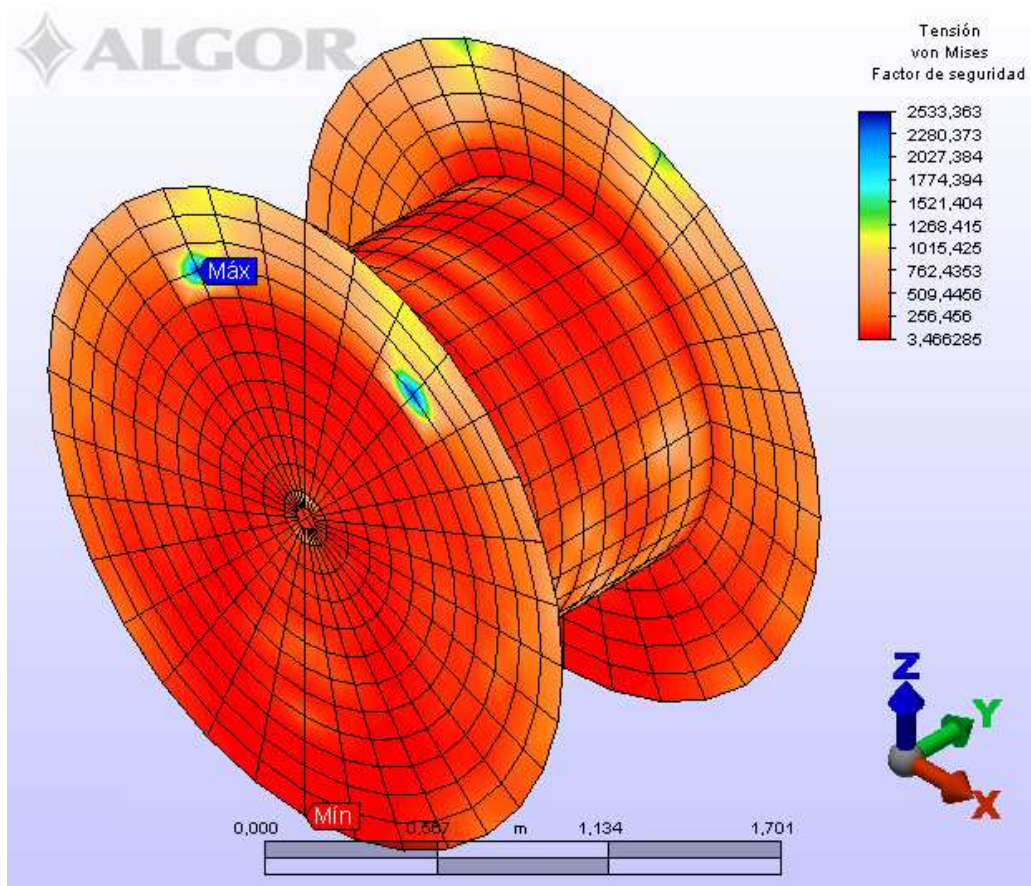
Situación	SUELO	EJE	MONTACARGAS	CAIDAS
Esfuerzo Máximo [MPa]	6,52	4,38	2,79	216,6
Esfuerzo Mínimo [kPa]	16,28	11,44	12,87	896,2

7.5.2 Resultados del factor de seguridad del carrete de madera No 24. El factor de seguridad se determina a partir del esfuerzo que se genera en el carrete de madera No 24 y el esfuerzo último del material, que en este caso es madera tipo Sajo, que corresponde a 22,6MPa en los discos, 74,3MPa en el tambor y la central.

El factor de seguridad es un factor muy importante para realizar el rediseño del carrete de madera No 24, pues por medio de él se pueden establecer límites de funcionalidad del diseño.

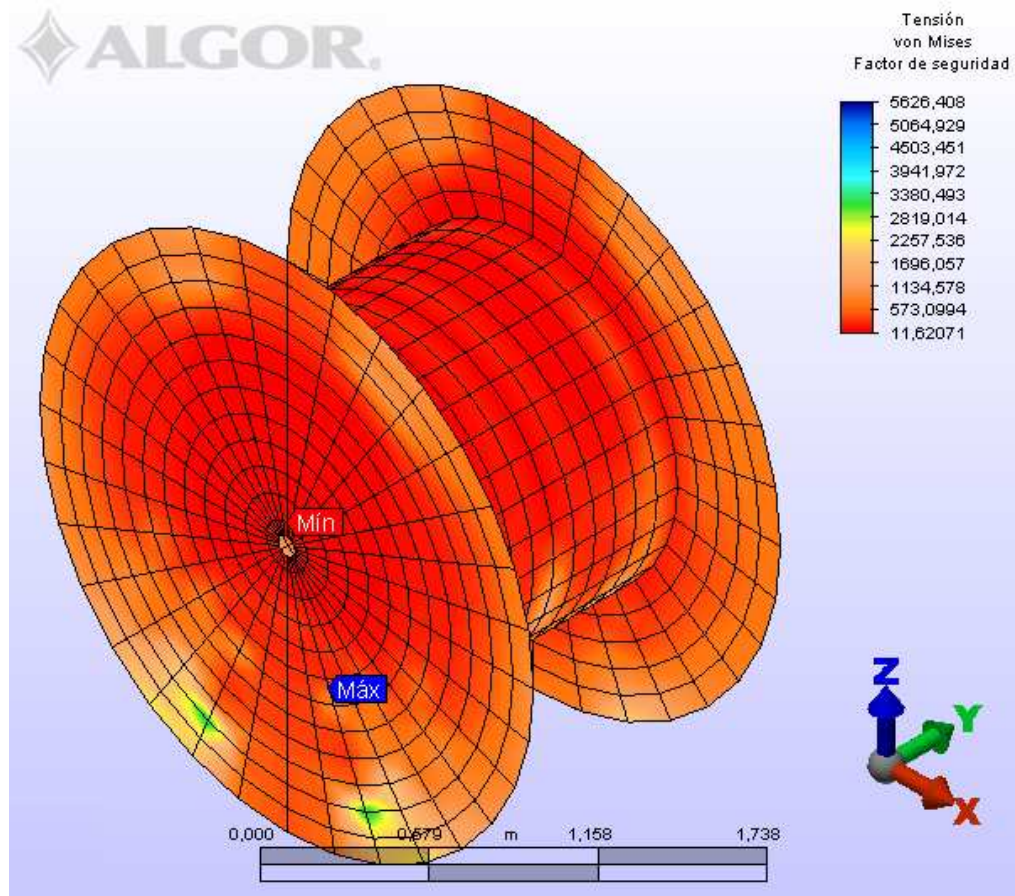
• **Situación 1: Colocado sobre el suelo.** Una vez especificados los esfuerzos últimos del material para cada uno de los elementos del carrete de madera No 24, se obtiene que el factor de seguridad mínimo es de 3,46 y se encuentra en la zona de contacto del carrete con el suelo; mientras que el factor de seguridad máximo que es de 2533 está ubicado en la parte superior de los discos. Ver figura 41.

Figura 41. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 cuando se encuentra sobre el suelo.



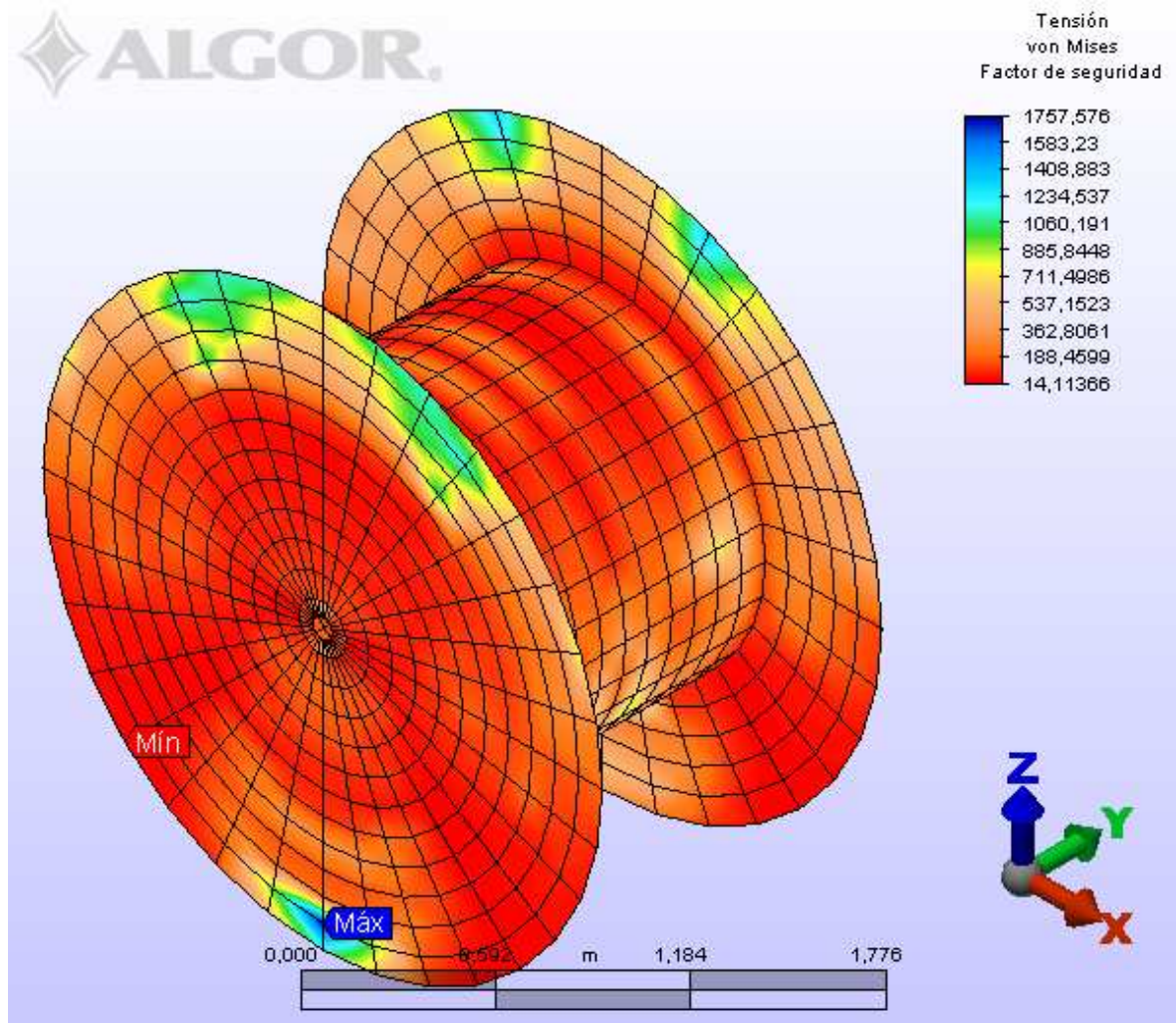
- **Situación 2: Suspendido sobre un eje.** Al obtener un factor de seguridad mínimo de 11,62 en la zona cercana al orificio del buje en los discos laterales, se puede afirmar que el carrete de madera No 24 está diseñado para soportar las cargas mientras trabaja como empaque para cables, ver figura 42; en cuanto al factor de seguridad máximo de 5626 en la parte inferior del tambor del carrete, demuestra que esta sección del carrete esta súper-dimensionada.

Figura 42. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 cuando está suspendido sobre un eje.



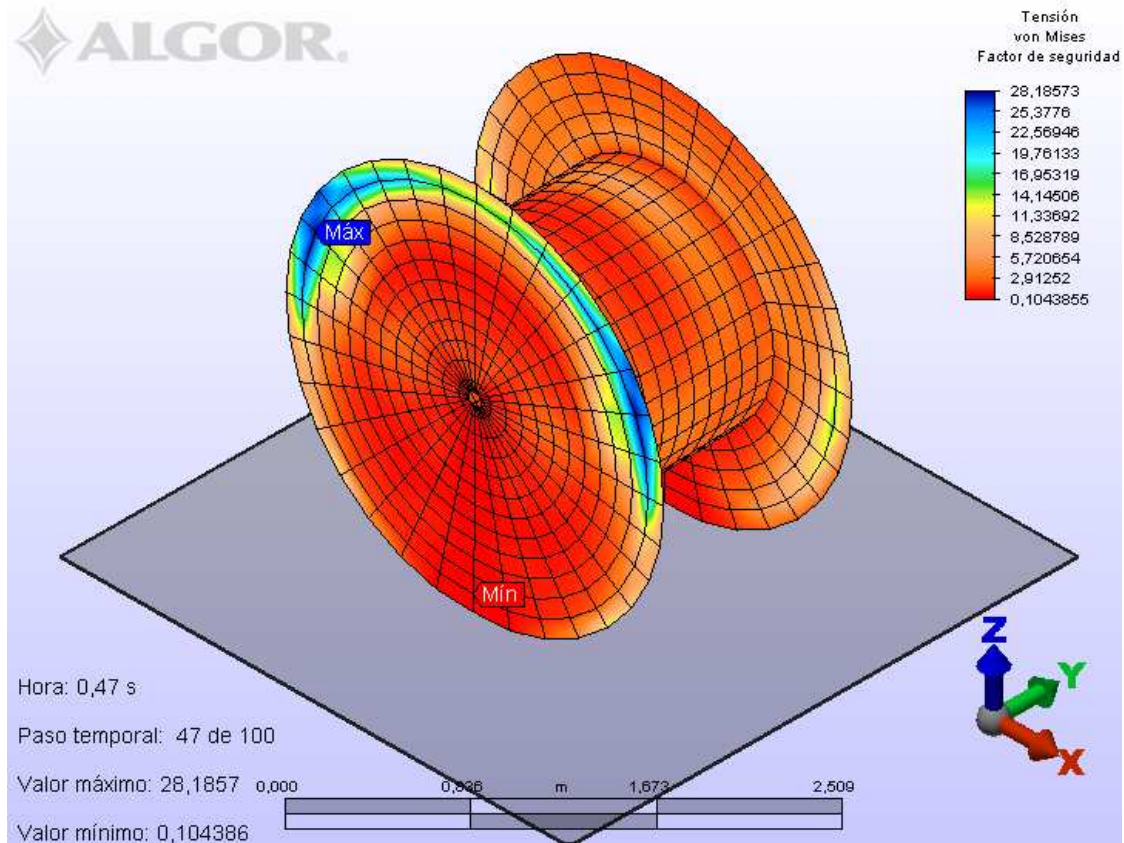
- **Situación 3: Transportado por un montacargas.** Para cumplir la función de transportador de cables, el carrete de madera No 24 está bien diseñado ya que su factor de seguridad mínimo es de 14,11 y se encuentra en los discos laterales donde están los puntos de apoyo del carrete sobre el montacargas, mientras que el factor de seguridad máximo de 1757 que se encuentra en pequeña proporción en la parte inferior de los discos laterales, permite un buen trato del cable mientras está siendo transportado. Ver figura 43.

Figura 43. Presentación de los factores de seguridad del carrete de madera No 24 siendo transportado por un montacargas.



- **Situación 4: Caída.** Dada su particular diferencia en el análisis, esta situación en su caso crítico demuestra un factor de seguridad mínimo de 0,10 en la parte central del disco, mientras que en los extremos laterales presenta un factor de seguridad máximo de 28,18. Ver gráfica 44.

Figura 44. Presentación de los factores de seguridad en el carrito de madera No 24 cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo.



Estos valores máximos y mínimos de los factores de seguridad para cada una de las cuatro situaciones se encuentran plasmados en la tabla 17, con lo que se demuestra que el carrito de madera No 24 no puede someterse a la cuarta situación dado que el factor de seguridad es muy bajo como para trabajar adecuadamente.

Tabla 17. Factores de seguridad máximos y mínimos para cada una de las situaciones del carrito de madera No 24.

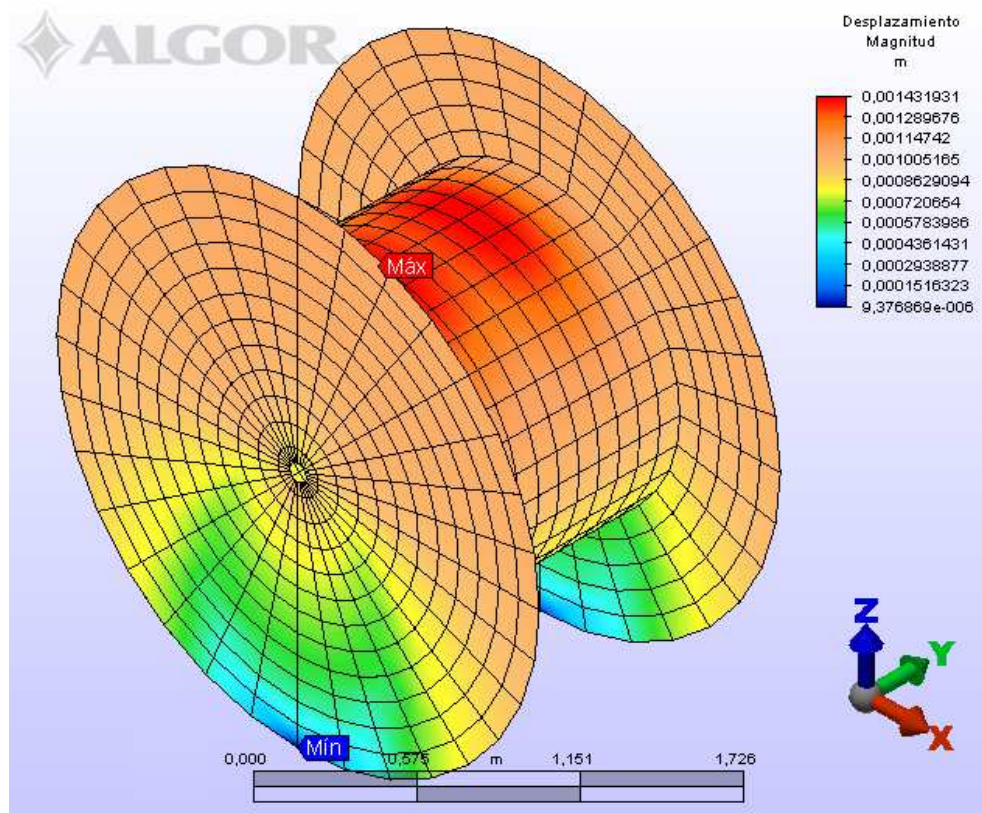
Situación	SUELO	EJE	MONTACARGAS	CAIDAS
Factor de Seguridad Máximo	2533	5626	1757	28,18
Factor de Seguridad Mínimo	3,46	11,62	14,11	0,10

7.5.3 Resultados del desplazamiento del carrete de madera No 24. El desplazamiento del carrete de madera No 24 efecto de las fuerzas ejercidas por el cable enrollado en él, son parámetros muy importantes que se deben analizar debido que si estos desplazamientos son muy grandes (mayores a 3mm¹) pueden generar daños en el cable enrollado en él y en la estructura del carrete mismo.

Estas son los desplazamientos máximos y mínimos que se presentan el carrete de madera No 24 en cada una de las cuatro situaciones:

- **Situación 1: Colocado sobre el suelo.** Como se muestra en la figura 45, los desplazamientos mayores se presentan sobre el tambor y son de 1,43mm, esto es debido a que el peso del cable actúa directamente en ese lugar; mientras que los desplazamientos menores se encuentran en la zona que está en contacto con el suelo y tienen una magnitud de 9,37µm.

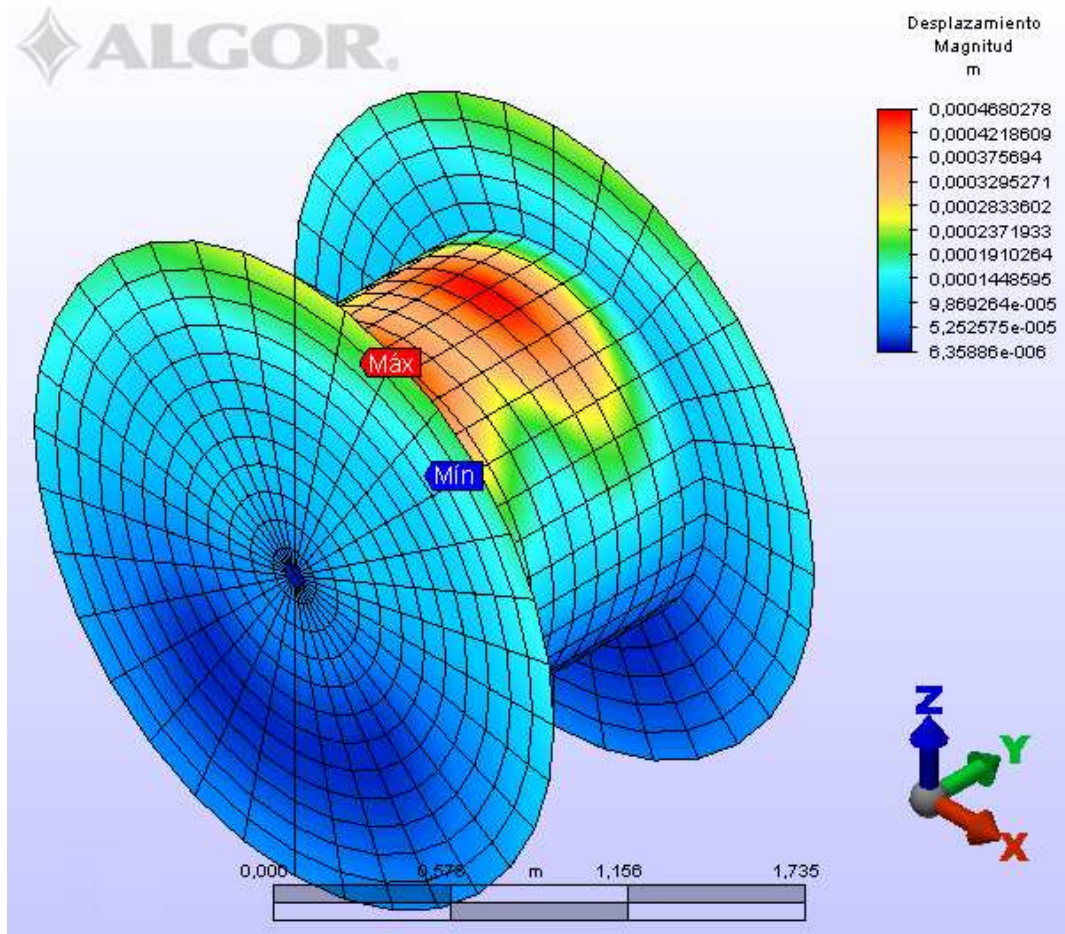
Figura 45. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando se encuentra sobre el suelo.



¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Carretes de madera para cables. Primera actualización. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 3787, p.4

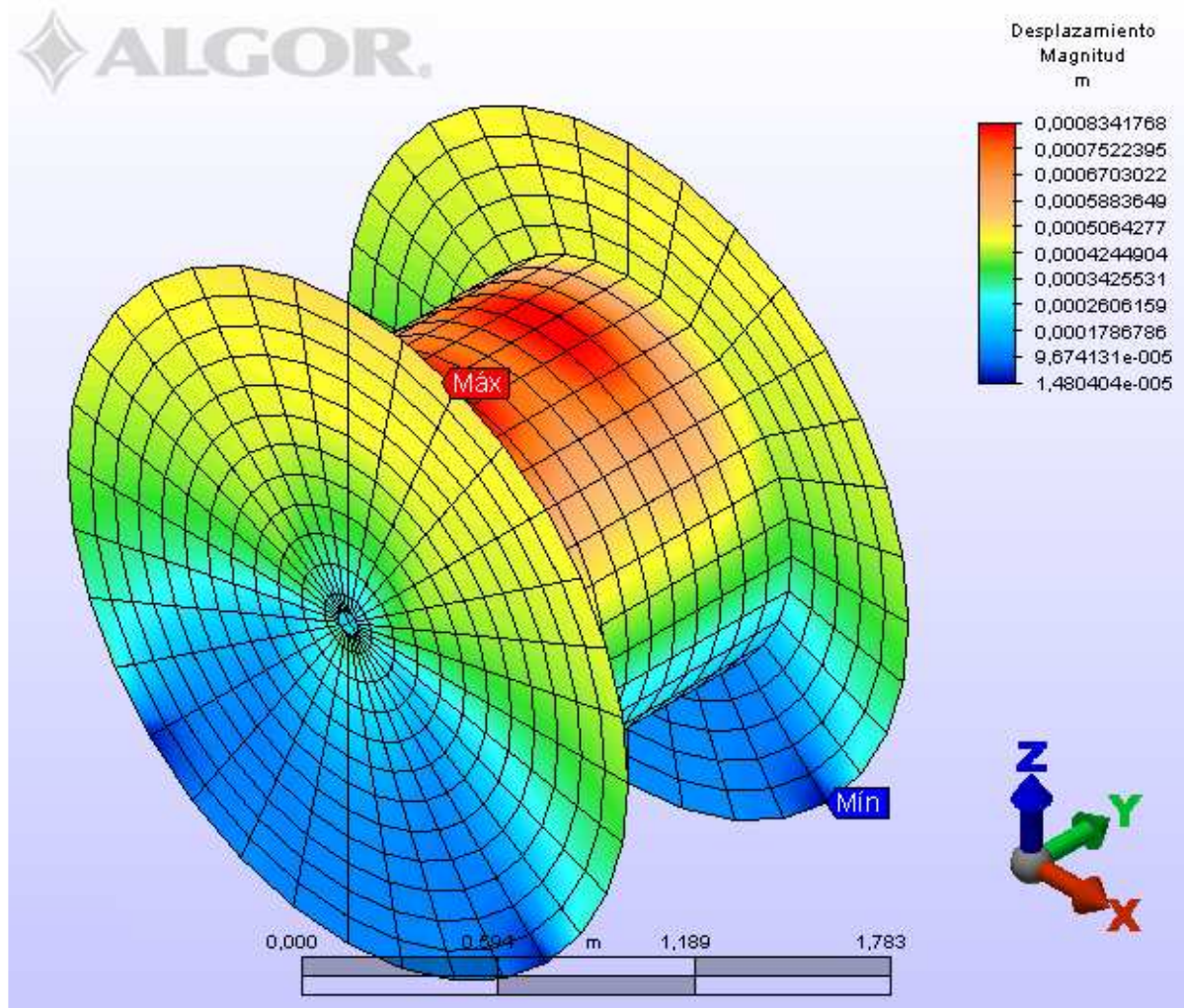
- **Situación 2: Suspendido sobre un eje.** Los desplazamientos máximos para esta situación se encuentran, al igual que en la situación anterior, en el tambor efecto del cable que se encuentra enrollado en él, tiene una magnitud de 0,47mm; mientras que el carrete tiene un desplazamiento mínimo de 6,36µm en la parte inferior del tambor del carrete de madera No 24, ver figura 46.

Figura 46. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando se encuentra suspendido sobre un eje.



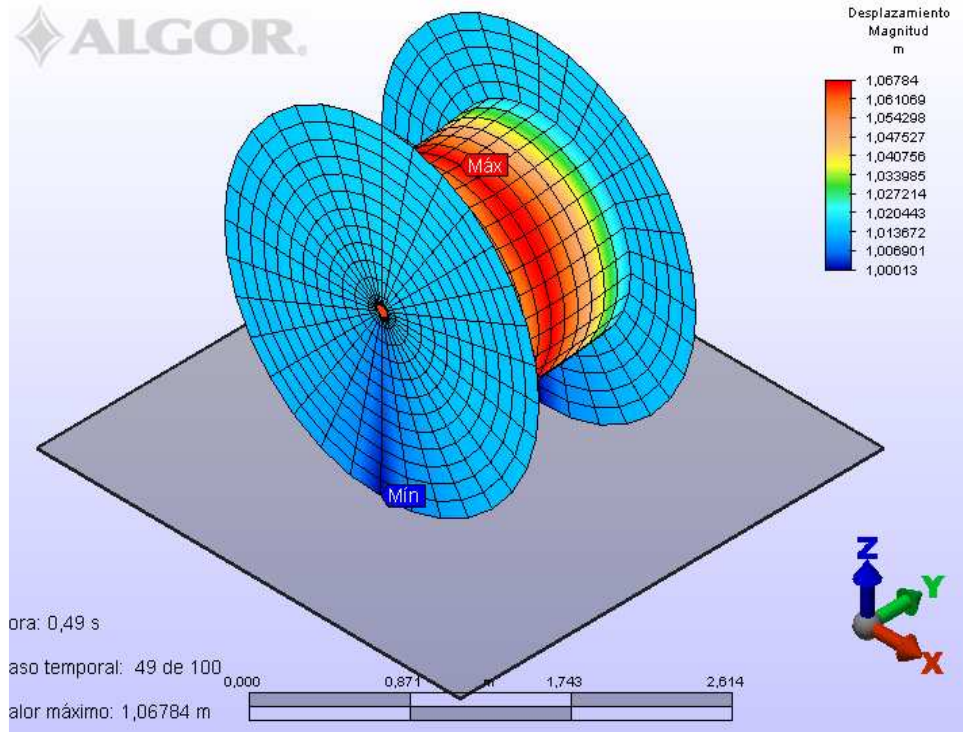
- **Situación 3: Transportado por un montacargas.** Los mayores desplazamientos ocurren sobre el tambor, en la zona donde se encuentran los cables y tienen una magnitud de 0,83mm; mientras que los menores desplazamientos están alrededor a los puntos donde el montacargas sujeta el carrete de madera No 24 y tiene una magnitud de 14,80µm. Ver figura 47.

Figura 47. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 siendo desplazado por un montacargas.



- **Situación 4: Caída.** En esta situación, se mas complejo determinar los desplazamientos del carrete, dado que el software los halla pero dependiendo de la altura desde la que se arroja el elemento. Pero analizando dos casos puntuales, los mayores desplazamientos que se presentan encima del tambor, cuya distancia inicial del suelo es de 1,06m, y tiene una magnitud de 7,84mm; en cuanto a los menores desplazamientos, en este caso, se encuentran en el extremo de los discos que está en contacto con el suelo, cuya altura inicial es de 1m, tiene una magnitud de 0,13mm. Ver figura 48.

Figura 48. Representación gráfica de los desplazamientos del carrete de madera No 24 cuando está cayendo de una altura de 1m, en el momento que choca contra el suelo.



Al reunir las magnitudes máximas y mínimas de los desplazamientos del carrete de madera No 24 para las diferentes situaciones, ver tabla 18, se observa que la situación más crítica para el carrete, en cuanto deformaciones, es cuando el carrete cae desde una altura de 1m hasta el suelo. Este desplazamiento del carrete en esta situación está por fuera de los rangos establecidos, con esto se comprueba que las consideraciones en la manipulación del carrete de madera No 24 planteada por los fabricantes de estos carretes son de gran importancia dado el daño que estos golpes ocasionan.

Tabla 18. Desplazamientos máximos y mínimos para cada una de las situaciones del carrete de madera No 24.

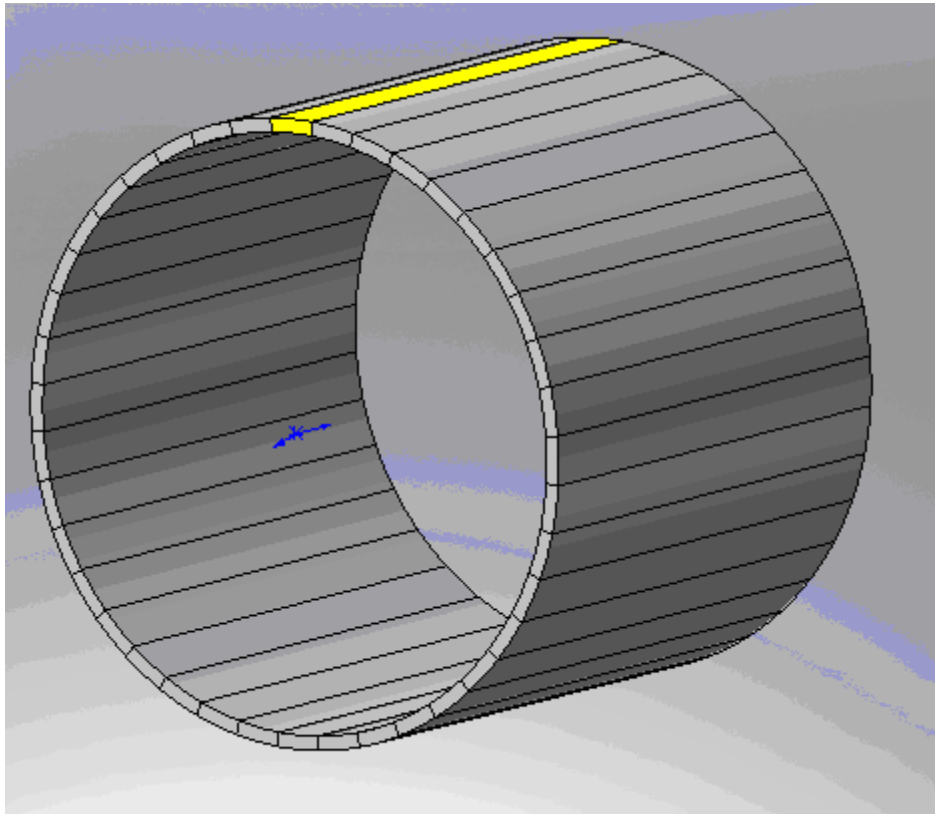
Situación	SUELO	EJE	MONTACARGAS	CAIDAS
Desplazamiento Máximo [mm]	1,43	0,47	0,83	7,84
Desplazamiento Mínimo [µm]	9,37	6,36	14,8	1,3

8 MODELO TEÓRICO

Para demostrar que el análisis por elementos finitos realizado para el carrete de madera No. 24 por medio del *software* Algor®, en esta sección se evaluará dos partes o elementos del carrete muy importantes puesto que estas trabajan en las condiciones más críticas, usando una metodología matemática, y así poder validar los resultados obtenidos usando la herramienta computacional anteriormente nombrada.

Dado que se evaluará condiciones críticas estáticas para el carrete, que según el capítulo anterior es cuando se encuentra sobre en el suelo; el análisis teórico se hará para una duela del tambor, ver figura 49, y estos datos serán comparados con los resultados del análisis por elementos finitos de esta pieza, bajo las mismas condiciones críticas.

Figura 49. Elemento utilizados para el análisis teórico.



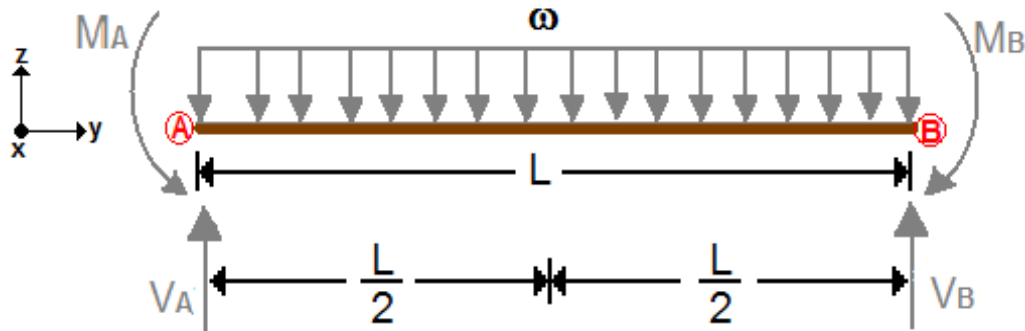
8.1 ANÁLISIS DEL TAMBOR.

Para simplificar el análisis matemático del tambor, se considera apropiado realizárselo a una duela que conforma el tambor, la que se encuentra en la mitad superior del tambor, pues es esta duela la que soporta la mayor parte del peso del cable que es enrollado en el tambor.

8.1.1 Análisis teórico del tambor. En una condición crítica, esta duela se encuentra trabajando en una condición de flexión y tiene sus extremos empotrados debido a que se encuentra insertada en el ruteado de los discos y limitada por las otras duelas del tambor. El cable genera sobre esta duela una carga distribuida de 3293,1N/m, correspondiente al peso del cable sobre esa duela (403.24kg) y la longitud de la duela (1.2m).

En este análisis no se tomará en cuenta el ancho de la duela ni el espesor debido a que estas medidas son muy pequeñas en comparación con el largo de la duela; así que en la figura 50 se observará el diagrama de cuerpo libre para esta situación donde M_A , M_B , V_A y V_B son las reacciones de momentos y de traslación, ω es la carga distribuida y L en la longitud de la duela.

Figura 50. Diagrama de cuerpo libre de una duela del tambor.



Como la duela se comporta como un elemento estático, se realiza la siguiente sumatoria de fuerzas en la dirección z , para determinar las reacciones de traslación, teniendo en cuenta que la simetría del sistema permite establecer que estas dos reacciones son de igual magnitud ($V = V_A = V_B$):

$$\sum F_z = \omega L - V_A - V_B = 0$$

$$\omega L = 2V \Rightarrow V = \frac{\omega L}{2}$$

$$\therefore V_A = V_B = \frac{\omega L}{2} = \frac{(3293.1 \text{ N/m})(1,2\text{m})}{2} = 1975.5 \text{ N}$$

Pero al hacer la sumatoria de momentos respecto al punto A, se puede identificar que las reacciones de momentos son de igual magnitud y que la duela se comporta como un elemento estáticamente indeterminado, por lo que debe ser enfrentado usando la metodología de deflexión en vigas y ejes, donde se enfatiza en la pendiente y el desplazamiento del elemento.

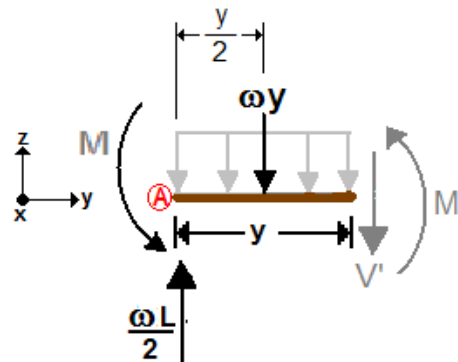
$$\sum M_{(A)} = M_A - M_B - \omega L \left(\frac{L}{2} \right) + V_B(L) = 0$$

$$M_A - M_B = \omega L \left(\frac{L}{2} \right) - \frac{\omega L}{2}(L)$$

$$\therefore M_A = M_B = M$$

Para esta metodología se parte el elemento en un número determinado de tramos, en el caso de la duela son 2 tramos, y se analiza cada tramo por separado, manteniendo las condiciones iniciales, ver figura 51. En el corte se origina un momento denominado M' .

Figura 51. Diagrama de cuerpo libre del tramo cortado de la duela del tambor.



Esta sección se estudia como una condición estática, de la cual solo se plantea para determinar el momento ya que la fuerza cortante no es un dato necesario para nuestro análisis, se realiza una sumatoria de momentos respecto al punto de corte:

$$\sum M_{(corte)} = M + M' + \bar{\omega}y\left(\frac{y}{2}\right) - \frac{\bar{\omega}L}{2}(y) = 0$$

$$M = -\frac{\bar{\omega}}{2}y^2 + \frac{\bar{\omega}L}{2}y - M'$$

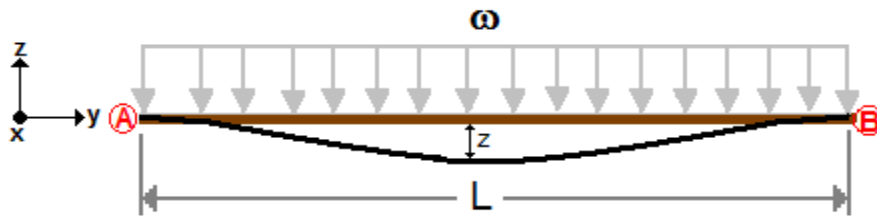
Dado que la duela se comporta como una viga, el momento de las reacciones están en función del Módulo de elasticidad del material (**E**), el momento de inercia de duela (**I**) y la deflexión de la duela en la dirección z producto de la fuerza distribuida, expresado como $M = EI \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$.

A partir de estas dos últimas ecuaciones, se establece una relación con la deflexión y la pendiente que experimenta la viga, ver figura 52, que se obtiene mediante un par de integraciones del momento de las reacciones:

$$M = -\frac{\bar{\omega}}{2}y^2 + \frac{\bar{\omega}L}{2}y - M' \quad \vee \quad M = EI \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$$

$$EI \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -\frac{\bar{\omega}}{2}y^2 + \frac{\bar{\omega}L}{2}y - M'$$

Figura 52. Curva de deflexión de la duela en el tambor.



$$\text{Pendiente} \rightarrow EI \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{\bar{\omega}}{6}y^3 + \frac{\bar{\omega}L}{4}y^2 - M'y + C_1$$

$$\text{Deflexión} \rightarrow EI \cdot z_{(y)} = -\frac{\bar{\omega}}{24}y^4 + \frac{\bar{\omega}L}{12}y^3 - \frac{M'}{2}y^2 + C_1y + C_2$$

A continuación, se remplazan las variables para obtener el valor de las constantes (C_1 y C_2) y del momento en el corte; conservando las siguientes condiciones:

- Pendiente en la curva de deflexión: $\frac{\partial z}{\partial(y=0)} = 0$ y $\frac{\partial z}{\partial(y=L)} = 0$
- Extremos de la duela empotrados: $z_{(y=0)} = 0$ y $z_{(y=L)} = 0$

Para determinar las constantes, se resuelven las ecuaciones de pendiente y deflexión usando las condiciones de flexión de la duela cuando $y=0$:

$$\begin{array}{l} EI \frac{\partial z}{\partial y} = -\frac{\varpi}{6} y^3 + \frac{\varpi L}{4} y^2 - M' y + C_1 \\ \text{Pendiente: } EI \frac{\partial z}{\partial(y=0)} = -\frac{\varpi}{6} (0)^3 + \frac{\varpi L}{4} (0)^2 - M'(0) + C_1 \\ C_1 = 0 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} EI \cdot z_{(y)} = -\frac{\varpi}{24} y^4 + \frac{\varpi L}{12} y^3 - \frac{M'}{2} y^2 + C_1 y + C_2 \\ \text{Deflexión: } EI \cdot z_{(y=0)} = -\frac{\varpi}{24} (0)^4 + \frac{\varpi L}{12} (0)^3 - \frac{M'}{2} (0)^2 + C_1(0) + C_2 \\ C_2 = 0 \end{array}$$

Una vez determinadas las constantes, con la ecuación de deflexión para $y=L$, se obtiene el momento en el punto B de la duela del tambor:

$$\begin{aligned} EI \cdot z_{(y)} &= -\frac{\varpi}{24} y^4 + \frac{\varpi L}{12} y^3 - \frac{M'}{2} y^2 + C_1 y + C_2 \\ EI \cdot z_{(y=L)} &= -\frac{\varpi}{24} (L)^4 + \frac{\varpi L}{12} (L)^3 - \frac{M'}{2} (L)^2 + (0)(L) + (0) \\ 0 &= -\frac{\varpi}{24} L^4 + \frac{\varpi}{12} L^4 - \frac{M'}{2} L^2 \\ M' &= -\frac{\varpi}{12} L^2 + \frac{\varpi}{6} L^2 \\ M' &= \frac{\varpi}{12} L^2 \end{aligned}$$

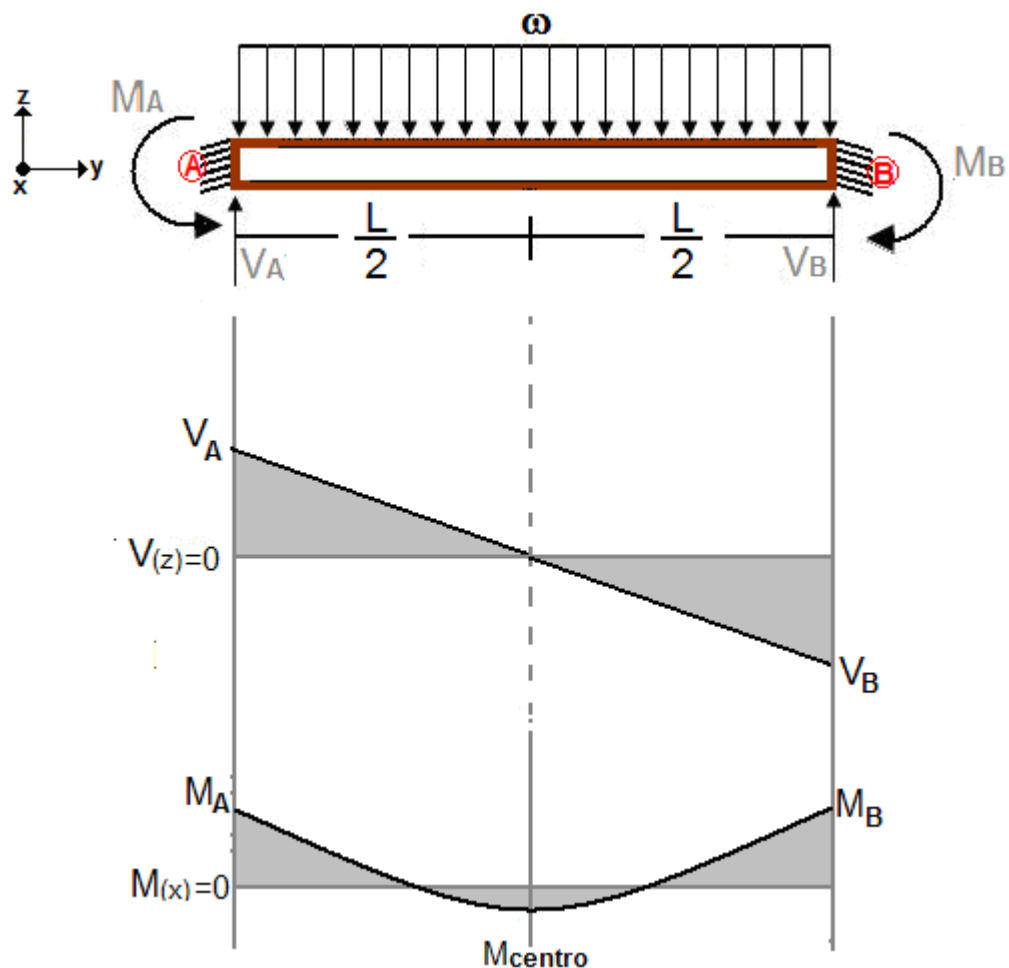
Al remplazar los valores correspondientes a las variables para determinar el momento de corte para $y=L$; que como se había mencionado antes, este momento es el momento en el punto B que es igual al momento en el punto A:

$$M' = \frac{\bar{w}}{12} L^2 = \frac{3293.1 \text{ N/m}}{12} (1,2\text{m})^2$$

$$\underline{M_B = 395.17 \text{ N.m} = M_A}$$

Una vez determinadas todas las reacciones, se realiza el diagrama de fuerza cortante y de momento de flexión para la duela del tambor, ver figura 53; esto es necesario para visualizar donde se encuentra el momento a flexión máximo en la duela.

Figura 53. Diagrama de cortante y momento para una duela del tambor.



Así que, el momento flector que se encuentra en la mitad de la duela, cuando $y = L/2$, y está determinado por el área de la gráfica cortante ($V_{(x)}$) de la forma:

$$M_{CENTRO} = M_A - \text{area}_{V_{(x)}} = M_A - \frac{V_A(L/2)}{2} = 395.17Nm - \left[\frac{1975.5N(0,6m)}{2} \right]$$

$$M_{CENTRO} = -197.48N.m$$

Una vez encontrado este momento flector de la duela, se determina que el esfuerzo máximo se encuentra a los extremos de las duelas, lo que permite hallar el esfuerzo máximo que este genera, usando la ecuación 4.

Ecuación 4. Esfuerzo producto de un momento flector.

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

Donde,

M : Momento flector [N.m]

c : Centroide de la duela. [m]

I : Momento de inercia de la duela [m⁴]

Con la anterior ecuación y con los datos correspondientes a las variables, producto de las dimensiones de la duela, se halla el esfuerzo máximo en la duela del tambor:

$$I = \frac{hb^3}{12} = \frac{(0,032m)(0,137m)^3}{12} = 6,86 \times 10^{-6} m^4$$

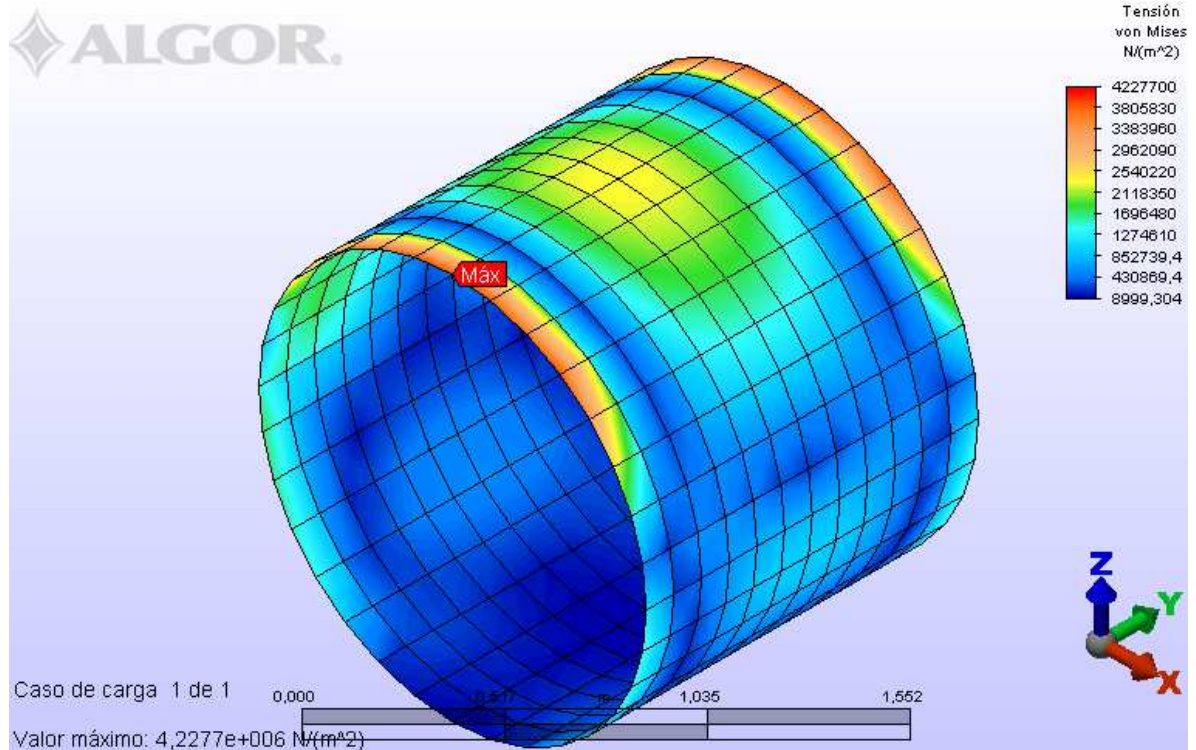
$$c = \frac{b}{2} = \frac{0,137m}{2} = 0,068m$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{c}{I} M_{MAX} = \frac{0,068m}{6,86 \times 10^{-6} m^4} (395.17N.m)$$

$$\sigma_{MAX} = 3945939,5 N/m^2 = 3,95MPa$$

8.1.2 Análisis por elementos finitos del tambor. Usando el *software* Algor®, se halló que para el tambor en la peor situación del carrete, cuando se encuentra sobre el suelo, el esfuerzo máximo está en los extremos del tambor donde se une con los discos laterales y tiene una magnitud de 4,23MPa, ver figura 54.

Figura 54. Presentación de los esfuerzos en el tambor cuando el carrete está sobre el suelo.



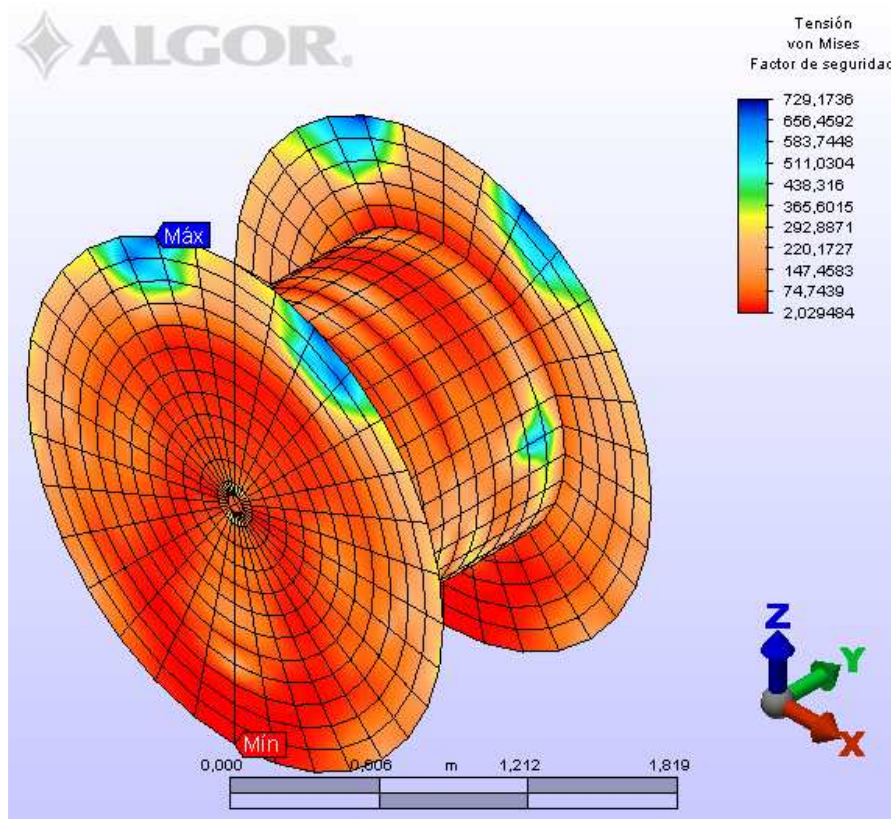
Al comparar este esfuerzo máximo con el obtenido matemáticamente, se encuentra un error del 6,66% que puede atribuirse a que en el análisis por elementos finitos se tienen en cuenta los esfuerzos de aplastamiento que experimenta la duela del tambor y por la generalidad del método matemático.

9 PROPUESTA PARA OPTIMIZAR EL CARRETE DE MADERA No. 24 PARA EMPAQUE DE CABLES

Como se notó en los capítulos anteriores, el carrete de madera No 24 tiene un factor de seguridad grande para las condiciones normales de trabajo.

Basandose en este factor, se propone disminuir el espesor de cada una de las tablas que componen los discos laterales en un 42,9%, es decir de 44,5mm a 25,4mm (1 pulgada); de la misma manera, disminuir el espesor de las duelas que componen el tambor en un 20,6%, de 32mm a 25,4mm (1 pulgada), ver figura 55.

Figura 55. Presentación del factor de seguridad del carrete de madera No 24 en su rediseño.



Con estas nueva medida, cuando el carrete está sobre el suelo, trabaja con un factor de seguridad mínimo de 2,03 y un desplazamiento máximo de 2,4mm que, según la funcionalidad del carrete, se encuentran en los rangos aceptables.

10 CONCLUSIONES

- El carrete de madera No 24 para empaque de cables es una herramienta indispensable para la industria de cables, ya que se ocupa de mantener la buena calidad del cable enrollado en él.
- El énfasis que se dá a la metodología QFD es de gran importancia para este proyecto puesto que esta permitió establecer que las relaciones entre los requerimientos de clientes y los parametros de diseño del carrete de madera No 24, generaron un buen resultado en cuanto se sugieren ciertas modificaciones respecto el diseño de este carrete.
- En el momento de realizar el analisis por elementos finitos del carrete de madera No 24 usando el *software* Algor®, se decide analizar el carrete como elemento tipo plate, esto es por la simplicidad que aporta al desarrollo de este analisis pero respetando las características y propiedades que el carrete posee.
- A pesar de la anisotropia de la madera lo que puede generar inconsistencias en las propiedades, se encuentra que los resultados son confiables basandose en los datos de anteriores investigaciones, siendo concientes que existen diferencia en condiciones como ambientales.
- Una vez analizadas las cuatro situaciones de trabajo del carrete en esta investigación, se reitera que para la última situación, cuando el carrete cae desde 1m de altura, el material de este tipo de carrete no es capaz de soportar en su totalidad las cargas e impacto que se generan, lo que disminuye la vida del carrete de madera No 24.
- Dado que la madera es un recurso natural, la obtención de la madera tipo Sajo se convertirá en un gran problema para la industria; por lo que se deben tomar medidas preventivas como suprimir parcial o totalmente la utilización de madera para la fabricación de carretes; por esto se propone usar tablas de madera tipo Sajo de 1 pulgada de espesor para la fabricación de todas las partes que componen los carretes de madera No 24 ya que este cambio de dimensiones no afectan drásticamente el desempeño del carrete como empaque para cables.

11 RECOMENDACIONES

Por medio de este proyecto, se comprobó que el efecto en el carrete de madera No 24 de una caída de 1m es muy dañino, esto se debe a que la madera como material anisotópico, es poco tolerante a golpes de tal magnitud lo que disminuye la resistencia mecánica del carrete.

Así que, no se debe arrojar un carrete de madera No 24 desde esa altura como se hace comunmente al momento de transportarlo. El carrete debe ser transportado usando un montacargas pues esta máquina no genera daños importantes al carrete de madera No 24.

BIBLIOGRAFÍA

ANGLADA, M. J.; ALCALÁ CABRELLES, Jorge; STAFF, V.V.; LLANES, L.; MATEO, A. M. y NÚRIA SALÁN, María. Fractura de materiales. Ediciones UC, 2002. 238 p.

ARÉVALO FUENTES, Rosven Libardo y LONDOÑO ARANGMANUAL, Alberto. Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué: Impresiones Conde, 2005. 146 p.

CAPUZ RIZO, Salvador. Introducción al proyecto de producción. Ingeniería concurrente para el diseño del producto. 2 ed. Madrid: Alfaomega, 2001. 224 p.

COLCIENCIAS, Colombia. Desarrollo tecnológico para fabricar carretes para empaque de cables, utilizando como materia prima Tetrapak de origen post-industrial y post-consumo en sustitución de madera de bosque nativo. Bogotá DC., 2007. 7 p.

Despliegue de la función de calidad Q.F.D. [en línea] Oaxaca México: Instituto de innovación y calidad gubernamental, febrero de 2008. [Consultado 2 de Abril, 2008]. Disponible en Internet: http://www.e-oaxaca.gob.mx/innovacg/descargar_archivo.php?download=QUALITY%20FUNCTION%20DEPLOYMENT.doc&c=CALIDAD%20PARA%20TI . 17 p.

Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica: Criterio de resistencia estática [en línea]. España: Universitat Jaume I, 2006. [Consultado en 18 de Julio de 2008]. Disponible en Internet: http://www.emc.uji.es/d/mecapedia/criterio_de_resistencia_estatica.htm

Engineering fundamentals. Hooke's Law. Orthotropic Materials [en línea]. Estados Unidos: eFunda Inc., 2008. [Consultado en 15 de Junio de 2008]. Disponible en Internet: http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/hooke_orthotropic.cfm

FORNONS, José-María; FORNÓNS GARCÍA, José-María y FORNONS, Escola Técnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. El método de los elementos finitos en la ingeniería de estructuras. Barcelona: Marcombo, 1982. 284 p.

HIBBELER R. C. Mecánica de materiales. México: Pearson Educación, 2006. 896 p.

Introducción a la resistencia de materiales [en línea]. Resistencia, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, 2007. [Consultado en 04 de Julio de 2008]. Disponible en Internet: http://ing.unne.edu.ar/pub/e2_cap1.pdf

GROOVER, Mikell P. Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1997. 1062 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Maderas. Determinación de la resistencia a la flexión. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 663, 5 p.

----- Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión axial o paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 784, 5 p.

----- Maderas. Determinación de la resistencia a la compresión perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 785, 5 p.

----- Maderas. Toma de muestras para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 787, 8 p.

----- Acondicionamiento de las maderas para ensayos físicos y mecánicos. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 790, 18 p.

----- Maderas. Determinación de la tracción paralela al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 944, 6 p.

----- Maderas. Determinación de la tracción perpendicular al grano. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 961, 5 p.

----- Maderas. Ensayos con probetas pequeñas. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 3377, 78 p.

----- Carretes de madera para cables. Primera actualización. Santafé de Bogotá, D.C.: ICONTEC, 2007. NTC 3787, 12 p.

MATEMÁTICAS PARA EL QFD: Matriz de Relaciones, versión 050704. México D.F.: Asociación Latinoamericana de QFD, 2008. 1 archivo de programa.

PERALTA, María H. y ETSE, José G. Análisis computacional del mecanismo de respuesta de pernos anclados en hormigón. En: Mecánica Computacional. Vol. 22. Bahía Blanca, Argentina (Noviembre 2003) p. 2108.

Professional MES [en línea]: *Mechanical event simulation with lineal and nonlinear material models*. Pittsburgh: Algor products, Mayo de 2008 [Consultado 27 de junio de 2008]. Disponible en internet: <http://algor.com/products/Profes1748/default.asp>

QFD aplicado: Competitividad e innovación de cara al mercado. [En línea]. Madrid, España: Universidad de Girona, 2005. [Consultado 10 de abril 2008]. Disponible en Internet: <http://www.ingegraf.es/XVIII/PDF/Comunicacion17016.pdf>

Recomendaciones para la manipulación y transporte de carretes con grúa horquilla [en línea]: Información del producto. Monterrey: Tecnojar S.A, 2008. [Consultado 30 de junio de 2008]. Disponible en internet: <http://www.tecnojar.com/tecnoshop/index.php?act=viewProd&productId=250>

Sajo [en línea]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1992. [Consultado en 25 de Mayo de 2008]. Disponible en Internet: <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Sajo.pdf>

SHARKOON, James G. Detailed Mechanical Design: A practical guide. : American Society of Mechanical Engineers, 2000, 216 p.

Software 'Data Studio' V 1.9.8 [en línea]. California: Pasco Scientific, 2006. [Consultado 08 de junio de 2008]. Disponible en Internet: <http://store.pasco.com/forms/download.cfm?DID=9&downloadtype=DataStudio>

Solid Edge, Academy University V.19 [CD-ROM]. Estados Unidos: UGS Corporation, 2006.

Solid Work 2007 SP3, 1. [CD-ROM]. Estados Unidos: UGS Corporation, 2007.

TAMAYO, Francisco y GONZALEZ, Verónica. ¿Que es el QFD? [en línea]: Descifrando el despliegue de la función de calidad. México D.F: Asociación Latinoamericana de QFD, 2008. [Consultado 08 de junio de 2008]. Disponible en internet: <http://www.qfdlat.com/>

TERNINKO, John. Step-by-Step QFD: Customer-driven Product Design. 2 ed. Florida, Estados Unidos: CRC Press, 1997. 224 p.

VADO ALFARO, Wady. Simulación de procesos [en línea]. Brasil: Monografías, 2006. [Consultado 27 de Junio de 2008]. Disponible en internet: <http://www.monografias.com/trabajos6/sipro/sipro.shtml#intro>

ZIENKIEWICZ, O.C.; OÑATE IBÁÑEZ DE NAVARRA, Eugenio y TORROJA CAVANILLAS, José Antonio. El método de los elementos finitos. Barcelona: Reverté, 1982. 903 p.

ANEXOS

Anexo A. Casa de la Calidad

Nombre proyecto: <i>Diseño de un carrito de madera No 24 para cables</i>			Calificación ponderada	Parámetros de Diseño										de cliente	Ponderado	ponderado	BAP	BAR										
			81,5%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10						15,9%	14,8%	12,2%	6,3%	17,8%	8,3%	0,4%	7,0%	8,7%	8,7%
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado																									
Proceso de fabricación	1	Facil emsamble	4,2%	3	0	0	0	3	0	0	3	9	9	70%	4,2%	2,9%	1,3%	6,8%										
	2	Tiempo de fabricacion	3,3%	1	3	0	0	3	0	0	9	9	3	70%	3,3%	2,3%	1,0%	5,4%										
	3	Economico	4,6%	9	1	0	0	9	0	0	9	9	1	90%	4,6%	4,1%	0,5%	2,5%										
	4	Facil de reparar	5,4%	1	0	0	0	3	0	0	0	0	3	80%	5,4%	4,3%	1,1%	5,8%										
Manejo	4	Liviano	2,5%	9	3	0	0	3	1	0	1	0	0	85%	2,5%	2,1%	0,4%	2,0%										
	5	Facilidad de Transporte	4,2%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90%	4,2%	3,8%	0,4%	2,3%										
	6	Permite realizar pruebas en el	5,4%	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	100%	5,4%	5,4%	0,0%	0,0%										
Calidad	7	Facilita el empaque del producto	5,9%	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	5,9%	5,9%	0,0%	0,0%										
	8	Duradero	5,0%	0	9	3	0	3	3	0	0	0	1	90%	5,0%	4,5%	0,5%	2,7%										
	9	Tolerancia al agua	5,9%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	80%	5,9%	4,7%	1,2%	6,4%										
	10	Resistente a la humedad	5,9%	0	9	0	0	3	0	0	0	0	0	80%	5,9%	4,7%	1,2%	6,4%										
Condiciones de Trabajo	11	Soporta inadecuadas condiciones de transporte	5,4%	3	0	9	0	1	9	0	0	0	0	70%	5,4%	3,8%	1,6%	8,8%										
	12	Protegido contra bacterias	5,4%	0	9	0	0	3	0	0	3	3	0	70%	5,4%	3,8%	1,6%	8,8%										
	12	Rigido	5,4%	3	0	9	0	9	3	0	0	0	3	80%	5,4%	4,3%	1,1%	5,8%										
	13	Resistente a golpes laterales	5,8%	3	1	3	9	3	0	0	0	0	3	80%	5,8%	4,6%	1,2%	6,3%										
	14	Soporta caidas	5,8%	3	1	3	9	3	0	0	0	0	3	50%	5,8%	2,9%	2,9%	15,7%										
Proteccion del producto	15	Soporta cargas las consideradas según su referencia	6,3%	3	0	9	0	1	9	0	0	0	0	80%	6,3%	5,0%	1,3%	6,8%										
	18	No afecta la integridad del cable empacado en él	6,3%	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	100%	6,3%	6,3%	0,0%	0,0%										
Impacto	19	Recuperable	3,3%	1	1	0	0	9	0	0	3	0	3	70%	3,3%	2,3%	1,0%	5,4%										
Estética	20	Apariencia agradable	4,0%	0	1	0	0	3	0	0	1	1	1	90%	4,0%	3,6%	0,4%	2,2%										
				100,0%																								
					2,7	2,5	2,0	1,0	3,0	1,4	0,1	1,2	1,5	1,4	81,3%	100,0%	81,5%	18,5%	100,0%									
Unidades				Kg	%	m		Propied	Kg	°C	\$	días	#															
Dirección de Mejora				Menores	Menores	Menores	Mayores	Nominales	Mayores	Mayores	Menores	Menores	Menores															
Nivel actual				553	20	0,003	--	--	6850	40	--	7	20															
Meta				408	14	--	1	--	7000	45	--	4	15															
Dificultad				70%	20%	45%	60%	90%	60%	50%	70%	70%	80%															

Anexo B1. Matriz de relaciones.

Nombre proyecto: Diseño de un carrete de madera No 24 para cables		Calificación ponderada actual	1	2	3	4	5
		81,5%	15,9%	14,8%	12,2%	6,3%	17,8%
No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado	Masa Total	Humedad	Deformación	Cota dinámica	Tipo de Madera
1	Fácil ensamble	4,2%	3	0	0	0	3
2	Tiempo de fabricación	3,3%	1	3	0	0	3
3	Económico	4,6%	9	1	0	0	9
4	Fácil de reparar	5,4%	1	0	0	0	3
4	Liviano	2,5%	9	3	0	0	3
5	Facilidad de Transporte	4,2%	9	0	0	0	0
6	Permite realizar pruebas en el producto	5,4%	0	0	0	0	1
7	Facilita el empaque del producto	5,9%	9	0	0	0	0
8	Duradero	5,0%	0	9	3	0	3
9	Tolerancia al agua	5,9%	0	9	0	0	3
10	Resistente a la humedad	5,9%	0	9	0	0	3
11	Soporta inadecuadas condiciones de transporte	5,4%	3	0	9	0	1
12	Protegido contra bacterias	5,4%	0	9	0	0	3
12	Rígido	5,4%	3	0	9	0	9
13	Resistente a golpes laterales	5,8%	3	1	3	9	3
14	Soporta caídas	5,8%	3	1	3	9	3
15	Soporta cargas las consideradas según su referencia	6,3%	3	0	9	0	1
18	No afecta la integridad del cable empacado en él	6,3%	0	1	0	0	0
19	Recuperable	3,3%	1	1	0	0	9
20	Apariencia agradable	4,0%	0	1	0	0	3

Anexo B2. Matriz de relaciones.

Nombre proyecto: Diseño de un carrete de madera No 24 para cables		6 8,3%	7 0,4%	8 7,0%	9 8,7%	10 8,7%
No	Necesidad del Cliente	Carga del Cable	Temperatura	Costo de fabricación por unidad	Tiempo de Producción	Número de Piezas a ensamblar
1	Fácil ensamble	0	0	3	9	9
2	Tiempo de fabricación	0	0	9	9	3
3	Económico	0	0	9	9	1
4	Fácil de reparar	0	0	0	0	3
4	Liviano	1	0	1	0	0
5	Facilidad de Transporte	0	0	0	0	0
6	Permite realizar pruebas en el producto	0	0	0	3	0
7	Facilita el empaque del producto	0	0	0	0	0
8	Duradero	3	0	0	0	1
9	Tolerancia al agua	0	0	0	0	0
10	Resistente a la humedad	0	0	0	0	0
11	Soporta inadecuadas condiciones de transporte	9	0	0	0	0
12	Protegido contra bacterias	0	0	3	3	0
12	Rígido	3	0	0	0	3
13	Resistente a golpes laterales	0	0	0	0	3
14	Soporta caídas	0	0	0	0	3
15	Soporta cargas las consideradas según su referencia	9	0	0	0	0
18	No afecta la integridad del cable empacado en él	0	1	0	0	1
19	Recuperable	0	0	3	0	3
20	Apariencia agradable	0	0	1	1	1

Anexo C. Tabla de evaluación de las necesidades del cliente.

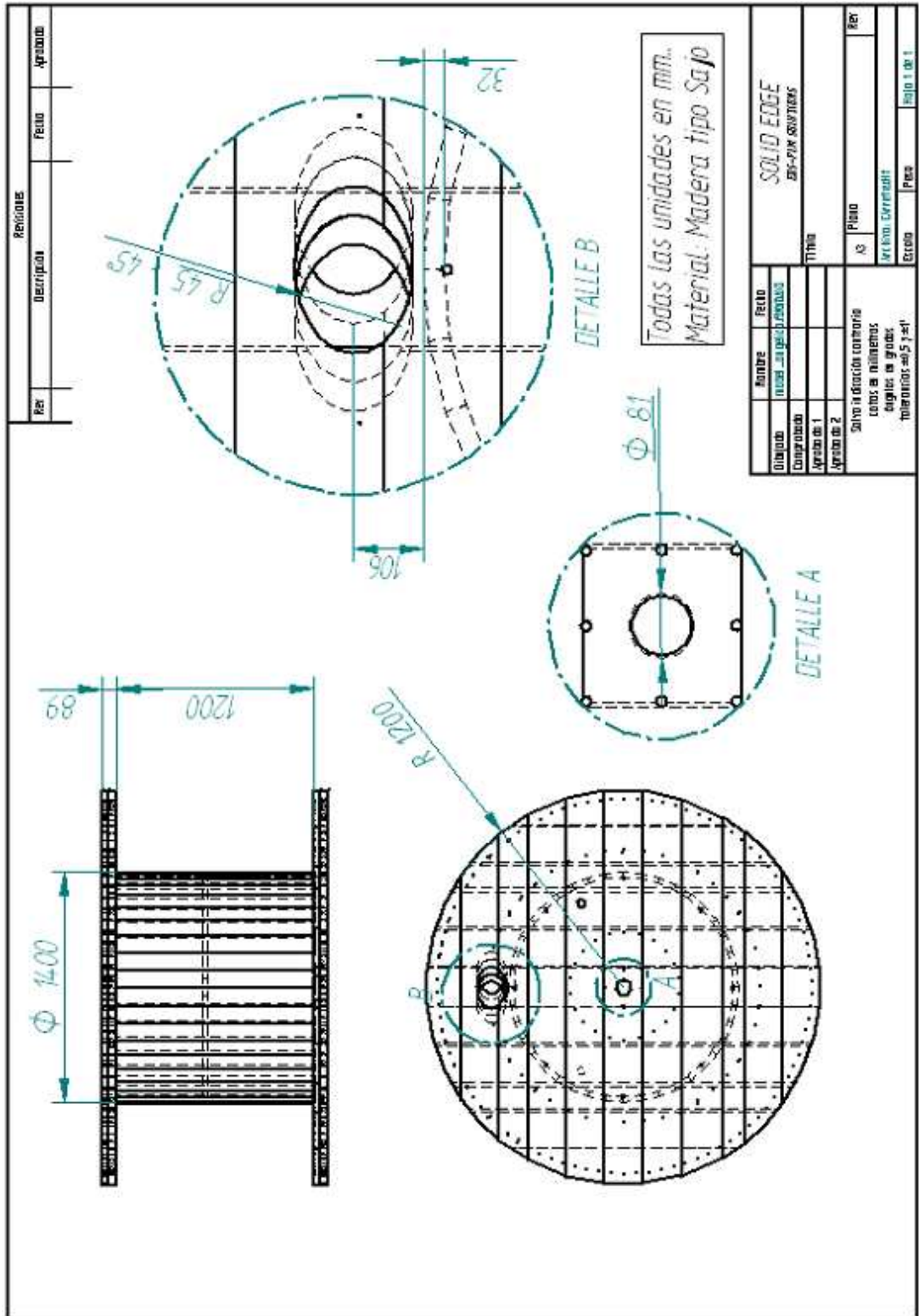
Necesidad Superior	No	Necesidad del Cliente	Peso Ponderado	Eval de clientes	Peso Ponderado	Eval ponderada	Brecha absoluta ponderada	Brecha absoluta relativa	
Proceso de fabricación	1	Fácil ensamble	4,2%	70%	4,2%	2,9%	1,3%	6,8%	
	2	Tiempo de fabricación	3,3%	70%	3,3%	2,3%	1,0%	5,4%	
	3	Económico	4,6%	90%	4,6%	4,1%	0,5%	2,5%	
Manejo	4	Fácil de reparar	5,4%	80%	5,4%	4,3%	1,1%	5,8%	
	4	Liviano	2,5%	85%	2,5%	2,1%	0,4%	2,0%	
	5	Facilidad de Transporte	4,2%	90%	4,2%	3,8%	0,4%	2,3%	
	6	Permite realizar pruebas en el producto	5,4%	100%	5,4%	5,4%	0,0%	0,0%	
	7	Facilita el empaque del producto	5,9%	100%	5,9%	5,9%	0,0%	0,0%	
	Calidad	8	Duradero	5,0%	90%	5,0%	4,5%	0,5%	2,7%
		9	Tolerancia al agua	5,9%	80%	5,9%	4,7%	1,2%	6,4%
10		Resistente a la humedad	5,9%	80%	5,9%	4,7%	1,2%	6,4%	
11		Soporta inadecuadas condiciones de transporte	5,4%	70%	5,4%	3,8%	1,6%	8,8%	
12		Protegido contra bacterias	5,4%	70%	5,4%	3,8%	1,6%	8,8%	
Condiciones de Trabajo	12	Rígido	5,4%	80%	5,4%	4,3%	1,1%	5,8%	
	13	Resistente a golpes laterales	5,8%	80%	5,8%	4,6%	1,2%	6,3%	
	14	Soporta caídas	5,8%	50%	5,8%	2,9%	2,9%	15,7%	
	15	Soporta cargas las consideradas según su referencia	6,3%	80%	6,3%	5,0%	1,3%	6,8%	
Protección del producto empacado en él	18	No afecta la integridad del cable empacado en él	6,3%	100%	6,3%	6,3%	0,0%	0,0%	
Impacto Ambiental	19	Recuperable	3,3%	70%	3,3%	2,3%	1,0%	5,4%	
Estética	20	Apariencia agradable	4,0%	90%	4,0%	3,6%	0,4%	2,2%	
			100,0%						
				81,3%	100,0%	81,5%	18,5%	100,0%	

Anexo D. Tabla de evaluación de los parámetros de diseño.

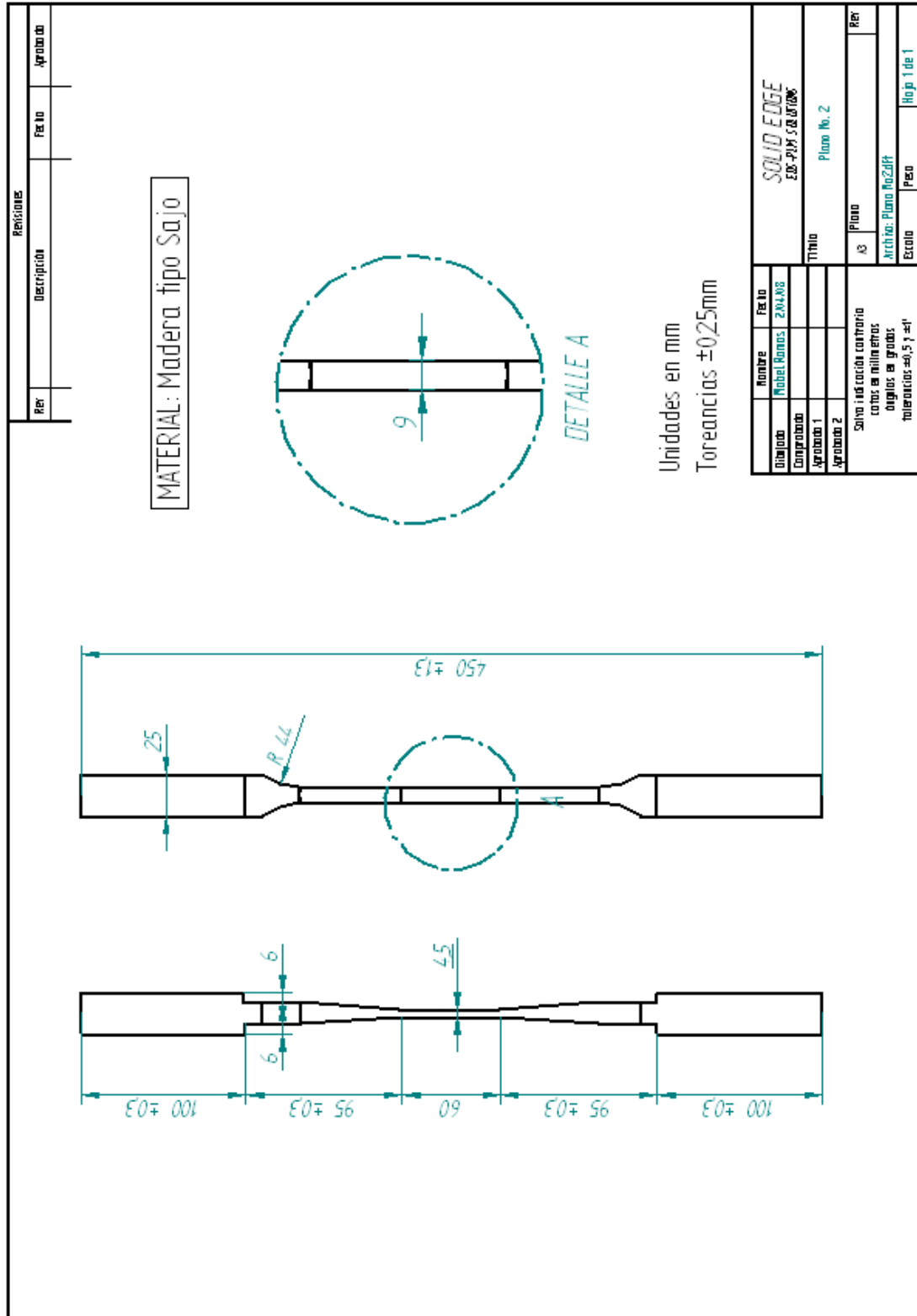
	Masa Total	Humedad	Deformación	Cota Dinámica	Tipo de Madera	Carga del Cable
Unidades	Kg	%	m		Propiedades	Kg
Dirección de Mejora	Menor es mejor	Menor es mejor	Menor es mejor	Mayor es mejor	Nominal es mejor	Mayor es mejor
Nivel actual	553	20	--	--	--	6850
Meta	408	14	--	1	--	7000
Dificultad	70%	20%	45%	60%	90%	60%

	Temperatura	Costo de fabricación por unidad	Tiempo de Producción	Número de Piezas a ensamblar
Unidades	°C	\$	días	#
Dirección de Mejora	Mayor es mejor	Menor es mejor	Menor es mejor	Menor es mejor
Nivel actual	40	--	7	20
Meta	45	--	4	15
Dificultad	50%	70%	70%	80%

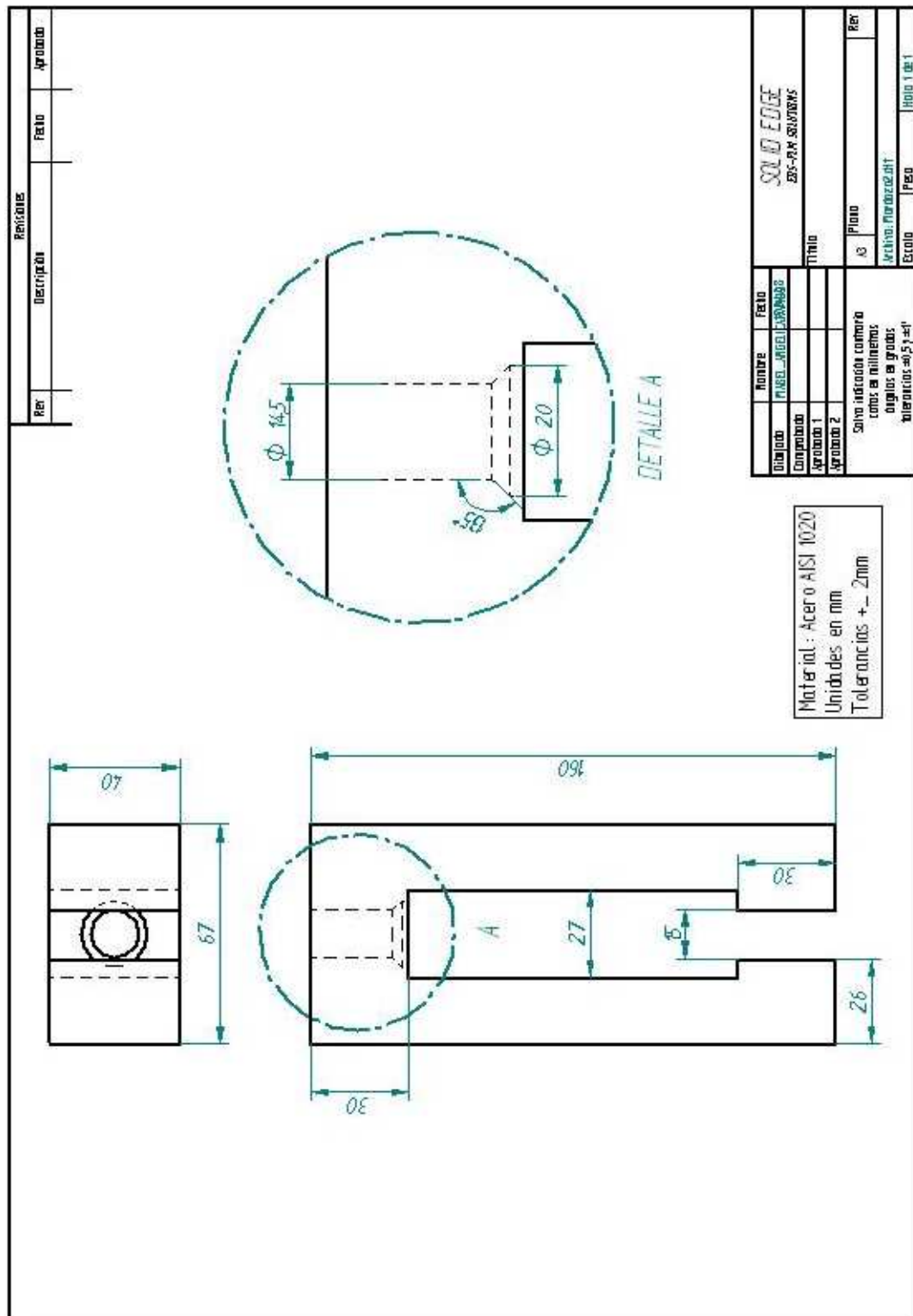
Anexo E. Plano del carrete de madera No 24.



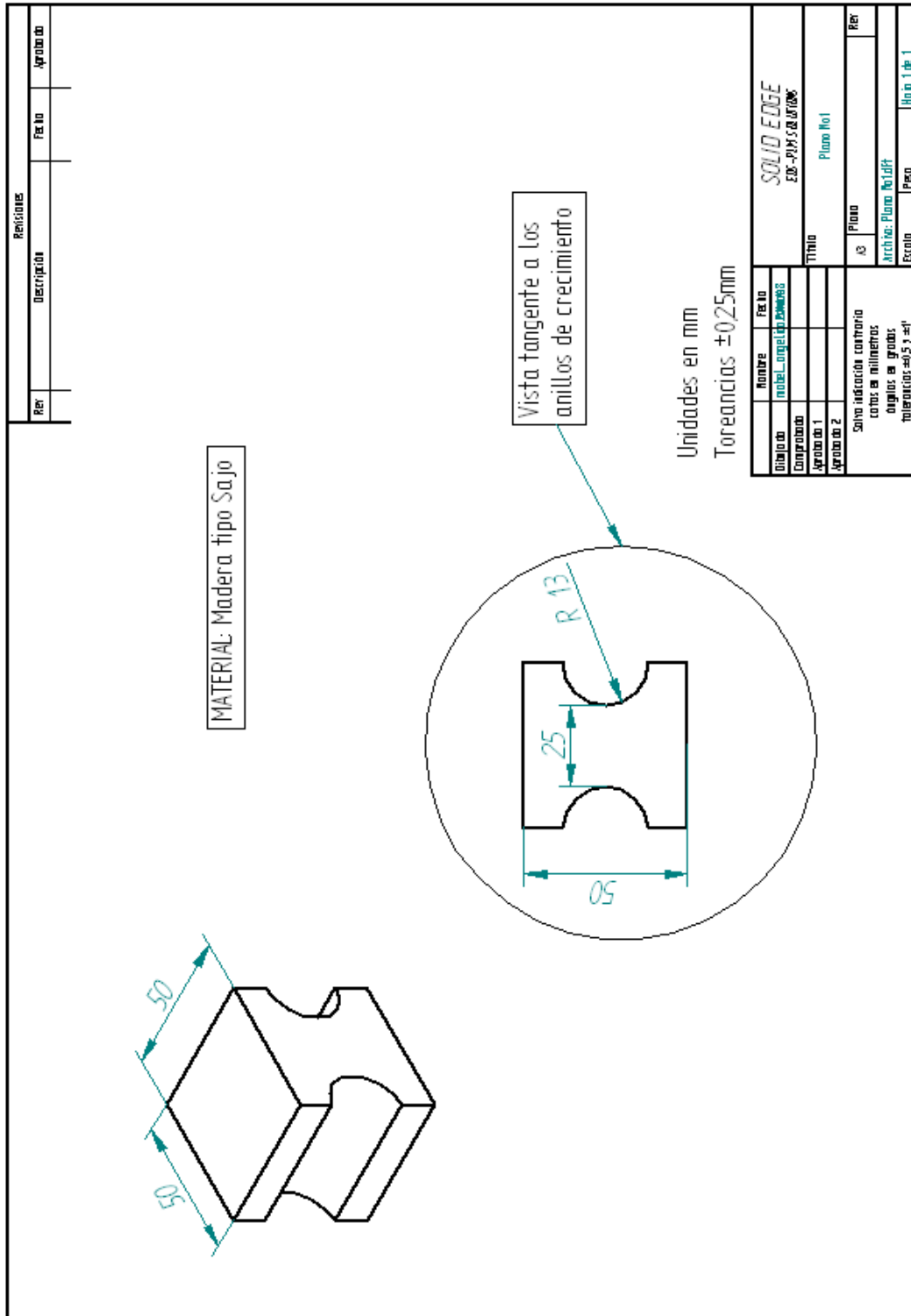
Anexo F. Plano de la probeta del ensayo a tracción paralela al grano.



Anexo G. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción paralela al grano.



Anexo H. Plano de la probeta del ensayo a tracción perpendicular al grano.



Anexo I. Plano de las mordazas empleadas para el ensayo a tracción perpendicular al grano.

