

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Máquina para ejercicios de fuerza con estructura de bambú y
material de desecho**

Trabajo de graduación en la modalidad de Megaproyecto presentado
por Sergio Fernando Sánchez Reyes para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Máquina para ejercicios de fuerza con estructura de bambú y
material de desecho**

Trabajo de graduación en la modalidad de Megaproyecto presentado
por Sergio Fernando Sánchez Reyes para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Mecánica

Guatemala,

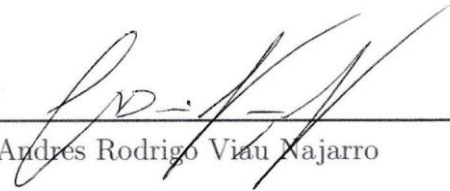
2023

Vo.B0.:

(f) 
Luis Diego Castañeda Fernández

Tribunal Examinador:

(f) 
Luis Diego Castañeda Fernández

(f) 
Andrés Rodrigo Vialú Najarro

(f) 
César Alberto Rosales Gómez

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala, 06 de enero de 2023.

Lista de figuras	X
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Generales	5
3.2. Específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Taxonomía	7
4.2. Morfología	7
4.2.1. Culmo	9
4.2.2. Rizoma	9
4.2.3. Yema	9
4.2.4. Ramas	9
4.2.5. Hoja caulinar	9
4.2.6. Follaje	9
4.3. Corte	10
4.4. Secado y almacenamiento	10
4.5. Preservación	11
4.6. Entidades gubernamentales e instituciones que promueven el bambú en Guatemala	12
4.6.1. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)	12
4.6.2. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)	12
4.6.3. Empresas privadas de bambú en Guatemala:	12

4.7.	Especies de bambú en Guatemala	13
4.8.	Análisis de esfuerzos	13
4.9.	Propiedades mecánicas del bambú	15
4.10.	Referencias de máquinas para ejercicios de fuerza con sistemas de poleas	15
4.11.	Conexiones	17
5.	Metodología	21
5.1.	Metodología para resolver el problema	21
5.1.1.	Fase 1: Investigación previa	21
5.1.2.	Fase 2: Definición de requisitos	21
5.1.3.	Fase 3: Síntesis de diseño	21
5.1.4.	Fase 4: Prueba	22
5.1.5.	Fase 5: Construcción	22
5.2.	Requisitos	22
5.3.	Sistema de poleas	23
5.4.	Análisis armazón	25
5.4.1.	Elemento R1B	27
5.4.2.	Elemento BC	28
5.4.3.	Elemento CR2	29
5.4.4.	Comprobación	30
5.5.	Análisis para momento flector, fuerza cortante y fuerza axial	31
5.5.1.	Sección R1A	31
5.5.2.	Sección AB	32
5.5.3.	Sección BC	33
5.5.4.	Sección CD	34
5.5.5.	Sección R2D	35
5.6.	Diagrama momento flector, fuerza cortante y fuerza axial	36
5.6.1.	Diagrama fuerza axial	36
5.6.2.	Diagrama fuerza cortante	37
5.6.3.	Diagrama momento flector	37
5.7.	Esfuerzos	38
5.7.1.	Esfuerzo de flexión:	38
5.7.2.	Esfuerzo cortante:	39
5.7.3.	Esfuerzo a compresión:	40
5.8.	Análisis sujetador	41
5.8.1.	Rigidez del sujetador	42
5.8.2.	Rijidez del elemento:	43
5.8.3.	Uniones a tensión con carga externa	44
5.8.4.	Relación del par de torsión del perno con la tensión del perno	44
5.8.5.	Esfuerzo de tensión en el perno:	45
5.9.	Pernos cargados en cortante	45
5.9.1.	Corte del perno	47
5.9.2.	Aplastamiento en elemento y perno	48
5.10.	Conexiones	49
5.11.	Análisis de elementos finitos	52
6.	Resultados	55

7. Discusión de resultados	63
8. Conclusiones	65
9. Recomendaciones	67
10. Bibliografía	69
11. Anexos	71
11.1. Diseño digital y construcción final	71
11.2. Planos de construcción	73

Lista de figuras

1.	Esquema del bambú	8
2.	Estructura del bambú	8
3.	Corte del bambú	10
4.	Conector transversal	14
5.	Funcional trainer with dual 200lb weight staks	15
6.	Titanium Strength TF12 Crossover 1 Station	16
7.	Rogue CT-1 cable tower	16
8.	Conexiones cortadas	17
9.	Conexiones ortogonales	17
10.	Conexiones con ángulo	18
11.	Conexiones de poste a cimentación	18
12.	Corte boca de pescado	19
13.	Corte boca de pescado inclinado	19
14.	Numeración y ubicación de poleas	23
15.	Sistema de poleas	24
16.	Diagrama de cuerpo libre polea 1	24
17.	Sistema construído con nodos añadidos	25
18.	Diagrama de cuerpo libre para armazón completo	26
19.	Cuerpo libre elemento R_1B	28
20.	Cuerpo libre elemento BC	29
21.	Cuerpo libre elemento CR_2	30
22.	Armazón completo para análisis de diagramas de fuerza	31
23.	Sección R_1A	32
24.	Sección AB	33
25.	Sección BC	34
26.	Sección CD	35
27.	Sección R_2D	36
28.	Diagrama fuerza axial	36
29.	Diagrama fuerza cortante	37
30.	Diagrama momento flector	37
31.	Ubicación sujetadores vista ortogonal	41
32.	Ubicación sujetadores vista derecha	41

33.	Imagen de referencia para determinar la rigidez del sujetador	42
34.	Ubicación sujetadores a cortante vista derecha	46
35.	Ubicación sujetadores a cortante vista superior	46
36.	Fuerza cortante en el perno	47
37.	Corte del perno	47
38.	Aplastamiento en elemento y perno	48
39.	Conexiones pernadas, vista ortogonal	49
40.	Conexion perno, arandela y varilla roscada	50
41.	Culmo sin nudo, el bambú falló a $5N \cdot m$	51
42.	Culmo con nudo, perno falló a $50N \cdot m$	51
43.	Estructura de bambú para análisis de elementos finitos	52
44.	Sportes fijos	53
45.	Gráfica mallado	53
46.	Vista de mallado	54
47.	Deformación total	58
48.	Deformación eje horizontal	58
49.	Deformación eje vertical	59
50.	Esfuerzo equivalente	59
51.	Esfuerzo de corte máximo	60
52.	Esfuerzo normal eje horizontal	60
53.	Esfuerzo normal eje vertical	61
54.	Factor de seguridad	61
55.	Máquina diseñada	71
56.	Máquina construida vista 1	72
57.	Máquina construida vista 2	72

Lista de cuadros

1.	Propiedades mecánicas Dendrocalamus Asper	15
2.	Definición de requisitos	23
3.	Propiedades del material para análisis de elementos finitos	52
4.	Resultados análisis armazón	55
5.	Resultados para diagrama momento flector, fuerza cortante y fuerza axial . .	56
6.	Resultados de esfuerzos	56
7.	Resultados sujetador	57
8.	Resultados de análisis de elementos finitos	57

La máquina para ejercicios de fuerza con estructura de bambú, se construirá partiendo de una investigación previa, esto para mejorar la toma de decisiones, definición de requisitos y asegurar el funcionamiento ideal de la máquina.

Se visitó varios gimnasios de la ciudad de Guatemala, esto para analizar el funcionamiento de máquinas para ejercicios de fuerza con sistemas de poleas. Este análisis de máquinas ayudó a diseñar la estructura de bambú.

Se investigó la manera correcta de cortar el bambú, su secado y almacenamiento, preservación, especies cultivadas en Guatemala, propiedades mecánicas y conexiones. Con esta información, se procedió a realizar cálculos de esfuerzo y modelar el análisis de elementos finitos, esto para determinar si es viable construir la máquina.

El análisis del armazón, determinó los valores de las reacciones en sus nodos. Para esto, el sistema se desarmó en elementos individuales para su análisis. Las reacciones más críticas fueron $R_{y1} = 1,293.33N$, $B_y = -921.35N$ y $R_{x2} = -629.34N$.

Para determinar el valor del momento flector, fuerza cortante y fuerza axial, se modeló la máquina como un pórtico. Se añadieron dos nodos al sistema para poder realizar correctamente el análisis. Así, obteniendo valores críticos de momento flector = $400.18N \cdot m$, fuerza cortante = $629.34N$ y fuerza axial = $-1,737.93N$.

Con los valores críticos de momento flector, fuerza cortante y fuerza axial, se prosiguió a calcular el esfuerzo que estos realizan en la estructura y el factor de seguridad para cada uno de estos. El esfuerzo de flexión dió como resultado 25.94 MPa con un factor de seguridad de 8.94, el esfuerzo cortante obtuvo el valor de 1.26 MPa y 7.11 como factor de seguridad, por último, el esfuerzo de compresión, este dió como resultado 1.74 MPa y factor de seguridad de 6.36.

Como último paso, se realizó un análisis de elementos finitos, se modificó el sistema para poder modelarlo en el software. Se obtuvo un mallado de 0.25, esfuerzo equivalente de 19.6 MPa y un factor de seguridad de 11.87.

The strength training machine with bamboo structure will be built on the basis of a previous research, in order to improve the decision making process, define requirements and ensure the ideal operation of the machine.

Several gyms in Guatemala City were visited to analyze the operation of strength exercise machines with pulley systems. This analysis of machines helped to design the bamboo structure.

Research was done on the correct way to cut bamboo, its drying and storage, preservation, species cultivated in Guatemala, mechanical properties and connections. With this information, we proceeded to perform stress calculations and finite element analysis modeling to determine if it is feasible to build the machine.

The analysis of the framework determined the values of the reactions at its nodes. For this, the system was disassembled into individual elements for analysis. The most critical reactions were $R_{y1} = 1,293.33N$, $B_y = -921.35N$ and $R_{x2} = -629.34N$.

To determine the value of the bending moment, shear force and axial force, the machine was modeled as a gantry. Two nodes were added to the system in order to perform the analysis correctly. Thus, critical values of bending moment = $400.18N \cdot m$, shear force = $629.34N$ and axial force = $-1,737.93N$ were obtained.

With the critical values of bending moment, shear force and axial force, we proceeded to calculate the stresses they exert on the structure and the safety factor for each of them. The bending force resulted in 25.94 MPa with a safety factor of 8.94, the shear force obtained a value of 1.26 MPa and 7.11 as safety factor, and finally, the compressive force resulted in 1.74 MPa and a safety factor of 6.36.

As a last step, a finite element analysis was performed, modifying the system to model it in the software. A meshing of 0.25, equivalent stress of 19.6 MPa and a factor of safety of 11.87 were obtained.

CAPÍTULO 1

Introducción

El bambú se utiliza como material de construcción desde hace más de 5,000 años, en la antigua China se usó para construir casas en los árboles, también para hacer papel, libros, ropa, etc.

Se llevaron largos años de investigación para determinar las propiedades mecánicas del bambú, este tiene una alta resistencia a la tracción (semejante a la del acero), y a la compresión (comparable con el hormigón); las capacidades de flexibilidad, resistencia y dureza hacen al bambú un material capaz de ser utilizado en estructuras. Rosales realizó una investigación para determinar las propiedades mecánicas del bambú cultivado en Guatemala, estos valores fueron utilizados para los cálculos de esfuerzo.

Por lo general, el bambú se utiliza en construcciones como: techos, paredes, muros, etc. No se ha visto otra aplicación fuera de este tipo de obras. Tras investigar sus propiedades y beneficios, se planteó diseñar y construir una máquina de ejercicios de fuerza con estructura de bambú.

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), es el encargado de regular las condiciones con las que debe cumplir una estructura/construcciones. El título G de este reglamento contiene información para estructuras de madera y estructuras de bambú. Este contiene temas de calidad de la madera, tolerancia, esfuerzos admisibles, deflexiones, conexiones, etc.

Por otro lado, el planeta está constantemente afectado por la contaminación, por lo que reciclar y reutilizar es una forma conveniente para ayudar al medio ambiente. Asimismo, realizar actividad física/ejercicio es importante para los seres humanos porque mejora su salud. Se tiene como objetivo diseñar y construir una máquina para ejercicios de fuerza con una estructura de bambú y piezas de desecho. Se espera obtener una máquina amigable con el medio ambiente que soporte cargas elevadas para entrenos de fuerza.

El bambú se ha utilizado en diferentes poblaciones para construir sus viviendas. Esto se debe a que una de las propiedades del bambú es absorber monóxido de carbono y reducir el impacto ambiental que aporta a los sistemas de construcción. Además, tiene propiedades estructurales y posibles aplicaciones en la arquitectura (Torres B., 2019).

También se han fabricado motocicletas de bambú como la Banatti Green Falcon. Esta motocicleta cuenta con una estructura y cuerpo construidos a base de bambú a excepción del chasis el cual es de acero (Alós, 2018). En el año 2020, en la Universidad del Valle de Guatemala, se trabajó una máquina elíptica con estructura de bambú y analizó las propiedades físicas y mecánicas de la planta. La máquina elíptica se construyó logrando generar el movimiento elíptico mientras soportaba a un usuario de 60kg (Francisco P., 2020). La información obtenida de los distintos proyectos en los cuales se hace uso de bambú permite que el proyecto sea factible de realizar.

3.1. Generales

1. Diseñar y construir una máquina para ejercicios de fuerza con una estructura de bambú y material de desecho.

3.2. Específicos

1. Investigar las propiedades del bambú utilizados en Guatemala.
2. Identificar las piezas de desechos que serán utilizados para la máquina.
3. Establecer el tipo de unión entre las piezas de la máquina.
4. Efectuar un análisis estructural para analizar los esfuerzos generados en la máquina.

El bambú es la planta de crecimiento más rápido y la más versátil del mundo. Durante varios siglos el bambú ha sido indispensable para los seres humanos que habitan en países tropicales. En los últimos años se ha tenido un importante crecimiento en el área de construcción, hasta el punto de sustituir bambú por madera (Liese & Köhl, 2015). El Bambú es pariente de la grama, proviene de la subfamilia Bambusoideae. Existen alrededor de 75 géneros y un aproximado de 1,300 especies. El bambú tiene excelentes propiedades mecánicas y es usado en construcciones, andamios, productos de artesanía, muebles, etc.(Liese & Köhl, 2015).

4.1. Taxonomía

El bambú, al igual que todas las especies de plantas, tiene características morfológicas como rizomas, yemas, hojas, ramificaciones, flores y frutos. Stapleton detectó dos características (quilla profiláctica y replicación de ramas) mientras estudiaba el bambú del Himalaya e infirió que estos caracteres ayudan a identificar el bambú a nivel genérico. Estas características morfológicas han clasificado el bambú de diversas formas (Sen & Kar, 2014).

Los bambú son miembros de la subfamilia Bambusoideae, dentro de la familia de las gramíneas. La familia de las gramíneas es monofilética, donde todos los organismos han evolucionado a partir de una población ancestral, y los primeros linajes dentro de la familia fueron Anomochlooideae, Pharoideae y Puelioideae (Das, 2008).

4.2. Morfología

El bambú es una planta prometedora e interesante para ser utilizada como material renovable en la construcción de grandes y pequeñas estructuras. Para ser utilizado como

alternativa a los materiales tradicionales será necesaria la comprensión de su morfología y su comportamiento mecánico (Elejoste, 2021).

La estructura de las plantas de bambú se muestra en la Figura 1 y Figura 2. El bambú está compuesto por tallos con nudos o diafragmas transversales sólidos que separan diferentes regiones internodales huecas (Figura 1, a). Las fibras celulósicas se orientan paralelamente al eje longitudinal (Figura 1, b) y se incrustan en la matriz de tejido parénquima que compone la sección circular transversal (Figura 1, c). Esta matriz de tejido del parénquima se lignifica, lo que provoca una mejora de las propiedades mecánicas del bambú (Elejoste, 2021).

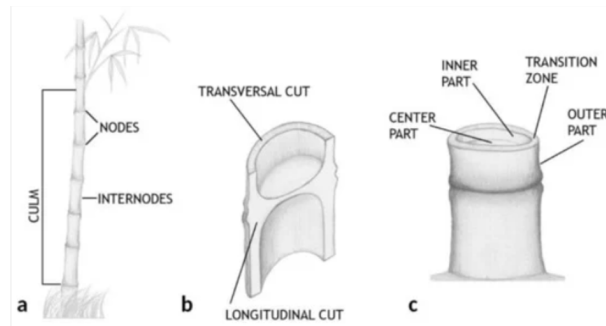


Figura 1: Esquema del bambú
Fuente: (Elejoste, 2021)

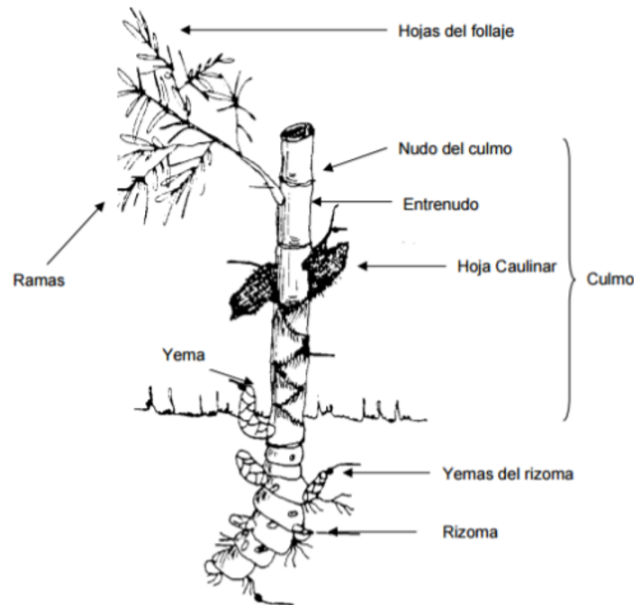


Figura 2: Estructura del bambú
Fuente: (Rosales, 2018)

4.2.1. Culmo

El culmo es la parte entre las raíces y las ramas, constituye aproximadamente dos tercios de la planta (Elejoste, 2021). También es el soporte estructural del bambú, el cual conduce y transporta agua y sábila (Richard, 2013). El culmo es la parte más útil del bambú. Los culmos jóvenes se utilizan para la elaboración de canastos, esteras y artesanías. Los maduros son utilizados en construcción, pulpa para papel, y productos industrializados (Rosales, 2018).

4.2.2. Rizoma

El sistema de rizomas subterráneos es el encargado del crecimiento rápido y de la producción del culmo. El rizoma no es una raíz, si no un tallo subterráneo que tiene nodos y entrenudos que crecen lateralmente (Richard, 2013). El rizoma es la estructura de soporte de la planta. Es fuerte y se encuentra a una profundidad de un metro y medio. Esta almacena nutrientes. Existen tres grupos de rizomas: paquimorfo, leptomorfo y afimorfo (Rosales, 2018).

4.2.3. Yema

La yema se encuentra en cada nodo. Las yemas son importantes para la clasificación taxonómica del bambú debido a que ayudan a identificar las especies, secciones y géneros (Rosales, 2018).

4.2.4. Ramas

Las ramas se originan en los nodos. El número de ramas varía dependiendo la especie de bambú, esta cantidad varía entre 1 y 100 ramas por nodo. Dependiendo la especie, las ramas tienen forma de espinas o abanico. (Rosales, 2018).

4.2.5. Hoja caulinar

Protege el culmo desde que emerge hasta los primeros meses de crecimiento. La hoja caulinar nace en cada nodo del culmo y tiene como función proteger la yema, la cual da origen a las ramas y al follaje (Rosales, 2018).

4.2.6. Follaje

El follaje es la principal fuente de alimentos en la planta. Se utiliza como alimento para ganado o para animales menores. En China, el follaje es utilizado para extraer pigmentos, elaborar gaseosas, perfumes etc. (Rosales, 2018).

4.3. Corte

Los culmos de bambú deben cortarse por encima del primer nodo del tallo, a nivel del suelo. El corte debe hacerse después de tres a siete años, esto depende de la especie. Se debe dejar por lo menos un 25 % de su tallo en pie. El corte se realiza en época seca, cuando la luna se encuentra en su estado cuarto menguante y por la madrugada, así evitando la humedad y la concentración de almidón (Rosales, 2018).

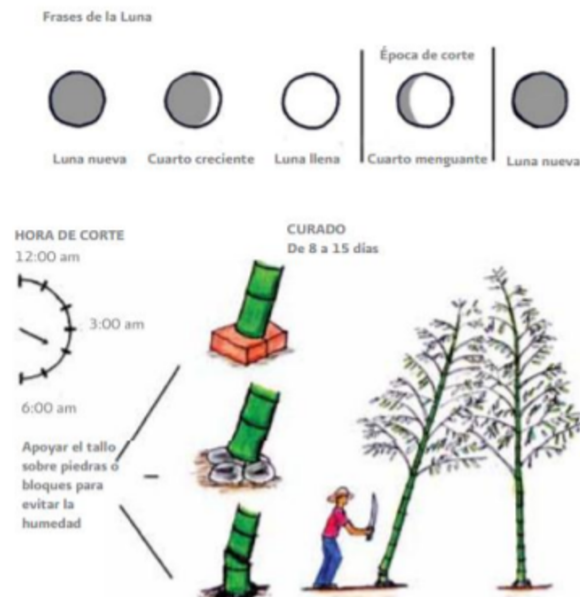


Figura 3: Corte del bambú
Fuente: (Rosales, 2018)

Las plantaciones de bambú pueden deteriorarse por diferentes razones. La recolección excesiva de culmo de 1 año para la fabricación de papel daña las poblaciones de bambú, también puede causar una reducción del rendimiento de la madera. La regeneración de bambú se ve afectada negativamente en los grupos cosechados inapropiadamente, lo que produce una disminución de este recurso (Mulatu, 2011).

Varios estudios indicaron que la aplicación de diferentes técnicas de recolección ayuda a rehabilitar y regenerar las plantaciones da bambú, también aumenta el número de brotes, el diámetro y la altura del culmo, así como su resistencia mecánica (Mulatu, 2011).

4.4. Secado y almacenamiento

El secado y almacenamiento del culmo de bambú es importante para que este no pierda sus propiedades físicas y mecánicas. El culmo que contiene humedad se contrae y se dilata. Reducir al máximo el porcentaje de humedad hasta un 15 %, hace que los organismos que provocan descomposición y manchas en el culmo desaparezcan o se reduzcan (Rosales, 2018).

El proceso más utilizado para reducir el porcentaje de humedad existente en el culmo es

secarlo exponiéndolo al aire libre, debido a que es el proceso más simple. Después de cortar el culmo del bambú, este se almacena junto con sus hojas. El culmo se debe almacenar colocándolo de forma horizontal o vertical separados por al menos 30cm del nivel del suelo para evitar la absorción de humedad. El culmo también se puede secar por medio de hornos, para dicho proceso se coloca sobre una fuente de calor alrededor de 3 semanas, así perdiendo entre el 50 % y el 60 % de su peso (Rosales, 2018).

Para almacenamiento en el interior de una bodega, esta debe tener una buena ventilación. El culmo también puede sumergirse dentro de un río y almacenarse allí unos días, posteriormente debe trasladarse a un lugar definitivo para su almacenamiento (Rosales, 2018).

4.5. Preservación

Una de las principales inquietudes del uso del bambú en la construcción es su durabilidad. Aunque la durabilidad natural depende de la especie, la vida útil del bambú sin tratar es de 1 a 3 años cuando está en contacto con el suelo, de 4 a 5 años cuando están protegidos de la exposición exterior y mayores a 15 años en interiores. Se necesita un tratamiento al bambú para mejorar la durabilidad (Correal, 2016). El bambú utilizado para la construcción debe ser tratado después del corte para evitar su deterioro, de esta manera prolongar su vida útil. La vida útil de un bambú tratado puede llegar a los 40 años (Rosales, 2018). (Kaur, 2016) también informa que el tiempo de cosecha afecta la durabilidad del bambú. Esta durabilidad es afectada por las estaciones. Durante las estaciones secas, la susceptibilidad de contraer hongos es mayor debido al contenido de almidón.

En el curado, los culmos deben cortarse en la base y dejarse una a tres semanas en almacenamiento con sus ramas y hojas. En este tiempo, la cantidad de almidón que está concentrado en el culmo se reducirá. Con esto se reduce la cantidad de insectos que perforan el tallo, pero no es eficaz para otros tipos de insectos y hongos (Rosales, 2018).

El remojo se centra en sumergir los culmos de bambú en agua en corriente o estancada. Como los culmos son más livianos que el agua, se pone peso sobre los tallos para sumergirlos completamente. Los culmos frescos se almacenan durante aproximadamente 3 meses en agua estancada o en corriente. El almidón, los carbohidratos y otras sustancias solubles en agua pueden fermentarse o lavarse. La duración de la inmersión varía de una especie a otra (Kaur, 2016).

El ahumado se basa en almacenar los culmos del bambú en lugares cerrados que estén en contacto con humo. El bambú se torna de un color oscuro, esto se debe a sustancias tóxicas que se encuentran en el interior del culmo, estas permiten que el bambú adquiera más resistencia (Rosales, 2018).

Los métodos químicos son más efectivos, pero no siempre pueden ser aplicables y el costo incrementa (Rosales, 2018). La penetración de productos químicos en el tejido del culmo es más difícil que en la madera, debido a que las células no forman un transporte radial que atraviese todo el espesor de la pared. Se han desarrollado métodos de conservación eficaces y seguros, utilizando productos químicos como el ácido bórico, boráx, y el boro (Correal,

2016).

Los métodos tradicionales para la conservación del bambú son sencillos, seguros y económicos. En los últimos años se ha demostrado que estos métodos producen poca durabilidad cuando se exponen a las condiciones exteriores y al ataque de microbios e insectos. Los conservantes a base de extractos de plantas tienen un gran potencial, estos son tóxicos únicamente para el microorganismo o las termitas y son seguros para los mamíferos (Kaur, 2016).

4.6. Entidades gubernamentales e instituciones que promueven el bambú en Guatemala

4.6.1. Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA)

ICTA es una institución de derecho público que tiene como fin generar y promover el uso de la ciencia y tecnologías agrícolas para contribuir al desarrollo agrícola rural en Guatemala. El ICTA ha desarrollado manuales acerca del cuidado, mantenimiento, cultivo y fabricación del bambú.

4.6.2. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA)

MAGA es una institución que fomenta el desarrollo rural a través de modernización y transformación del sector agropecuario, forestal e hidrobiológico, así desarrollando capacidades productivas, organizativas y comerciales garantizando la sostenibilidad de los recursos naturales.

MAGA contribuyó con la inauguración del Centro de Transformación e Investigación del bambú. El proyecto se logrará con el apoyo de la Misión Técnica de la República de China (Taiwán), que proporcionó 52 máquinas de procesamiento para bambú. Este ministerio brinda asistencia técnica a productores de 1,200 hectáreas de bambú.

4.6.3. Empresas privadas de bambú en Guatemala:

1. Bambú Guatemala.
2. Bambú Maya.
3. Bambuguate.
4. Debambú.
5. Arquitectura y Bambú.

4.7. Especies de bambú en Guatemala

El bosque de bambú en Guatemala tiene un área aproximada de 12,000 hectáreas, donde las principales especies de bambú son: *Guadua Angustifolia* y *Bambusa vulgaris*, estas son mayormente utilizadas en la protección de cauces de los ríos y en la conservación de tierras y aguas (Rosales, 2018).

Las especies *D. asper* y *G. angustifolia* son utilizadas para procesamiento, estas especies cuentan con 7,000 hectáreas cultivadas donde 5,600 hectáreas son cultivos de 1 a 3 años. Las especies *Guadua* y *Bambusa* se encuentran cultivadas en 700 hectáreas ubicadas en diferentes apartamentos (Rosales, 2018).

Las plantaciones de bambú existentes en Guatemala proveen el culmo, el cual es la materia prima para para la fabricación de productos como muebles, tejidos, pisos, etc. (Rosales, 2018).

4.8. Análisis de esfuerzos

El bambú es un material natural que exhibe un comportamiento viscoelástico y anisotrópico, generalmente en el diseño se considera como un material ortotrópico. Las propiedades del bambú son más importantes a lo largo de la longitud del culmo (Correal, 2016).

La edad en el momento de la cosecha es un factor clave que influye en las propiedades físicas y mecánicas del bambú. La resistencia en relación con la edad del bambú varía dependiendo la especie, como supuesto general se dice que el bambú madura después de 3 años (Correal, 2016).

En general, todos los elementos de bambú en una estructura deben diseñarse, construirse y conectarse para resistir las tensiones producidas por las combinaciones de carga y las limitaciones de deflexión estipuladas en los códigos de construcción. Para facilitar los cálculos de resistencia de materiales los elementos de bambú se consideran homogéneos y lineales para la estimación de tensiones debidas a cargas aplicadas (Correal, 2016).

El diseño de elementos de caña de bambú sometidos a flexión sigue el mismo procedimiento básico utilizado en el diseño de vigas en otros materiales estructurales. El bambú es un material muy flexible y el diseño de flexión generalmente se regirá por las deflexiones permitidas. Se deben analizar los siguientes efectos en el diseño de elementos de bambú sometidos a flexión (Correal, 2016):

1. Deflexiones.
2. Resistencia a la flexión, incluida la estabilidad lateral para vigas construidas.
3. Resistencia al cizallamiento paralelo al grano.
4. Cojinete (compresión perpendicular al grano).

Los soportes de un elemento de bambú sometido a flexión no deben fallar debido al apoyo (falla por compresión). Es una práctica común rellenar el entrenudo en el soporte con cemento. Se deben aplicar cargas concentradas, en la medida de lo posible, en el nodo del elemento de bambú y se deben realizar todas las acciones necesarias para evitar fallas debido a cizallamiento paralelo al grano o apoyo en el punto de carga. En este caso, se recomienda rellenar los entrenudos adyacentes con cemento (Correal, 2016).

Cuando se utiliza más de un culmo para la construcción de vigas (vigas empotradas), estas deben estar conectadas con pernos o barras roscadas y abrazaderas metálicas, esto para asegurar que los elementos funcionen correctamente. Estos conectores deben diseñarse para resistir las fuerzas de corte que actúan a lo largo de las interfaces del elemento (Correal, 2016).

La ubicación crítica para el esfuerzo cortante se calcula a una distancia igual a la profundidad del elemento medida desde la cara del soporte. Para vigas de un solo culmo, esta profundidad debe ser igual al diámetro exterior del culmo, a excepción para vigas en voladizo, donde el esfuerzo cortante máximo debe calcularse en la cara del soporte (Correal, 2016).

Se debe prestar especial atención al diseño de conectores de acero transversales en vigas de bambú compuestas por dos o más culmos. Se recomienda llenar todos los entrenudos atravesados por un conector con cementoso o un fluido que no se contraiga (Figura 4).

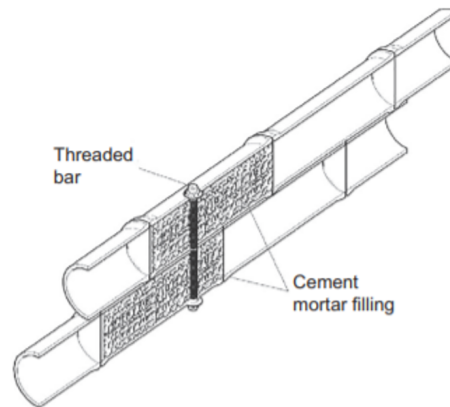


Figura 4: Conector transversal
Fuente: (Correal, 2016)

En las estructuras de bambú, los miembros sometidos a fuerzas de compresión (como columnas) se encuentran con mayor frecuencia a comparación de los miembros sometidos a fuerzas de tensión, esto debido a la naturaleza del bambú de soportar cargas de gravedad verticales (fuerzas de compresión) y debido a la dificultad de fabricar conexiones eficientes para los miembros que se encuentran sometidos a una fuerza de tensión (Correal, 2016).

Las columnas construidas están hechas de dos o más culmos. Los principales mecanismos de falla de los elementos de compresión son el pandeo y el aplastamiento (Correal, 2016).

4.9. Propiedades mecánicas del bambú

A continuación, se presentarán los resultados de los cálculos obtenidos por ensayos para determinar las propiedades mecánicas del bambú *Dendrocalamus Asper* de Guatemala, esta especie fue utilizada para la construcción de la máquina.

Tipo de ensayo	Resistencia (MPa)
Tensión perpendicular a la fibra	0.6
Compresión con un nudo	14.48
Compresión sin nudo	11.06
Compresión con dos nudos	11.6
Corte sin nudo	8.97
Corte con dos nudos	7.8
Módulo de ruptura	75.32
Módulo de elasticidad	9,346.93
Límite elástico	232

Cuadro 1: Propiedades mecánicas *Dendrocalamus Asper*
Fuente: (Correal, 2016)

4.10. Referencias de máquinas para ejercicios de fuerza con sistemas de poleas

El primer diseño visto para construir la máquina de fuerza con estructura de bambú fue la *Funcional Trainer With Dual 200lb Weight Staks*. La máquina cuenta con dos juegos de placas de levantamiento de 200 libras, cada placa pesa 10lb. Cuenta con 1.65m de ancho, 1.1m de largo y 2.12m de alto.



Figura 5: Funcional trainer with dual 200lb weight staks
Fuente: (XMark, 2021)

La segunda máquina tomada como referencia fue *Titanium Strength TF12 Crossover 1*

Station. Esta máquina posee un ancho de 1m, 1.2m de largo y 2.3m de alto. Cuenta con placas de peso para levantamiento de 397lb.



Figura 6: Titanium Strength TF12 Crossover 1 Station
Fuente: (Strength, 2021)

El tercer diseño de referencia fue la *Rogue CT-1 cable tower*. La máquina posee dimensiones de 1.5m de ancho, 1.33m de largo y una altura de 2.7m. Las placas de levantamiento tienen un peso total de 250lb.



Figura 7: Rogue CT-1 cable tower
Fuente: (Rogue, 2021)

A partir de la descripción de las máquinas de referencia, se estableció el peso de levantamiento que la máquina de bambú soportará, dicho peso será 200 lb. Además, el diseño del sistema de poleas permitió una carga máxima de 100lb, esta carga será utilizada por el

usuario para ejercitarse.

Para el análisis del sistema de poleas y cable, la polea se modeló como una partícula en un estado de equilibrio, de esta forma se determinó la tensión de carga máxima que podrá ejercer el usuario. La polea se modeló como una partícula dado que el tamaño y la forma del cuerpo no afectará a la solución (Beer, 2010).

4.11. Conexiones

Las uniones para las estructuras de bambú se clasifican en cuatro categorías: cortadas, ortogonales, en ángulo y pasantes. Es importante tener en cuenta varios aspectos en las conexiones de bambú: el tipo de conector, como los amarres, pernos de acero, pasadores de madera, abrazaderas o placas de acero; la forma de corte en los extremos del culmo, estos pueden ser corte recto, coba de pez, o boca de pez inclinada; el material de relleno dentro de las conexiones del bambú como cemento o madera pegada a la pared interior del culmo (Correal, 2016).

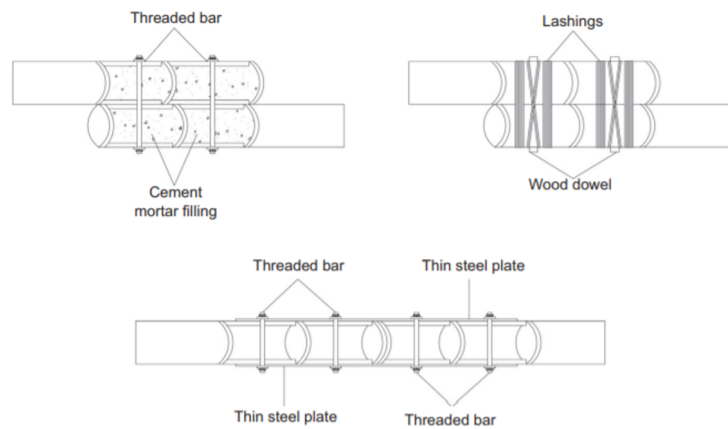


Figura 8: Conexiones cortadas
Fuente: (Correal, 2016)

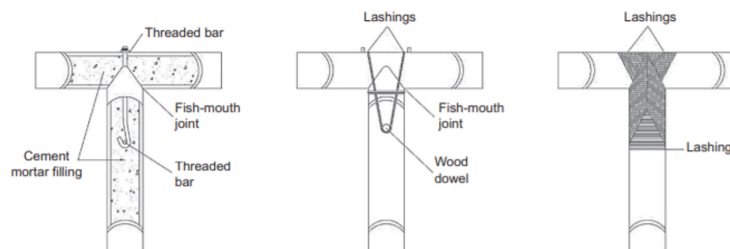


Figura 9: Conexiones ortogonales
Fuente: (Correal, 2016)



Figura 10: Conexiones con ángulo
Fuente: (Correal, 2016)

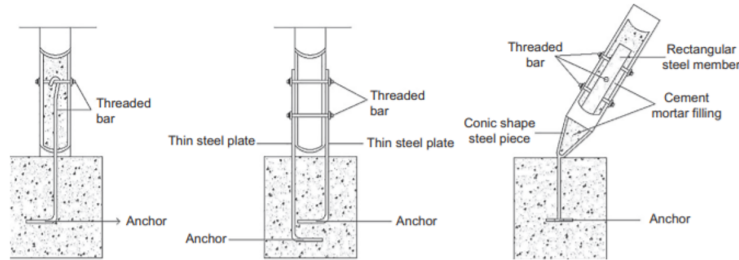


Figura 11: Conexiones de poste a cimentación
Fuente: (Correal, 2016)

Los pernos y abrazaderas de acero, las placas de refuerzo de acero y las juntas de extremo de metal son el tipo de conexión más utilizada en las estructuras de bambú. Los pernos y abrazaderas de acero son de menor costo que otros conectores. Las formas cortadas en las juntas de dos o más elementos de bambú son muy importantes para evitar aplastamientos o roturas en las superficies de las juntas (Correal, 2016).

Aunque el corte se puede realizar a mano se recomienda realizarlo con una máquina de sierra de corona para metal y realizar los cortes a no más de 100 mm de los nudos. La Figura 12 muestra un corte de boca de pez, mientras que la Figura 13 muestra un corte de boca de pez inclinado, utilizado para unir culmos de bambú a 90 grados y una orientación en ángulo inclinado. Se puede utilizar material de relleno en el entrenudo del bambú, el cemento es el material de relleno comúnmente utilizado en las conexiones de bambú, ya que el cemento es más fácil de obtener y fabricar, y en algunos casos es menos costoso que la madera (Correal, 2016).

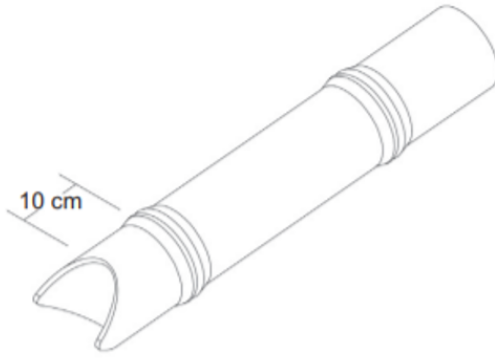


Figura 12: Corte boca de pescado
Fuente: (Correal, 2016)

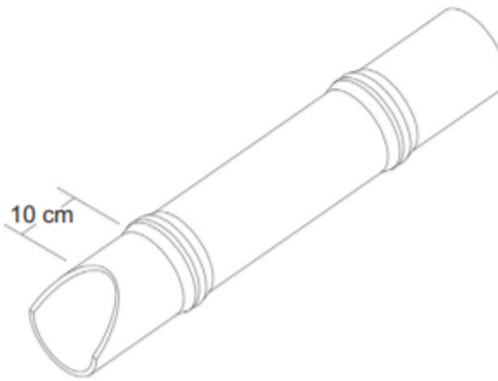


Figura 13: Corte boca de pescado inclinado
Fuente: (Correal, 2016)

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR – 10 recomienda utilizar cemento con una relación mínima de: arena de 1:3 y utilizar un aditivo plastificante para asegurar la fluidez de la mezcla. También se recomienda que el cemento corresponda al tipo M o S (resistencia a la compresión entre 12,5 y 17,5 MPa y 110 - 25 % de fluidez). El uso de madera como material de relleno requiere un trabajo extra para la fabricación de juntas, este tipo de relleno tiene un peso específico similar al del bambú. Teniendo en cuenta que el relleno de cemento añade peso a la conexión es necesario investigar sobre nuevos materiales de relleno que tengan una resistencia a la compresión adecuada y, al mismo tiempo, sean livianos y fáciles de verter (Correal, 2012).

5.1. Metodología para resolver el problema

5.1.1. Fase 1: Investigación previa

Antes de iniciar prototipos, diseño y cálculos se investigó y analizó distintas máquinas para hacer ejercicios de fuerza, el peso en libras que se podría utilizar, características que debe tener la máquina, cálculos a realizar, propiedades físicas del bambú y selección de elementos como: poleas, cables y accesorios de agarre.

5.1.2. Fase 2: Definición de requisitos

Para definir los requisitos se analizó las dimensiones que debe cumplir la máquina, lugar de instalación, características que debe cumplir en cuanto a su funcionamiento, seguridad, costos, materiales y el tipo de usuario que hará uso de la máquina.

5.1.3. Fase 3: Síntesis de diseño

Se realizaron varios diseños para determinar el más eficiente, de esta manera reduciendo costos y el tiempo de construcción de la máquina. El comportamiento del sistema y sus elementos se analizó por medio de un análisis estructural, en el programa de computadora ANSYS. El diseño debe cumplir con los requisitos planteados y no fallar ante las cargas aplicadas.

5.1.4. Fase 4: Prueba

Se realizaron pruebas en base al diseño más eficiente. Las pruebas deben asegurar que los resultados del diseño satisfagan los requisitos. También se buscó fallas para corregirlas. En la fase de pruebas se realizó un análisis de elementos finitos para obtener el diseño más eficiente de la máquina.

5.1.5. Fase 5: Construcción

Se seleccionaron los 15 culmos de bambú más rectos. Estos se cortaron para obtener la longitud ideal, se abrió agujeros en ellos y por medio de una copa se generó la boca de pezcard para las uniones.

Se trazó en el suelo la silueta de la base perteneciente a la estructura para tener una guía. Se armó la base con bambú y se continuó con la construcción de la estructura completa. El sistema de unión es la soldadura entre una arandela y varilla rosacada.

Se colocó tubo para la guía de los pesos, estos son rodos de cadena industrial. Se soldó cinco rodos en serie y se colocó dentro de la máquina. El cable se distribuyó en las poleas y se armó el sujetador.

5.2. Requisitos

Tipo de requisito	Código	Descripción
Seguridad	SEG-1	El bambú debe soportar los esfuerzos resultantes de compresión y flexión generados por 200lb.
	SEG-2	La máquina debe estar correctamente anclada al suelo para evitar su deslizamiento o movimiento no deseado.
Dimensiones	DIM-1	La altura de la máquina debe tener un máximo de 2.10 metros.
	DIM-2	El largo de la máquina debe tener un máximo de 1.5 metros.
	DIM-3	El ancho de la máquina debe tener un máximo de 1.5 metros.
	DIM-4	La altura del peso a levantar, por medio del cable, debe tener un máximo de 0.70. metros
	DIM-5	El ancho del peso a levantar por medio del cable debe tener un máximo de 0.5 metros.
	DIM-6	El peso máximo de los desechos debe ser 200 libras.
	DIM-7	El diámetro externo del bambú debe ser aproximadamente 7cm.
	DIM-8	El diámetro interno del bambú debe ser aproximadamente 6cm.
	DIM-9	El cable debe soportar la carga máxima (200lb) generada por los desechos de la máquina de ejercicios.

Funcionamiento	FUN-1	El peso por manipular es directamente proporcionado por piezas de desecho.
	FUN-2	Los desechos deben ser levantados por medio un cable.
	FUN-3	El usuario debe tirar del cable, por medio de una barra de sujeción, para realizar el ejercicio deseado.
	FUN-4	Al final del cable debe haber un gancho donde se colocarán los distintos accesorios.
	FUN-5	El peso por levantar debe seleccionarse por medio de una varilla selectora.
	FUN-6	La polea que levanta el peso, debe desplazarse longitudinalmente por el bambú para realizar distintos ejercicios.

Cuadro 2: Definición de requisitos

5.3. Sistema de poleas

Utilizando de referencia las máquinas de ejercicio con sistema de poleas, en la página 15, se ubicó cada polea en la estructura de bambú.

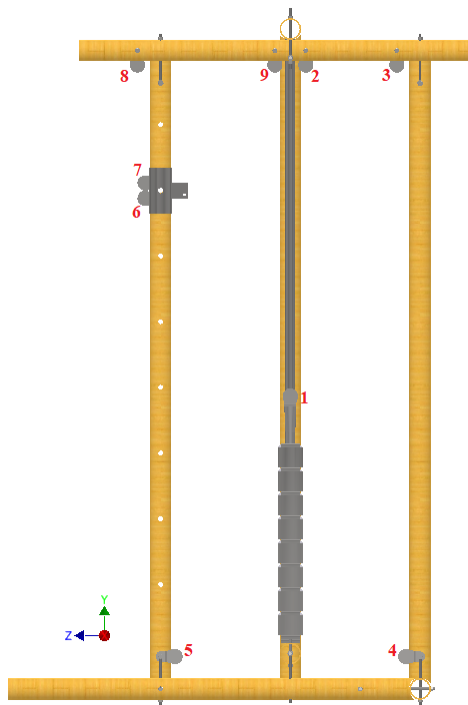


Figura 14: Numeración y ubicación de poleas
Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.

El cable recorre todo el sistema de poleas. El usuario tira del cable en la polea 6 y 7 para realizar el ejercicio de fuerza. El carrito tiene un brazo, donde el cable está fijo. Al carrito se soldó la polea 6 y 7, este se desplaza a lo largo del bambú.

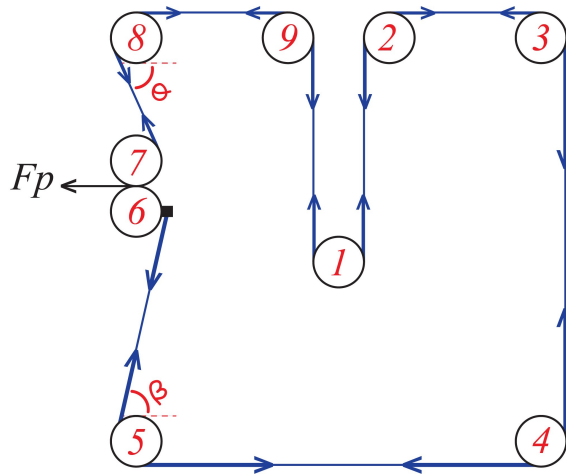


Figura 15: Sistema de poleas

Para determinar la fuerza con la que trabajará el usuario, fue necesario un análisis de cuerpo libre en la polea número 1. El peso neto que carga la máquina es 200 lb.

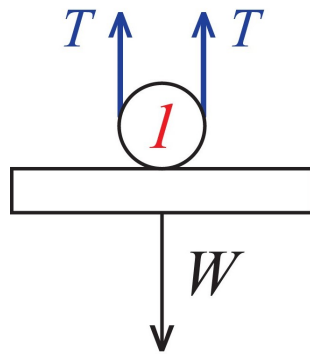


Figura 16: Diagrama de cuerpo libre polea 1

Por medio de una sumatoria de fuerzas en el eje vertical, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 -W + 2T &= 0 \\
 T &= 100lb \cong 444.82 \text{Newton}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

La fuerza de tensión de 100lb se mantiene en toda la longitud del cable. El usuario podrá ejercitarse con un peso máximo de 100 libras.

5.4. Análisis armazón

La estructura de bambú se modeló como un sistema tipo pórtico, este se separó en 3 elementos para su análisis. El elemento R_1B contiene la fuerza resultante F_p (fuerza usuario), equivalente a 100lb. F_p fue descompuesta en sus componentes cartesianas, el valor para F_p en dirección vertical y horizontal equivalen a 100lb, ubicadas en el nodo B a 2m del suelo.

La decisión de asignar el valor de 100lb a F_p en dirección vertical y horizontal, fue para crear el caso más crítico, aunque este nunca exista.

Los ángulos $\theta = 56.7^\circ$ y $\beta = 88.3^\circ$, valores generados cuando F_p se encuentra a 2m del suelo, son ángulos críticos y fueron determinados en el diseño CAD. Debido a que F_p se encuentra lo más alejado del pivote (R_1 o R_2), se genera el mayor momento del sistema.

Se utilizará el sistema internacional para realizar los cálculos, por ende, 100lb equivalen a 444.82 N.



Figura 17: Sistema construido con nodos añadidos

Como primer paso, se realizó un diagrama de cuerpo libre del armazón completo, esto para determinar las reacciones en los puntos de apoyo. El pivote fue colocado en el nodo R_2 .

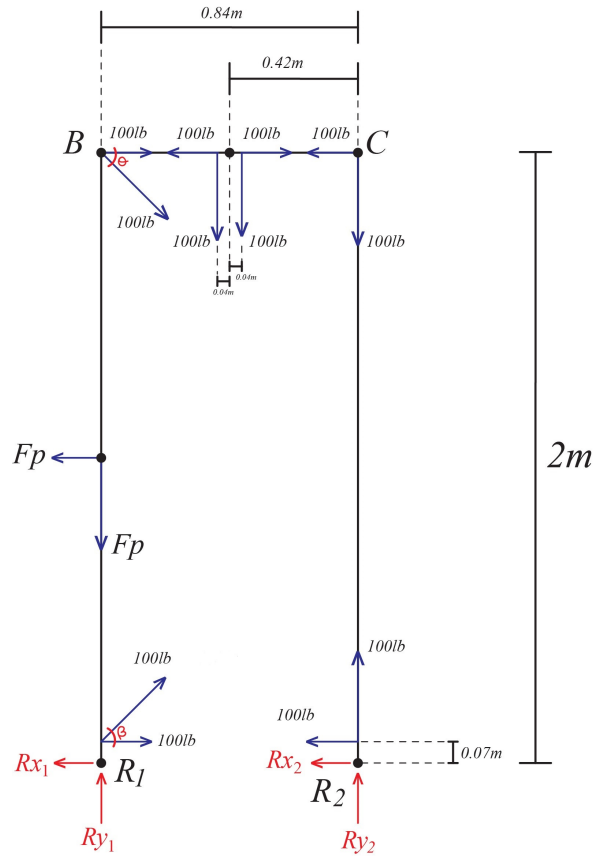


Figura 18: Diagrama de cuerpo libre para armazón completo

Por medio de una sumatoria de momentos, se determina el valor de R_{y1} :

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M_{R2} &= 0 \\
 &- 444.82N(0.38m) - 444.82N(0.46m) + 444.82N \cos(56.7^\circ)(2m) \\
 &- 444.82N \sin(56.7^\circ)(0.84m) - F_{px}(2m) - F_{py}(0.84m) \\
 &+ 444.82N \cos(88.3^\circ)(0.07) + 444.82N \sin(88.3^\circ)(0.84m) + R_{y1}(0.84m) = 0 \\
 R_{y1} &= 1,293.33 \text{ N } \uparrow
 \end{aligned} \tag{2}$$

Obteniendo el valor de R_{y1} , se puede determinar R_{y2} , esto por medio de una sumatoria de fuerzas en el eje vertical.

$$\begin{aligned}
+ \uparrow \sum F_y &= 0 \\
&- 444.82N - 444.82N - 444.82N \sin(56.7^\circ) + 444.82N \sin(88.3^\circ) \\
&- 444.82N + R_{y1} + R_{y2} = 0 \\
R_{y2} &= -31.71 \text{ N} \downarrow
\end{aligned} \tag{3}$$

Después de realizar el análisis de fuerzas para el armazón completo, este se descompone en sus elementos para su análisis individual.

5.4.1. Elemento R_1B :

El nodo R_1 , donde se encuentran las reacciones de apoyo, se utiliza como pivote para la sumatoria de momentos, así determinando el valor de B_x :

$$\begin{aligned}
+ \curvearrowright \sum M_{R1} &= 0 \\
&444.82N(0.07m) + 444.82N \cos(88.3^\circ)(0.07m) + 444.82N \cos(56.7^\circ)(2m) \\
&+ 444.82N(2m) - 444.82N(2m) - B_x(2m) = 0 \\
B_x &= 260.3 \text{ N} \leftarrow
\end{aligned} \tag{4}$$

Por medio de la sumatoria de fuerzas en el eje horizontal, se establece R_{x1} :

$$\begin{aligned}
+ \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
&444.82N + 444.82N \cos(88.3^\circ) + 444.82N \cos(56.7^\circ) \\
&+ 444.82N - 444.82N - B_x - R_{x1} = 0 \\
R_{x1} &= 441.93 \text{ N} \leftarrow
\end{aligned} \tag{5}$$

Para finalizar el análisis de cuerpo libre del elemento R_1B , se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje vertical, para obtener el valor de B_y .

$$\begin{aligned}
+ \uparrow \sum F_y &= 0 \\
&R_{y1} + 444.82N \sin(88.3^\circ) - 444.82N \sin(56.7^\circ) - 444.82N + B_y = 0 \\
B_y &= -921.35 \text{ N} \downarrow
\end{aligned} \tag{6}$$

El signo negativo de B_y , expresa que la dirección de la fuerza en el análisis de cuerpo libre es errónea. La dirección correcta de B_y es hacia abajo.

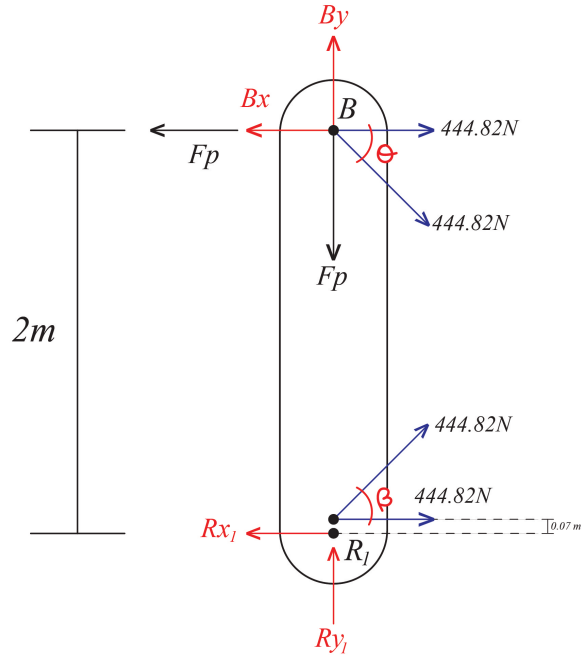


Figura 19: Cuerpo libre elemento R_1B

5.4.2. Elemento BC :

Por medio de la sumatoria de momentos, tomando como pivote el nodo B, se encuentra el valor para la componente C_y .

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M_B &= 0 \\
 444.82N(0.38m) + 444.82N(0.46m) - C_y(0.84m) &= 0 \quad (7) \\
 C_y &= 444.82 \text{ N } \uparrow
 \end{aligned}$$

El valor B_x , se obtuvo en el análisis del elemento R_1B . Considerando este valor, se realizó una sumatoria de fuerzas en el eje horizontal para determinar C_x .

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 B_x - C_x - 444.82N + 444.82N &= 0 \quad (8) \\
 C_x &= 260.3 \text{ N } \leftarrow
 \end{aligned}$$

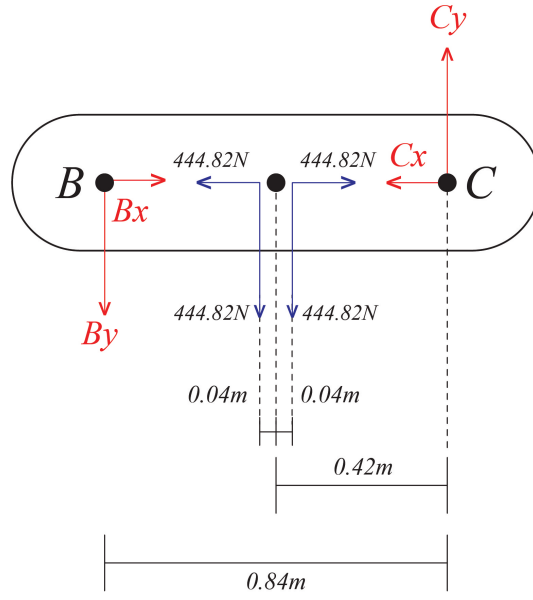


Figura 20: Cuerpo libre elemento BC

5.4.3. Elemento CR_2 :

El análisis de este elemento, determina la reacción de apoyo R_{x2} , se realiza una sumatoria de fuerzas en el eje horizontal:

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 - 444.82N - 444.82N + C_x - R_{x2} &= 0 \\
 R_{x2} &= -629.34 \text{ N} \rightarrow
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

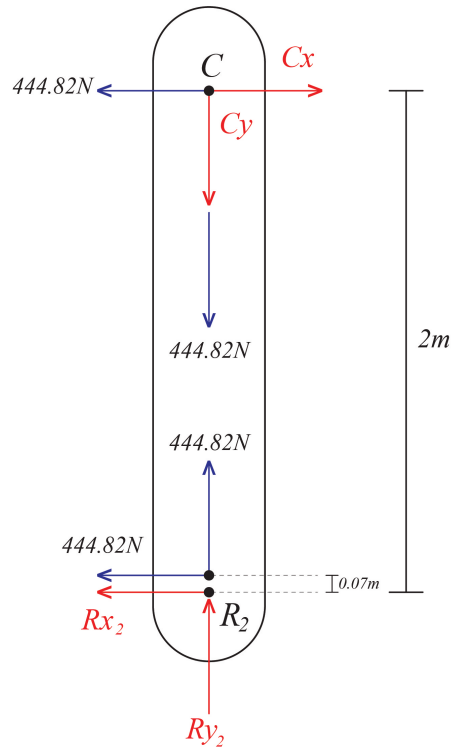


Figura 21: Cuerpo libre elemento CR_2

5.4.4. Comprobación:

Obteniendo todas las fuerzas de reacción desconocidas, se comprueba que el sistema esté en equilibrio. Realizando una sumatoria de fuerzas en el eje horizontal en el armazón completo, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 - R_{x1} + 444.82N \cos(88.3^\circ) - 444.82N + 444.82N \cos(56.7^\circ) - R_{x2} &= 0 \quad (10) \\
 0 &= 0 \quad (\text{Equilibrio})
 \end{aligned}$$

5.5. Análisis para momento flector, fuerza cortante y fuerza axial

Para determinar los valores de momento flector, fuerza cortante y fuerza axial, se siguió modelando al sistema como un pórtico. El sistema fue seccionado en 5 partes. Se agregaron 2 nodos para este análisis, el nodo A y D.

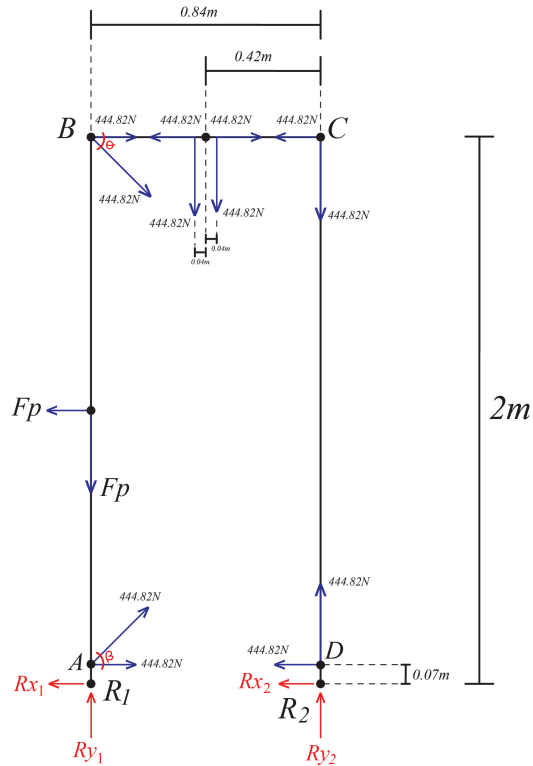


Figura 22: Armazón completo para análisis de diagramas de fuerza

5.5.1. Sección R_1A :

Los valores de distancia varían entre $0 \leq x \leq 0.07m$.

Sumatoria de fuerzas eje horizontal

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 v - R_{x1} &= 0 \\
 v &= 441.93 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Sumatoria de fuerzas eje vertical

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 A + R_{y1} &= 0 \\
 A &= -1,293.33 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{12}$$

Sumatoria de momentos:

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M &= 0 \\
 (R_{x1} \cdot x) - M &= 0 \\
 M &= 441.93 \text{ N} \cdot x
 \end{aligned} \tag{13}$$

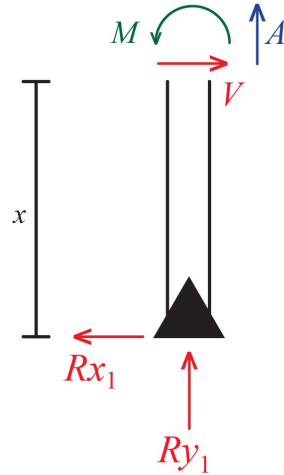


Figura 23: Sección R_1A

5.5.2. Sección AB :

Los valores de distancia varían entre $0.07 \leq x \leq 2m$.

Sumatoria de fuerzas eje horizontal

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 v - R_{x1} + 444.82N + 444.82N \cos(88.3^\circ) &= 0 \\
 v &= -16.1 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Sumatoria de fuerzas eje vertical

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 A + R_{y1} + 444.82N \sin(88.3^\circ) &= 0 \\
 A &= -1,737.95 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Sumatoria de momentos:

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M &= 0 \\
 (R_{x1} \cdot x) - (444.82N \cos(88.3^\circ)N + 444.82N) \cdot (x - 0.07m) - M &= 0 \\
 M &= -16.1 \text{ N} \cdot x + 32.06 \text{ Nm}
 \end{aligned} \tag{16}$$

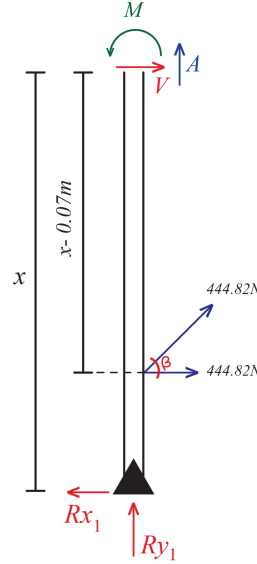


Figura 24: Sección AB

5.5.3. Sección BC :

Los valores de distancia varían entre $0 \leq x \leq 0.84m$.

Sumatoria de fuerzas eje horizontal

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 A + 444.82N \cos(56.7^\circ) - F_{px} + 444.82N \cos(88.3^\circ) \\
 + 444.82N - R_{x1} &= 0 \\
 A &= 184.52 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{17}$$

Sumatoria de fuerzas eje vertical

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 - v - 444.82N - 444.82N - 444.82N \sin(56.7^\circ) \\
 - F_{py} + 444.82N \sin(88.3^\circ) + R_{y1} &= 0 \\
 v &= 31.71 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Sumatoria de momentos:

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M &= 0 \\
 - M - 444.82N(x - 0.46m) - 444.82N(x - 0.38m) - 444.82N \sin(56.7^\circ)(x) \\
 - F_{py}(x) + 444.82N \sin(88.3^\circ)(x) - 444.82N \cos(88.3^\circ)(1.93m) \\
 - 444.82N(1.93m) + R_{x1}(2m) + R_{y1}(x) &= 0 \\
 M &= 31.71 \text{ N} \cdot x + 373.54 \text{ Nm}
 \end{aligned} \tag{19}$$

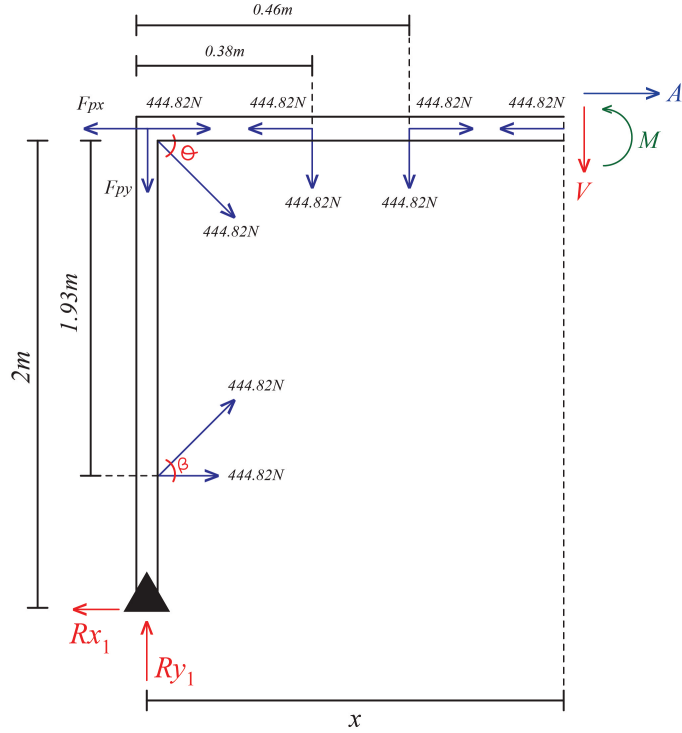


Figura 25: Sección BC

5.5.4. Sección CD :

Los valores de distancia, varían entre $0.07 \leq x \leq 2m$.

Sumatoria de fuerzas eje horizontal

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 v - 444.82N - R_{x2} &= 0 \\
 v &= -184.52 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Sumatoria de fuerzas eje vertical

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 A + R_{y2} + 444.82N - 444.82N &= 0 \\
 A &= 31.71 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{21}$$

Sumatoria de momentos:

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M &= 0 \\
 M + 444.82N \cdot (x - 0.07m) + R_{x2} \cdot x &= 0 \\
 M &= 184.52 \text{ N} \cdot x + 31.14 \text{ Nm}
 \end{aligned} \tag{22}$$

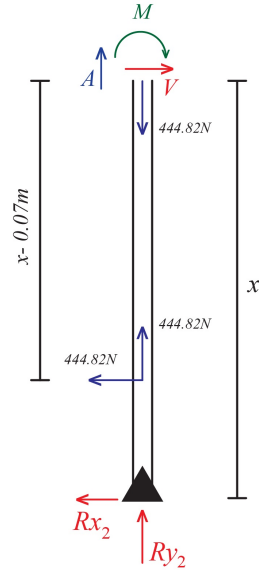


Figura 26: Sección CD

5.5.5. Sección R_2D :

Los valores de distancia varían entre $0 \leq x \leq 0.07m$.

Sumatoria de fuerzas eje horizontal

$$\begin{aligned}
 + \rightarrow \sum F_x &= 0 \\
 v - R_{x2} &= 0 \\
 v &= -629.34 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Sumatoria de fuerzas eje vertical

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F_y &= 0 \\
 A + R_{y2} &= 0 \\
 A &= 31.71 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Sumatoria de momentos:

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \sum M &= 0 \\
 R_{x2} \cdot x + M &= 0 \\
 M &= 629.34 \text{ N} \cdot x
 \end{aligned} \tag{25}$$

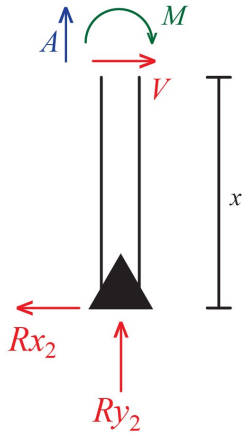


Figura 27: Sección R_2D

5.6. Diagrama momento flector, fuerza cortante y fuerza axial

5.6.1. Diagrama fuerza axial:

La fuerza axial es aquella que actúa en dirección longitudinal, estas fuerzas pueden ser de tensión o compresión.

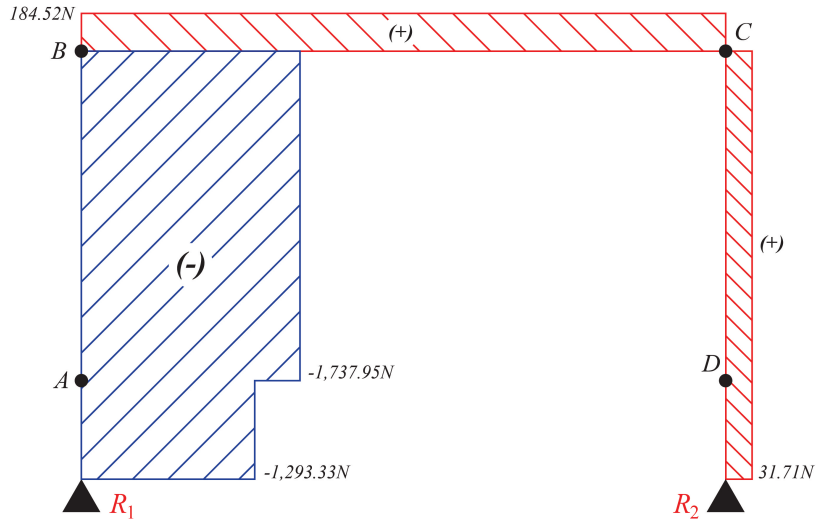


Figura 28: Diagrama fuerza axial

5.6.2. Diagrama fuerza cortante:

Las fuerzas internas del sistema son denominadas como fuerza cortante, su resultante debe ser igual a la carga aplicada.

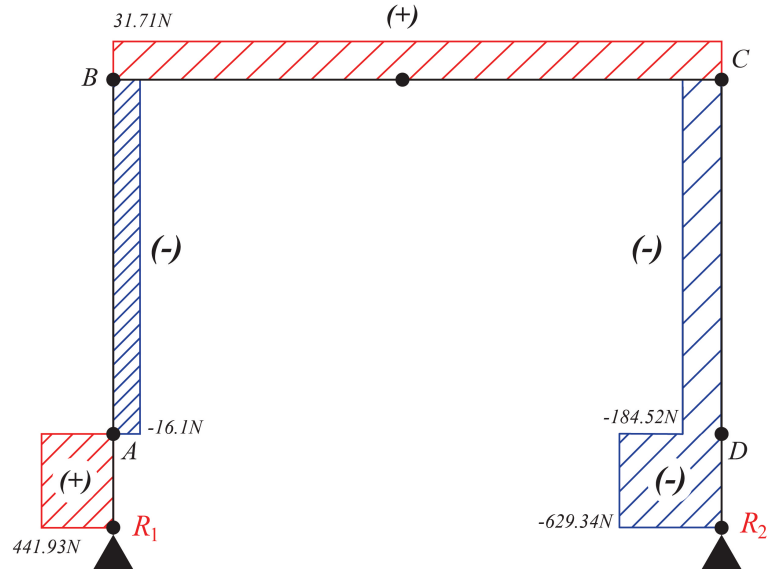


Figura 29: Diagrama fuerza cortante

5.6.3. Diagrama momento flector:

El momento flector, es una fuerza resultante que proviene de fuerzas sobre una sección transversal.

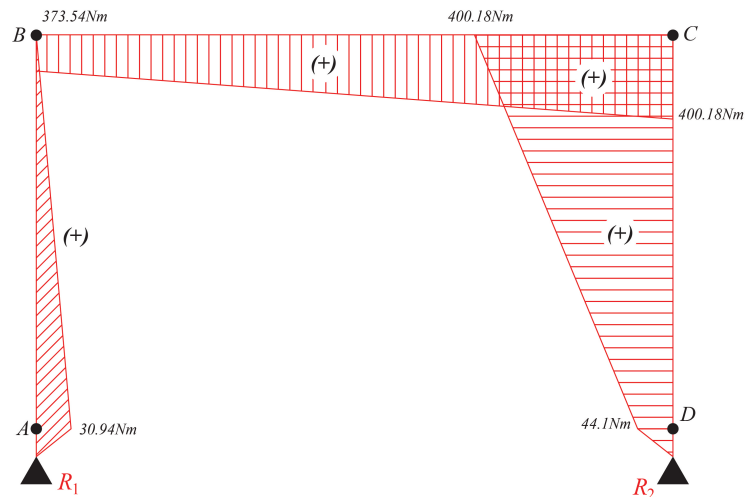


Figura 30: Diagrama momento flector

5.7. Esfuerzos

Los cálculos de esfuerzo, determinan si las propiedades del bambú son aptas para la construcción del proyecto. Los valores obtenidos en la sección anterior, proveen la información suficiente para el cálculo de esfuerzos. Se tomó el valor crítico de cada diagrama de fuerza para el cálculo.

Rosales (2018) investigó las propiedades mecánicas del bambú tipo Asper en Guatemala, estos valores se presentaron en la sección 4.9 página 15.

Los valores críticos en los diagramas de momento flector, fuerza cortante, y fuerza axial se tomaron para calcular su esfuerzo y factor de seguridad.

5.7.1. Esfuerzo de flexión:

La distancia desde el eje neutro es 0.035m, esto debido al diámetro del bambú de 0.07m.

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \frac{M \cdot c}{I} \\ \sigma_f &= \frac{400.18Nm(0.035m)}{0.00000054m^4} \\ \sigma_f &= 25.94MPa\end{aligned}\tag{26}$$

M = Momento flector máximo

c = Distancia desde el eje neutro

I = Inercia

Inercia de un anillo:

$$\begin{aligned}I &= \frac{\pi}{64} \cdot (D_{ext}^4 - D_{int}^4) \\ I &= \frac{\pi}{64} \cdot ((0.07m^4) - (0.06m^4)) \\ I &= 0.00000054m^4\end{aligned}\tag{27}$$

I = Inercia

D_{ext} = Diámetro exterior

D_{int} = Diámetro interior

Factor de seguridad a la flexión:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{232\text{MPa}}{\sigma_f} \\ \eta &= 8.94\end{aligned}\tag{28}$$

La sección CD , donde se encuentra el momento flector máximo, no falla.

5.7.2. Esfuerzo cortante:

El diámetro externo del bambú es 0.07m y el diámetro interno es de 0.06m. Estos valores se utilizan para determinar el área transversal.

$$\begin{aligned}A &= \pi((r_{ext})^2 - (r_{int})^2) \\ A &= \pi((0.035^2m) - (0.03^2m)) \\ A &= 0.001m^2\end{aligned}\tag{29}$$

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{2 \cdot V}{A} \\ \tau &= \frac{2(629.34N)}{0.001m^2} \\ \tau &= 1.26\text{MPa}\end{aligned}\tag{30}$$

V = Fuerza cortante máxima

A = Área transversal

Factor de seguridad al corte:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{8.97\text{MPa}}{\tau} \\ \eta &= 7.11\end{aligned}\tag{31}$$

La sección R_1A , donde se encuentra la fuerza cortante mixima, no falla.

5.7.3. Esfuerzo a compresión:

$$\begin{aligned}\sigma_c &= \frac{F}{A} \\ \sigma_c &= \frac{1,737.93N}{0.001m^2} \\ \sigma_c &= 1.74MPa\end{aligned}\tag{32}$$

F = Fuerza

A = Área transversal

Factor de seguridad a compresión:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{11.06MPa}{\sigma_C} \\ \eta &= 6.36\end{aligned}\tag{33}$$

La sección *AB*, donde se encuentra la fuerza axial máxima, no falla.

Para los cálculos teóricos se asumió que la estructura que soporta la carga de 200 lb está compuesta por tres culmos de bambú. Por lo que el área transversal utilizada para el cálculo de los esfuerzos es de un culmo. Esta decisión de diseño se realizó para obtener el escenario más crítico posible.

5.8. Análisis sujetador

Los pernos ubicados verticalmente, en la parte superior de la máquina, soportan 200lb de carga externa, esta unión es a tensión. Debido a que son dos pernos, la carga P se divide dentro de dos, así obteniendo una carga externa de 100lb. Especificación de sujetador seleccionado: 3/8 - 16 UNC SAE grado 5.

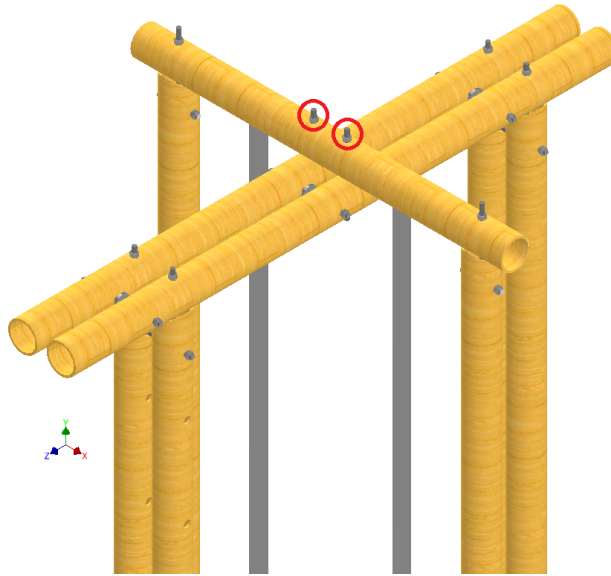


Figura 31: Ubicación sujetadores vista ortogonal
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

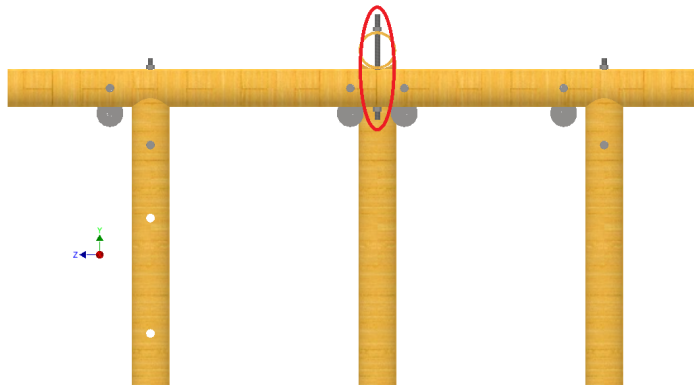


Figura 32: Ubicación sujetadores vista derecha
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

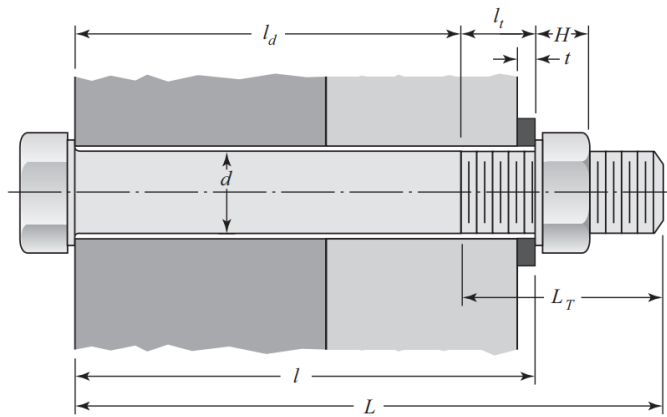


Figura 33: Imagen de referencia para determinar la rigidez del sujetador
Fuente: (Shigley., 2012)

5.8.1. Rigidez del sujetador

Longitud de agarre:

$$l = 5.2in \quad (34)$$

Longitud del sujetador:

$$\begin{aligned} L &> l + H \\ L &= 6in \end{aligned} \quad (35)$$

$$H \text{ (altura de la rosca hexagonal)} = 0.3281in$$

Longitud de la rosca:

$$\begin{aligned} L_T &= 2d + \frac{1}{4}in \\ L_T &= 1in \end{aligned} \quad (36)$$

$$d \text{ (diámetro mayor nominal)} = 0.375in$$

Longitud de la parte sin rosca en el agarre:

$$\begin{aligned}l_d &= L - L_T \\l_d &= 5in\end{aligned}\tag{37}$$

subsubsectionLongitud de la parte roscada en el agarre:

$$\begin{aligned}L_t &= l - l_d \\L_t &= 0.2in\end{aligned}\tag{38}$$

Área de la parte sin rosca:

$$\begin{aligned}A_d &= \frac{\pi \cdot d^2}{4} \\A_d &= 0.4418in^2\end{aligned}\tag{39}$$

Área de la parte roscada:

$$A_t = 0.0775in\tag{40}$$

Rijidez del sujetador:

$$\begin{aligned}K_b &= \frac{A_d \cdot A_t \cdot E}{(A_d \cdot l_t) + (A_t \cdot l_d)} \\K_b &= 2.16 \cdot 10^6 \frac{lb_f}{in^2}\end{aligned}\tag{41}$$

5.8.2. Rijidez del elemento:

$$\begin{aligned}K_m &= \frac{0.5774 \cdot \pi \cdot E \cdot d}{(2 \cdot \ln(5 \cdot \frac{0.5774l+0.5d}{0.5774l+2.5d}))} \\K_m &= 0.3415 \cdot 10^6 \frac{lb_f}{in^2}\end{aligned}\tag{42}$$

El valor de rigidez del sujetador y rigidez del elemento, demuestran que la mayor parte de la carga la recibe el sujetador.

5.8.3. Uniones a tensión con carga externa

Rijidez de la unión:

$$\begin{aligned}c &= \frac{K_b}{K_b + K_m} \\c &= 0.8635\end{aligned}\tag{43}$$

Carga recibida por el sujetador:

$$\begin{aligned}P_b &= CP \\P_b &= 0.08635klb\end{aligned}\tag{44}$$

Carga recibida por el elemento:

$$\begin{aligned}P_m &= P \cdot (1 - C) \\P_m &= 0.01365klb\end{aligned}\tag{45}$$

Carga resultante en pernos y elementos:

$$\begin{aligned}F_b &= P_b + F_i = 5.03klb \\F_m &= P_m - F_i = -4.93klb\end{aligned}\tag{46}$$

El valor negativo de F_m indica que el perno no se aflojará.

5.8.4. Relación del par de torsión del perno con la tensión del perno

$$\begin{aligned}T &= k \cdot F_i \cdot d \\T &= 0.37klb \cdot in \cong 42.4N \cdot m\end{aligned}\tag{47}$$

El factor k de la relación del par torsor, establece su valor dependiendo de la condición del sujetador. En este caso, la condición del perno es galvanizado, por ende, su factor k es 0.2 (Shigley., 2012).

Pre-carga

$$F_i = 0.75 \cdot F_p \quad (48)$$

F_p es la carga de prueba. El valor de 0.75, se utiliza para conexiones no permanentes o sujetadores reutilizados (Shigley., 2012)

Carga de prueba

$$\begin{aligned} F_p &= A_t \cdot S_p \\ F_p &= 6.5875klb \end{aligned} \quad (49)$$

De esta forma, se obtiene la precarga:

$$F_i = 4.94klb$$

S_p es la resistencia de prueba.

5.8.5. Esfuerzo de tensión en el perno:

$$\begin{aligned} \sigma_b &= \frac{F_b}{A_t} \\ \sigma_b &= 64.9klb \end{aligned} \quad (50)$$

Factor de seguridad contra la fluencia:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{S_p}{\sigma_b} \\ \eta &= 1.31 \end{aligned} \quad (51)$$

El sujetador no falla por fluencia

5.9. Pernos cargados en cortante

Los pernos ubicados horizontalmente, sostienen las poleas en el elemento BC, soportan 200lb en cortante. Debido a que son dos pernos, la carga cortante se divide entre estos, así obteniendo una carga cortante de 100lb.

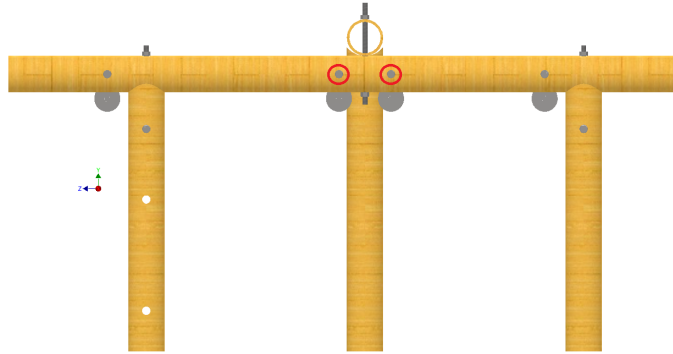


Figura 34: Ubicación sujetadores a cortante vista derecha
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

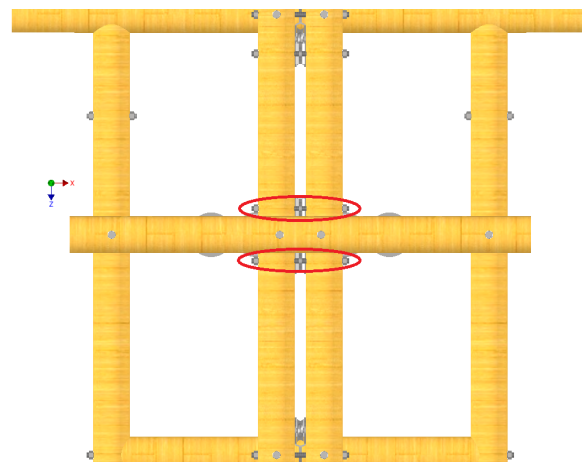


Figura 35: Ubicación sujetadores a cortante vista superior
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

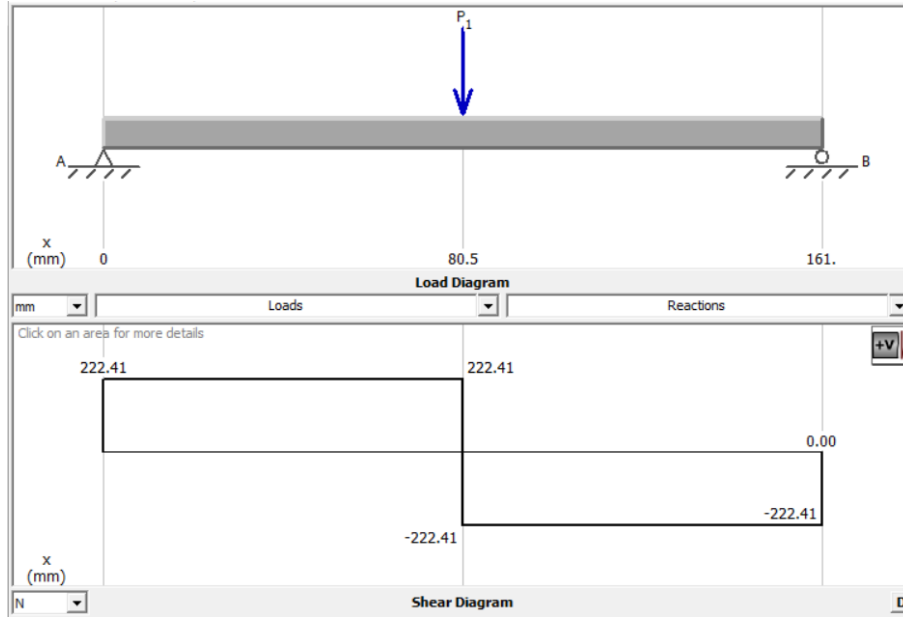


Figura 36: Fuerza cortante en el perno
 Imagen utilizada por cortesía de MDSolids, Inc.

El valor de la fuerza P_1 , en la figura 35, es de 100lb.

5.9.1. Corte del perno

El esfuerzo cortante presenta la falla en el perno. El área transversal utilizada es del perno.

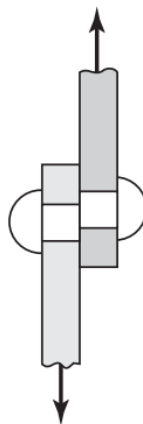


Figura 37: Corte del perno
 Fuente: (Shigley., 2012)

$$\begin{aligned}\tau_{perno} &= \frac{F}{A} \\ \tau_{perno} &= \frac{222.41N}{7.13 \cdot 10^{-5}m^2} \\ \tau_{perno} &= 3.12MPa\end{aligned}\tag{52}$$

Factor de seguridad para cortante del perno

El esfuerzo cortante se compara con el esfuerzo de fluencia del perno. $S_y = 620.5MPa$

$$\begin{aligned}\eta_{perno} &= \frac{S_y}{\tau_{perno}} \\ \eta_{perno} &= 198.9\end{aligned}\tag{53}$$

5.9.2. Aplastamiento en elemento y perno

El área para determinar el esfuerzo de compresión de aplastamiento, es el espesor de la placa más delgada y ancho igual al diámetro del perno.



Figura 38: Aplastamiento en elemento y perno
Fuente: (Shigley., 2012)

$$\begin{aligned}\sigma_{aplastamiento} &= \frac{F}{A} \\ \sigma_{aplastamiento} &= \frac{222.41N}{5 \cdot 10^{-3}m^2} \\ \sigma_{aplastamiento} &= 0.044MPa\end{aligned}\tag{54}$$

Factor de seguridad de aplastamiento para elemento

El esfuerzo de aplastamiento, se compara con el esfuerzo de compresión del elemento.

$$\begin{aligned}\eta_{elemento} &= \frac{11.06MPa}{\sigma_{aplastamiento}} \\ \eta_{elemento} &= 251\end{aligned}\tag{55}$$

Factor de seguridad de aplastamiento para sujetador

$$\begin{aligned}\eta_{perno} &= \frac{S_y}{\sigma_{aplastamiento}} \\ \eta_{perno} &= \frac{620.5Mpa}{0.044Mpa} \\ \eta_{perno} &= 14,102.3\end{aligned}\tag{56}$$

5.10. Conexiones

En la página 17, sección 4.11, se mostraron conexiones comúnmente utilizadas para bambú. Las conexiones pernadas fueron las seleccionadas para conectar el culmo y crear la estrucutra.

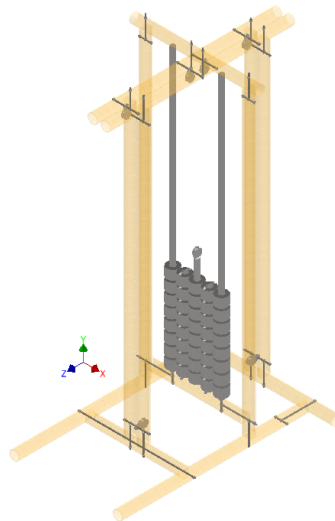


Figura 39: Conexiones pernadas, vista ortogonal
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

La conexión es un conjunto de perno, arandela y varilla roscada. La arandela fue soldada a la varilla para que otra, sin arandela, fuera introducida por medio de esta; al aplicar la pre-carga, el culmo se conecta con el otro. Esto se visualiza en la siguiente figura.

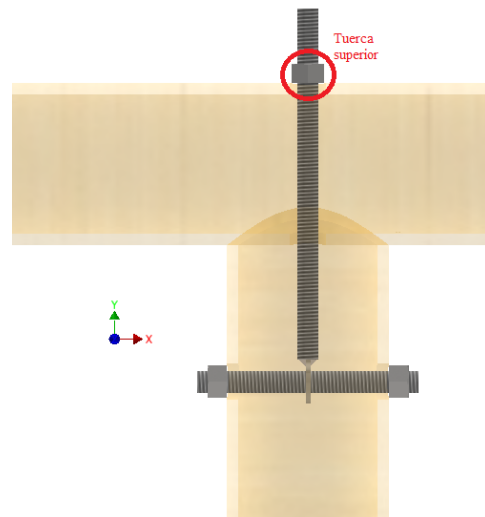


Figura 40: Conexión perno, arandela y varilla roscada
Captura de pantalla de Autodesk reimprimas por cortesía de Autodesk, Inc.

Al aplicar la precarga a este conjunto de conexión, esta generará corte en el perno. Los valores de cortante en el perno dependen de la precarga aplicada.

Se realizaron dos pruebas para determinar la precarga ideal en el bambú. Para la primera prueba, se utilizó un culmo sin nudos. Se torqueó, esperando llegar al torque ideal, pero el culmo falló a $5N \cdot m$.

En la segunda prueba, el perno se colocó a un costado del nudo. Se torqueó hasta $50N \cdot m$ y falló el perno.

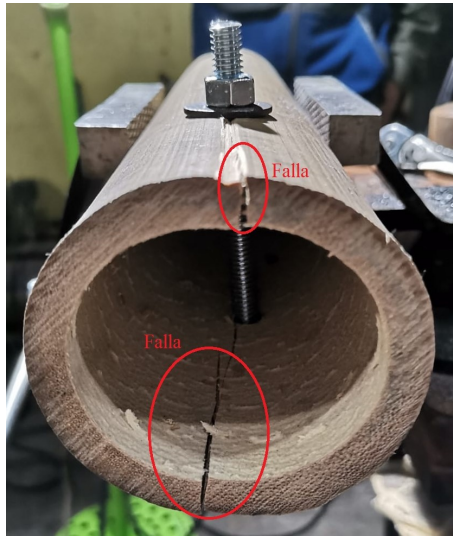


Figura 41: Culmo sin nudo, el bambú falló a $5N \cdot m$



Figura 42: Culmo con nudo, perno falló a $50N \cdot m$

5.11. Análisis de elementos finitos

Por medio del *software ANSYSTM*, se analizó la estructura de bambú de la máquina para ejercicios de fuerza. El sistema se modeló como análisis estructural estático, este determinó el comportamiento de las cargas y su impacto en el sistema. La deformación total, esfuerzo normal, esfuerzo máximo de corte, esfuerzo equivalente, factor de seguridad, etc. fueron valores obtenidos por medio del análisis. La calidad de mallado fue de 0.25, la deformación total fue de 5mm, la deformación vertical de 0.24mm, el esfuerzo equivalente fue 19.6 MPa, y el factor de seguridad de 11.87, de esta manera se concluye que la máquina no falla.

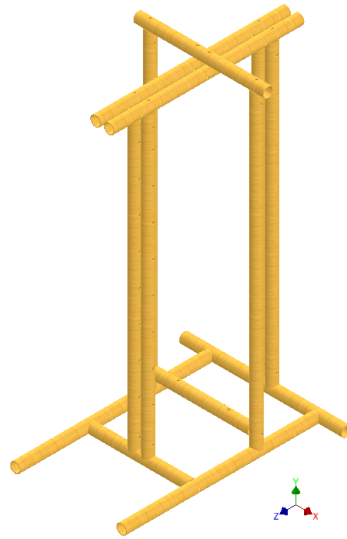


Figura 43: Estructura de bambú para análisis de elementos finitos
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

ANSYSTM solicita información del material a utilizar en la máquina para poder modelarlo. Estos valores fueron obtenidos por (Rosales, 2018)

Propiedad	Valor
Módulo de Young	9,346.85 MPa
Límite elástico	232 MPa
Relación de Poisson	0.34

Cuadro 3: Propiedades del material para análisis de elementos finitos

La máquina fue modificada para poder ser analizada en *ANSYSTM*. Se retiró las varillas, poleas, tuercas, etc. Debido a que las fuerzas que afectan al sistema son puntuales, fue necesario utilizar la opción *FaceSplit* para cortar el área transversal de varios culmos y colocar las fuerzas en dicho corte.

La base del sistema se modeló como soporte fijo, debido a que la estructura no debe moverse por ningún motivo.

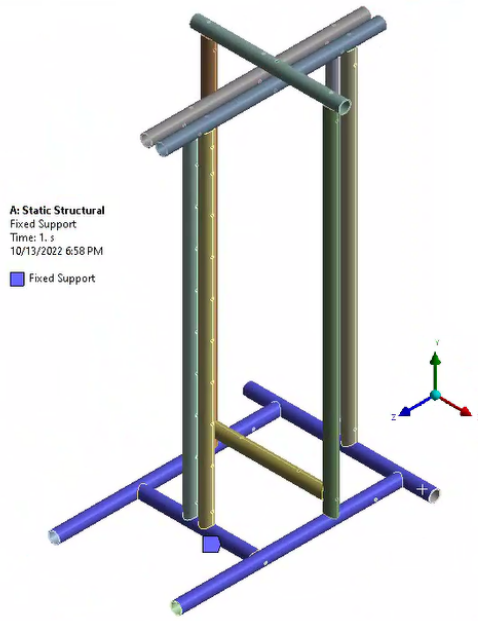


Figura 44: Sportes fijos
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

El mallado obtenido fue 0.25, para medir esta calidad se utilizó la opción *Skewness*. El valor perfecto para el mallado es cero, el valor obtenido se acerca a este valor, por lo que es un mallado de alta calidad.

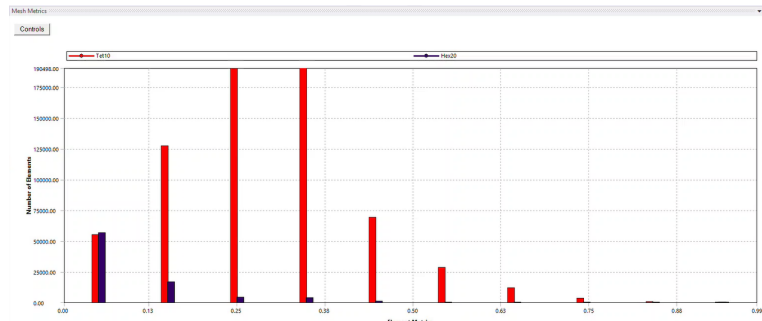


Figura 45: Gráfica mallado
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

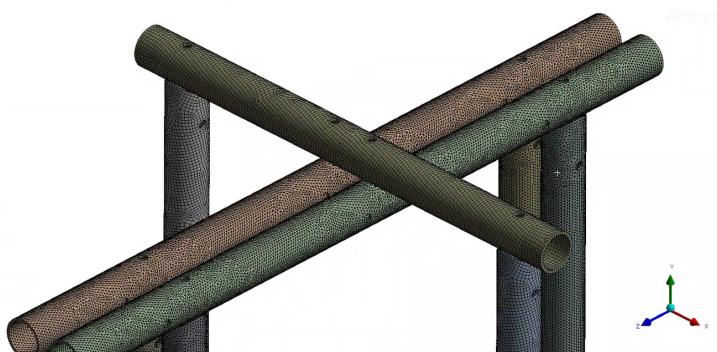


Figura 46: Vista de mallado
Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

Reacciones	Newton
R_{y1}	1,293.33 ↑
R_{y2}	-31.71 ↓
B_x	260.3 ←
B_y	-921.35 ↓
R_{x1}	441.93 ←
C_x	260.3 ←
C_y	444.82 ↑
R_{x2}	-629.34 →

Cuadro 4: Resultados análisis armazón

El Cuadro 4 contiene los resultados del análisis armazón de la sección 5.4 página 26. Se obtuvo la fuerza en newtons, y su dirección representada por una flecha. La reacción R_{y1} es crítica, esto debido a que soporta la carga de 1,293.33 N a compresión.

Sección R_1A	
$0 \leq x \leq 0.07m$	
Fuerza cortante	441.93N
Fuerza axial	-1,293.33N
Momento flector	$441.93N \cdot x$
Sección AB	
$0.07 \leq x \leq 2m$	
Fuerza cortante	-16.1N
Fuerza axial	-1,737.95N
Momento flector	$-16.1N \cdot x + 32.06Nm$
Sección BC	
$0 \leq x \leq 0.84m$	
Fuerza cortante	31.71N
Fuerza axial	184.52N
Momento flector	$31.71N \cdot x + 373.54Nm$
Sección CD	
$0.07 \leq x \leq 2m$	
Fuerza cortante	-184.52N
Fuerza axial	31.71N
Momento flector	$184.52N \cdot x + 31.14Nm$
Sección R_2D	
$0 \leq x \leq 0.07m$	
Fuerza cortante	-629.34N
Fuerza axial	31.71N
Momento flector	$629.34N \cdot x$

Cuadro 5: Resultados para diagrama momento flector, fuerza cortante y fuerza axial

El Cuadro 5 contiene los valores de momento flector, fuerza cortante y fuerza axial del sistema tipo pórtico dependiendo la longitud de la sección analizada. Con estos valores se realizaron los diagramas mostrados en la sección 5.6 página 37.

Tipo de esfuerzo	MPa	η
Esfuerzo de flexión	25.94	8.94
Esfuerzo cortane	1.26	7.11
Esfuerzo a compresión	1.74	6.36

Cuadro 6: Resultados de esfuerzos

Los resultados de factor de seguridad, en el cuadro 6, dependiendo el tipo de esfuerzo demuestra que la máquina no falla. El cálculo y análisis se encuentra en la sección 5.7 página 39.

Variable	Valor	Dimensional
Rigidez del sujetador K_b	$2.6 \cdot 10^6$	$\frac{lb}{in^2}$
Rigidez del elemento K_m	$0.3415 \cdot 10^6$	$\frac{lb}{in^2}$
Rigidez de la unión C	0.8635	-
Carga recibida por el sujetador P_b	0.08635	klb
Carga recibida por el elemento P_m	0.01365	klb
Relación par de torción T	0.37	$klb \cdot in$
Precarga F_i	4.94	klb
Carga resultante en el perno F_b	5.03	klb
Carga resultante en el elemento F_m	- 4.93	klb
Esfuerzo de tensión en el perno σ_b	64.9	klb
Factor de seguridad contra fluencia η	1.31	-
Cortante del perno τ_{perno}	3.12	MPa
Factor de seguridad cortante del perno η_{perno}	198.9	-
Aplastamiento del perno y elemento $\sigma_{aplastamiento}$	0.044	MPa
Factor de seguridad aplastamiento del perno η_{perno}	14,102.3	-
Factor de seguridad aplastamiento del elemento $\eta_{elemento}$	251	-

Cuadro 7: Resultados sujetador

El sujetador, sometido a cargas de tensión, cortante y aplastamiento fue calculado y analizado en la sección 5.8 página 42. Este no falló y soporto las cargas.

Análisis de elementos finitos	Valor	Dimensional
Deformación total	5	mm
Deformación eje horizontal	5	mm
Deformación eje vertical	0.24	mm
Esfuerzo equivalente	19.6	MPa
Esfuerzo cortante máximo	11.29	MPa
Esfuerzo normal eje horizontal	9.45	MPa
Esfuerzo normal eje vertical	16.96	MPa
Factor de seguridad mínimo	11.87	-
Factor de seguridad máximo	15	-

Cuadro 8: Resultados de análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos en la sección 5.11 página 53, determinó que las cargas aplicadas a la estructura no son críticas y esta no falla, por lo que es viable construir la máquina.

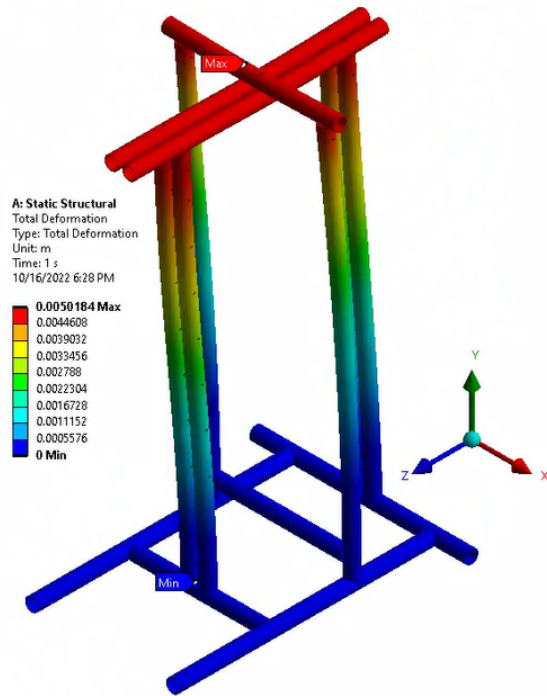


Figura 47: Deformación total
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

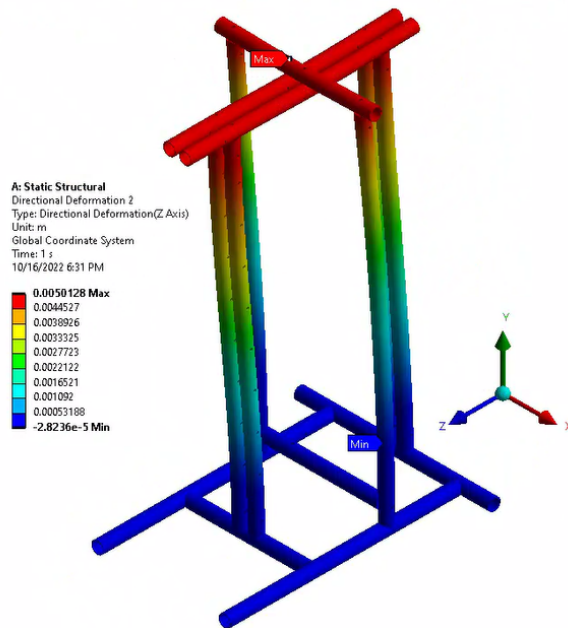


Figura 48: Deformación eje horizontal
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

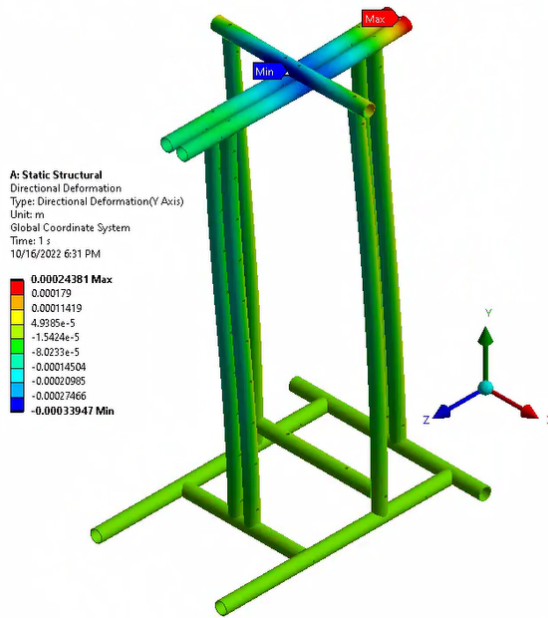


Figura 49: Deformación eje vertical
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

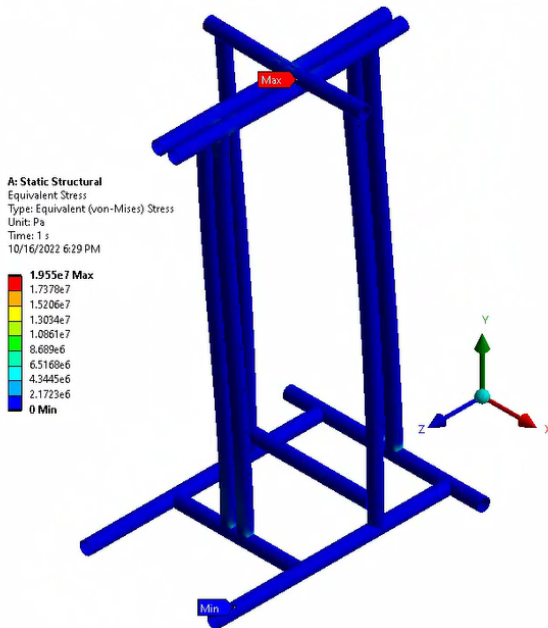


Figura 50: Esfuerzo equivalente
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

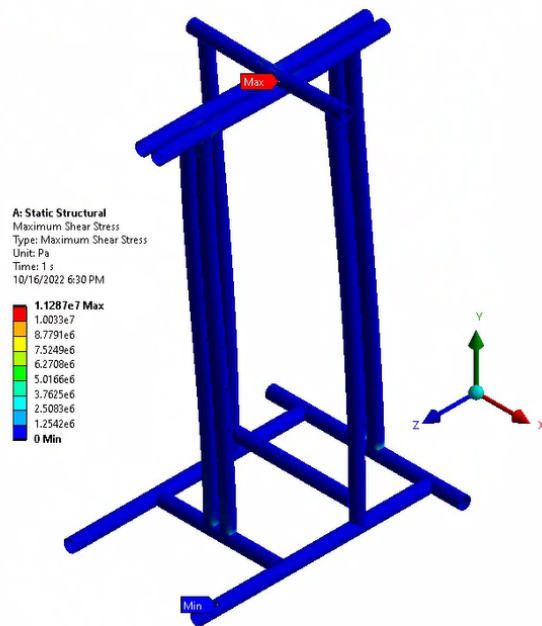


Figura 51: Esfuerzo de corte máximo
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

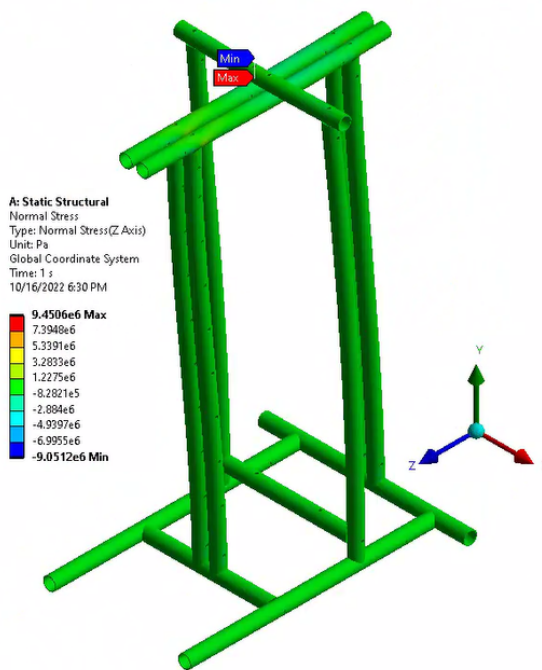


Figura 52: Esfuerzo normal eje horizontal
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

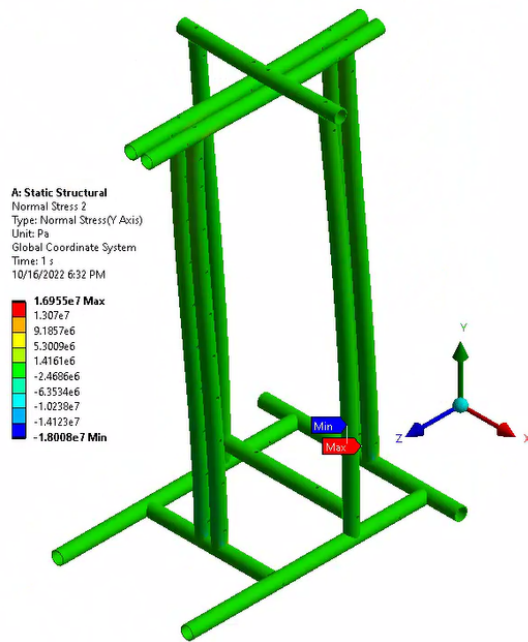


Figura 53: Esfuerzo normal eje vertical
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

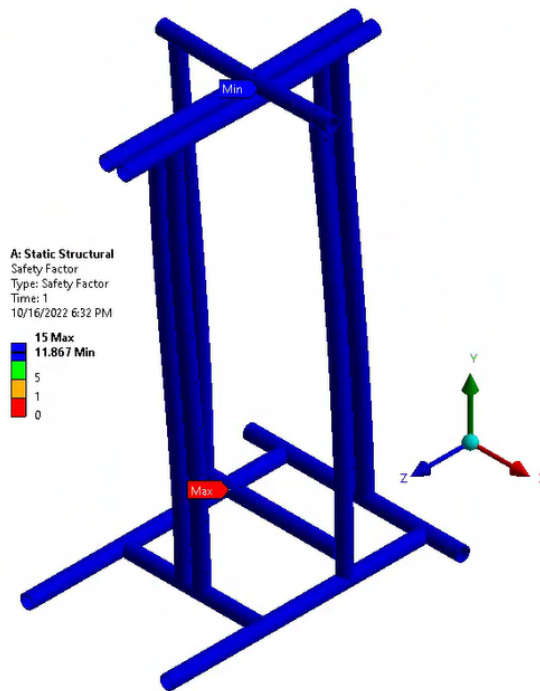


Figura 54: Factor de seguridad
 Imagen utilizada por cortesía de ANYS, Inc.

Discusión de resultados

La defromación total y la deformación en el eje horizontal del análisis de elementos finitos, obtuvieron el mismo resultado, 5mm. La máquina tiende a deformarse e inclinarse hacia la dirección del eje z. El resultado fue el esperado, debido a que el usuario tira del cable en dicha dirección, esto produce la deformación máxima. Para contrarestar la deformación e inclinación, es necesario colocar un elemento en dirección opuesta.

Debido a que la estructura soporta la carga de 200lb, fue necesario determinar el esfuerzo equivalente de von mises. Este resultado determina si la máquina falla. El esfuerzo equivalente fue 19.6 MPa, ubicado en el elemento que sufrió la deformación máxima. La ubicación del esfuerzo equivalente fue el esperado, ya que los elementos en esta ubicación son los encargados de soportar 200lb de carga.

El valor de esfuerzo cortante, está ubicado dónde se esperaba. Esto se visualiza en el diagrama de fuerza cortante, página 37 y en el análisis de elementos finitos. Ambos análisis no son críticos para el armazón.

La diferencia de resultados de esfuerzo entre el análisis teórico y el análisis de elementos finitos, se debe a las propiedades mecánicas utilizadas y las simplificaciones en el análisis teórico. El análisis teórico utiliza valores determinados por el estudio del material, sometido a diferentes tipos de esfuerzo. Por otro lado, el análisis de elementos finitos, únicamente utiliza valores como el límite elástico, módulo de young y relación de poisson para realizar la simulación. Además, los cálculos teóricos fueron realizados como si la estructura estuviera compuesta por 3 culmos de bambú, y para los esfuerzos se utilizó únicamente el área transversal de un culmo. El análisis de elementos finitos tomó toda la estructura. Por este motivo, los resultados variaron en ambos análisis.

El factor de seguridad obtenido por el análisis teórico y de elementos finitos, demuestran que la máquina no falla y es seguro utilizarla.

Las pruebas realizadas para determinar el torque aplicable al bambú, demostró que la posición correcta del perno es lo más cercano al nudo, de esta forma la precarga puede ser aplicada. Debido a los resultados, se optó por aplicar $5N \cdot m$ de torque a todas las uniones. Este valor de torque, no es crítico para el análisis de pernos cargados en cortante.

1. Se diseñó y construyó una máquina para ejercicios de fuerza con estructura de bambú y material de desecho. La máquina soportó la carga de 200 libras y los esfuerzos que esta generó. El factor de seguridad sobrepasó la unidad, esto se verificó de forma teórica y por medio del análisis de elementos finitos. La máquina no falla.
2. Las propiedades mecánicas del bambú, *Dendrocalamus asper*, fueron determinadas por la investigación de Rosales, C. quien sometió a diferentes pruebas de esfuerzo al bambú, estos datos fueron utilizados para los cálculos del diseño de la máquina.
3. Las piezas que el usuario levantará para hacer ejercicio de fuerza, son ideales en tamaño y en peso. Estos son rodos de cadena industrial, fueron exitosamente reutilizados.
4. El tipo de unión entre los culmos de bambú son rígidos y no aumentan el peso de la estructura como el concreto. La unión no es permanente, lo cual facilita el desmonte de la máquina. Este sistema de unión no genera ningún esfuerzo crítico para el bambú.
5. El análisis estructural de elementos finitos demostró que la estructura no falla, obteniendo un factor de seguridad de 11.87.
6. A partir de las pruebas de torque en las conexiones, se tomó la decisión de ubicar los pernos lo más cercano al nudo, esto no fue posible debido a la fisionomía del bambú y la posición de los nudos. Por ende, el torque aplicado para las uniones fue de $5N \cdot m$

Recomendaciones

1. Trabajar el bambú en verde es más sencillo que en seco. Cuando el bambú aún está húmedo los cortes son más limpios. Los cortes en seco lastima las fibras y en ocasiones el culmo se raja, así quedando inservible.
2. Se recomienda escoger culmos rectos. Antes de construir la máquina para ejercicios de fuerza, se seleccionó los culmos más rectos posible. Varios culmos quedaron fuera de esta selección por estar flexionados, no se utilizaron y se perdió dinero.
3. Los agujeros donde se introdució la varilla roscada, fueron un problema debido a que la broca no tenía la longitud suficiente para atravesar por completo el bambú. Se perforaba de ambos lados y los agujeros quedaron torcidos. Se recomienda tener una broca larga y mantener una posición estática, de parte del bambú y usuario, para que los agujeros sean rectos.
4. Los agujeros dependen de la ubicación de los nudos del bambú. Se deben seleccionar culmos con nudos en la misma ubicación, esto facilita la perforación de agujeros, colocación del culmo en la estructura y conexiones.
5. Colocar las conexiones cerca del nudo para asegurar el torque ideal del perno.

- Beer, F. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros: Estática*.
- Correal, J. (2016). *Bamboo design and construction*.
- Das, M. (2008). *Bamboo Taxonomy and Diversity in the Era of Molecular Markers*.
- Elejoste, A. (2021). *Morphological Analysis of Several Bamboo Species with Potential Structural Applications*. <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/13/2126/htm>
- Kaur, P. (2016). *Eco-friendly preservation of bamboo species: Traditional to modern techniques*.
- Liese, W., & Köhl, M. (2015). *Bamboo: The Plant and its Uses*.
- Mulatu, Y. (2011). *Growth, Morphology and Biomass of Arundinaria alpina (Highland Bamboo) (Poaceae) as Affected by Landrace, Environment and Silvicultural Management in the Choke Mountain, Northwestern Ethiopia*.
- Richard, M. J. (2013). *Assessing the performance of bamboo structural components*.
- Rogue. (2021). *Rogue Ct-1 Cable Tower*. <https://www.roguefitness.com/rogue-ct-1-cable-tower>
- Rosales, C. (2018). *Caracterización física y mecánica de tres especies de bambu aptas para la construcción en Guatemala*.
- Sen, A., & Kar, P. (2014). *Advancement of bamboo taxonomy in the era of molecular biology*.
- Shigley. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*.
- Strength, T. (2021). *Titanium Strength Tf12 Crossover 1 Station*. <https://www.titaniumstrength.com/titanium-strength-ts12-crossover-1-station.html>
- XMark. (2021). *Functional Trainer With Dual 200 lb Weight Stacks*. <https://www.xmarkfitness.com/functional-trainer-with-dual-200-lb-weight-stacks>.

11.1. Diseño digital y construcción final

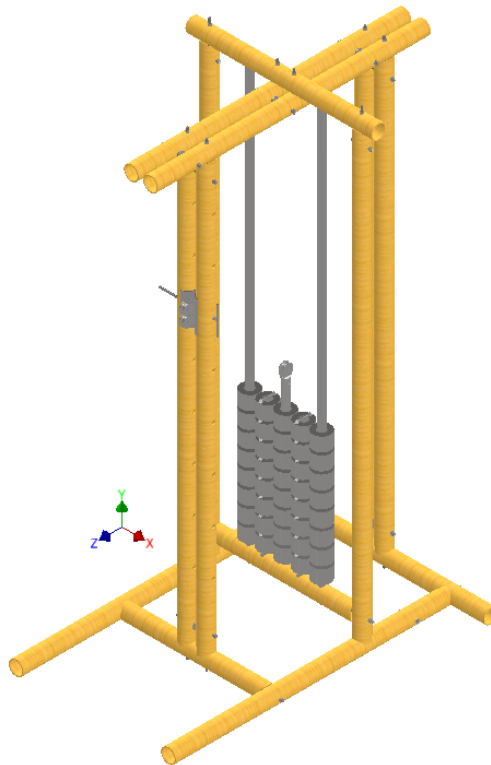


Figura 55: Máquina diseñada
Captura de pantalla de Autodesk reimpresas por cortesía de Autodesk, Inc.

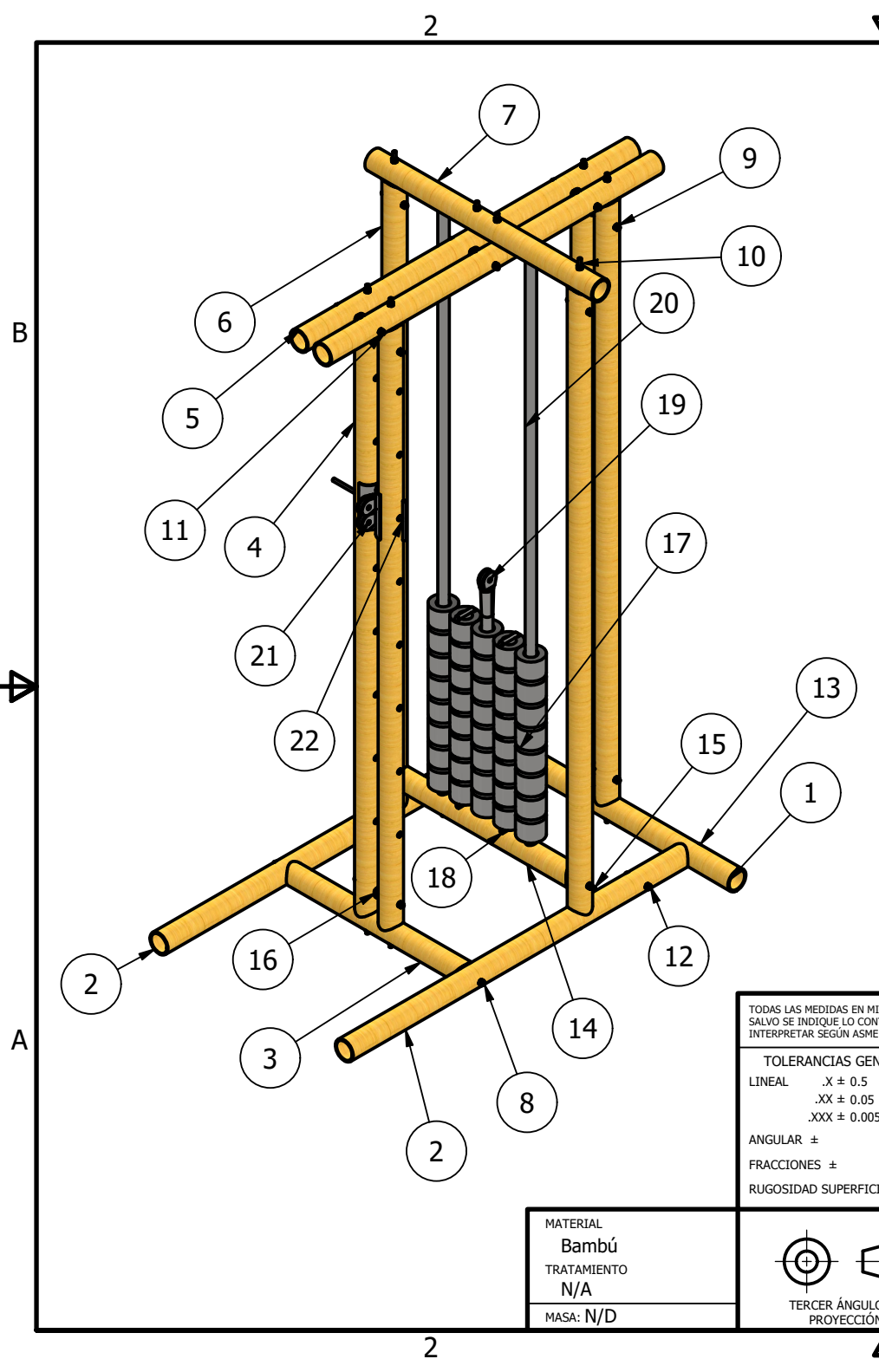


Figura 56: Máquina construída vista 1



Figura 57: Máquina construída vista 2

11.2. Planos de construcción



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Base 1
2	2	Base 3 y base 4
3	1	Base 2
4	4	Soporte vertical
5	2	Soporte superior horizontal
6	2	Soporte vertical marco II
7	1	Soporte superior horizontal marco II
8	1	Varilla para Base 2
9	46	Tuerca de tres octavos
10	12	Ensamble varilla-arandela
11	10	Varila horizontal para arandela
12	6	Varilla para unidad de bambú
13	2	Ensamble varilla-arandela para Base 1
14	1	Soporte horizontal para 200lb
15	2	Ensamble varilla para soporte de 200lb
16	6	Polea
17	8	Juego de pesas
18	4	Varilla para rodo
19	1	Eje levantador de pesas con polea
20	2	Guia para pesas
21	1	Carrito
22	1	Pasador para carrito

TODAS LAS MEDIDAS EN MILÍMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL ±
 .X ± 0.5
 .XX ± 0.05
 .XXX ± 0.005

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR	FECHA
Sergio Sánchez	24/09/2022
DISEÑADO POR	FECHA
Sergio Sánchez	05/06/2022
REVISADO POR	FECHA
Lius Castañeda	30/10/22
APROBADO POR	FECHA
Luis Castañeda	30/10/22
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
1	

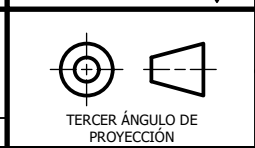
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO: Máquina para ejercicios de fuerza con estructura de bambú

NÚMERO DE DIBUJO: 1

MATERIAL
 Bambú
 TRATAMIENTO
 N/A
 MASA: N/D



TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

FORMATO
A

ESCALA: 1 / 18 UNIDADES: mm

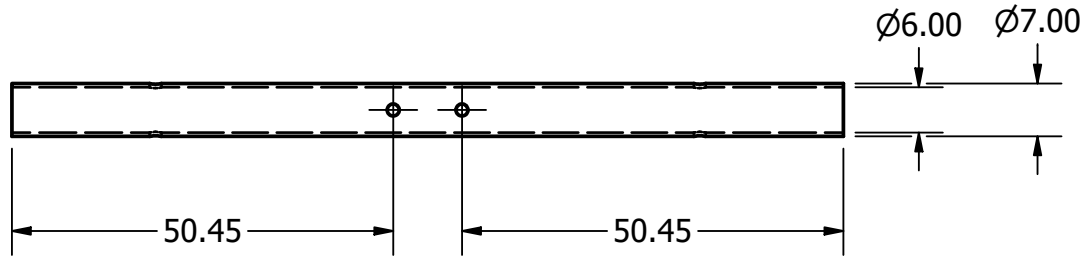
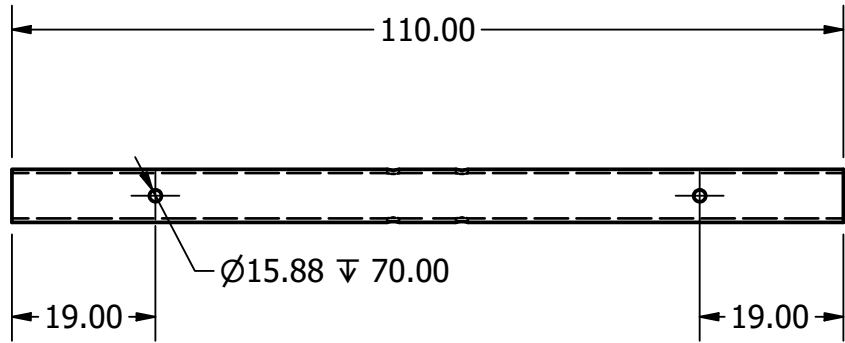
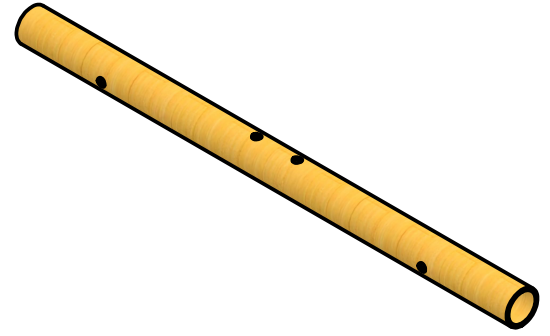
PÁGINA 1 DE 22 REV

NOTAS:

Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

4 agujeros de $\text{Ø}15.88 \nabla 70.00$



TÍTULO:		Base 1	
NÚMERO DE DIBUJO: 2			
FORMATO	ESCALA: 1:10	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 2 DE 22		REV

B

B

A

A

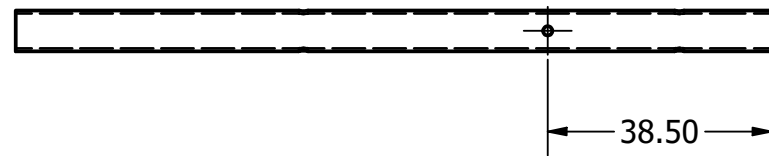
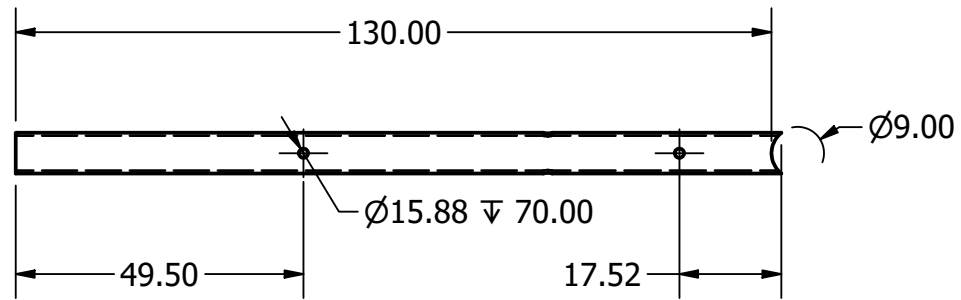
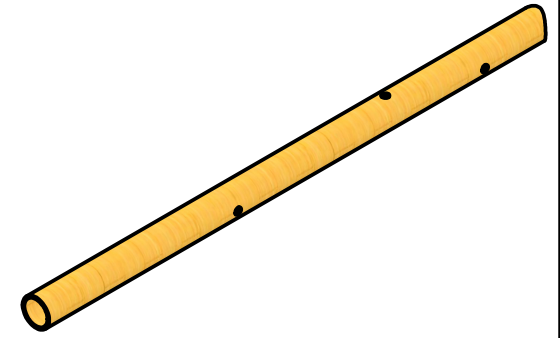
2

1

2

1

NOTAS:
Diámetro externo: 7cm
Diámetro interno: 6cm
3 agujeros de $\text{Ø}15.88 \nabla 70.00$



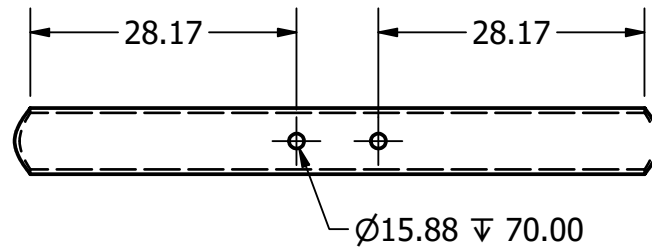
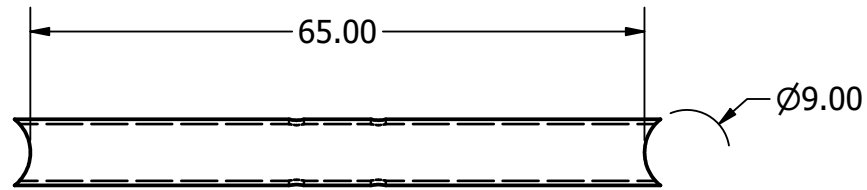
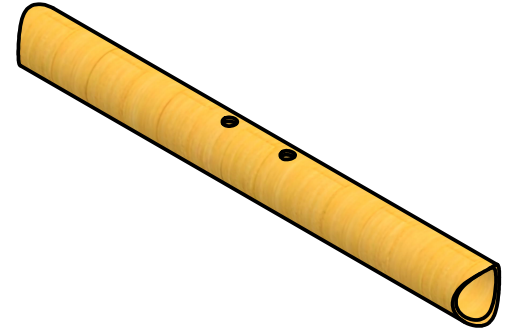
TÍTULO:		Base 3 y base 4	
NÚMERO DE DIBUJO: 3			
FORMATO	ESCALA: 1:13	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 3 DE 22		REV

NOTAS:

Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

2 agujeros de $\text{Ø}15.88 \nabla 70.00$



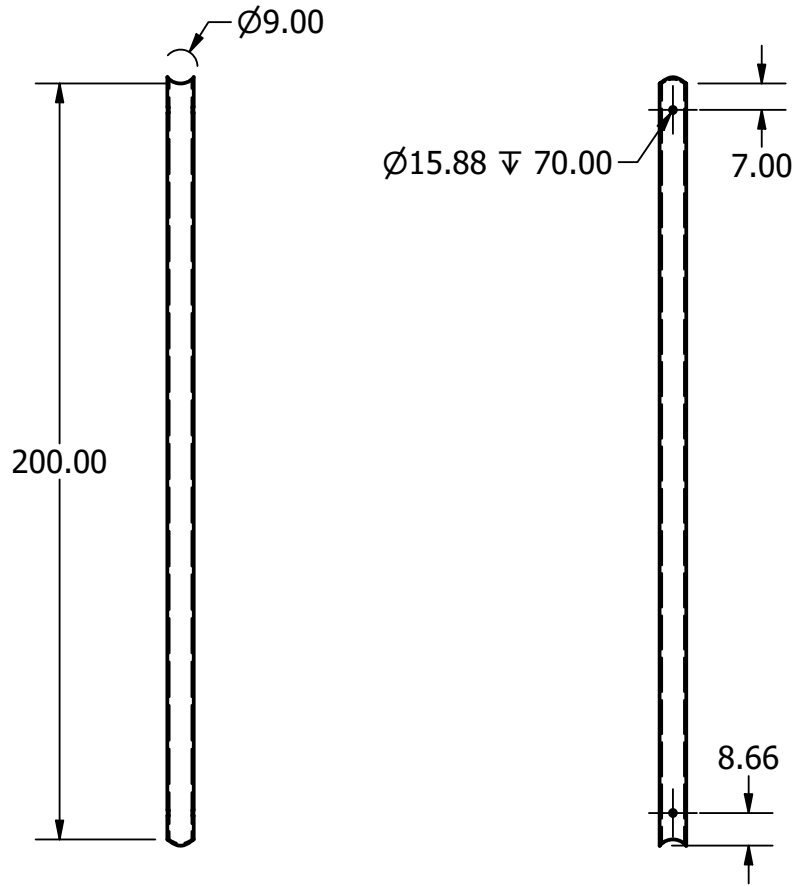
TÍTULO:		Base 2	
NÚMERO DE DIBUJO: 4			
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 4 DE 22		REV

NOTAS:

Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

2 agujeros de $\varnothing 15.88 \nabla 70.00$



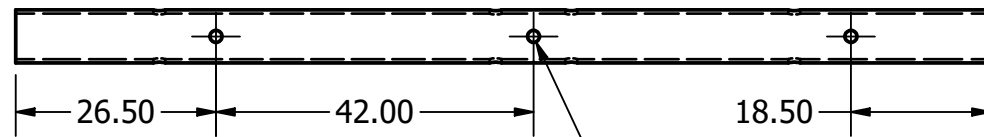
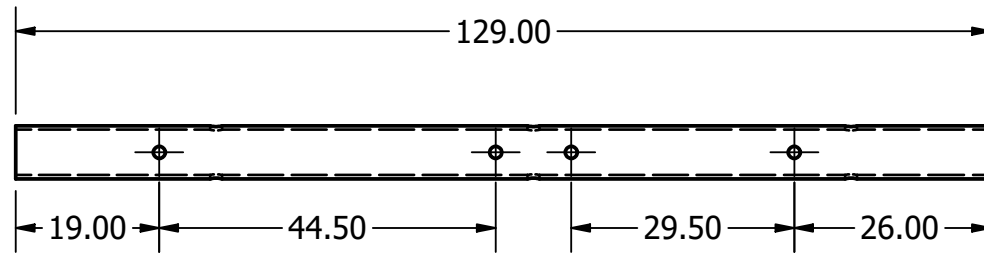
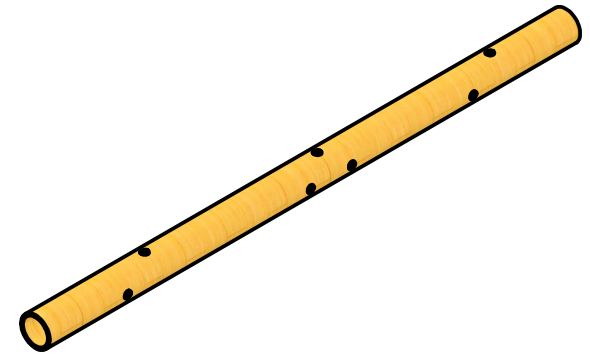
TÍTULO:		Soporte vertical	
NÚMERO DE DIBUJO: 5			
FORMATO	ESCALA: 1:20	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 5 DE 22		REV

NOTAS:

Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

7 agujeros de $\varnothing 15.88 \nabla 70.00$



$\varnothing 15.88 \nabla 70.00$

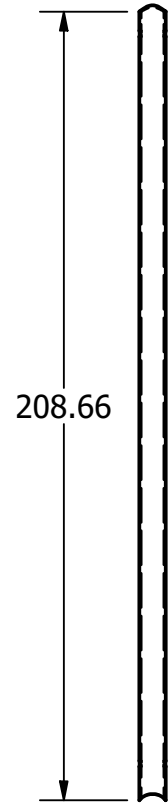
TÍTULO: Soporte superior horizontal			
NÚMERO DE DIBUJO: 6			
FORMATO	ESCALA: 1:10	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 6 DE 22		REV

NOTAS:

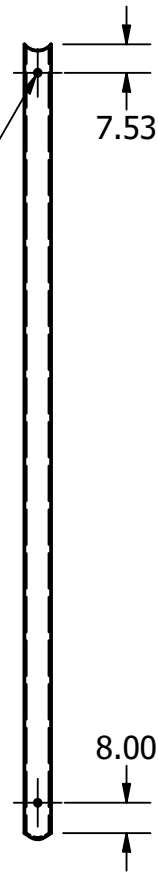
Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

2 agujeros de $\varnothing 15.88 \nabla 70.00$

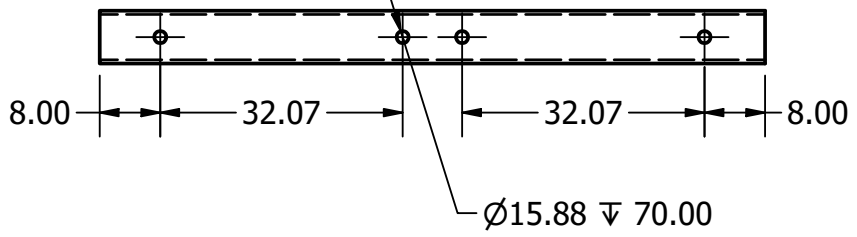
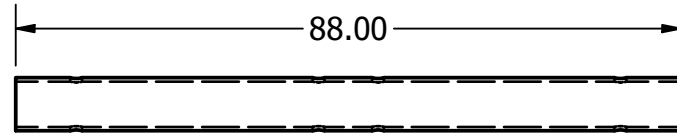
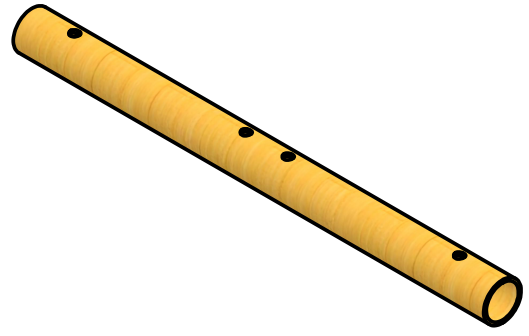


$\varnothing 15.88 \nabla 70.00$

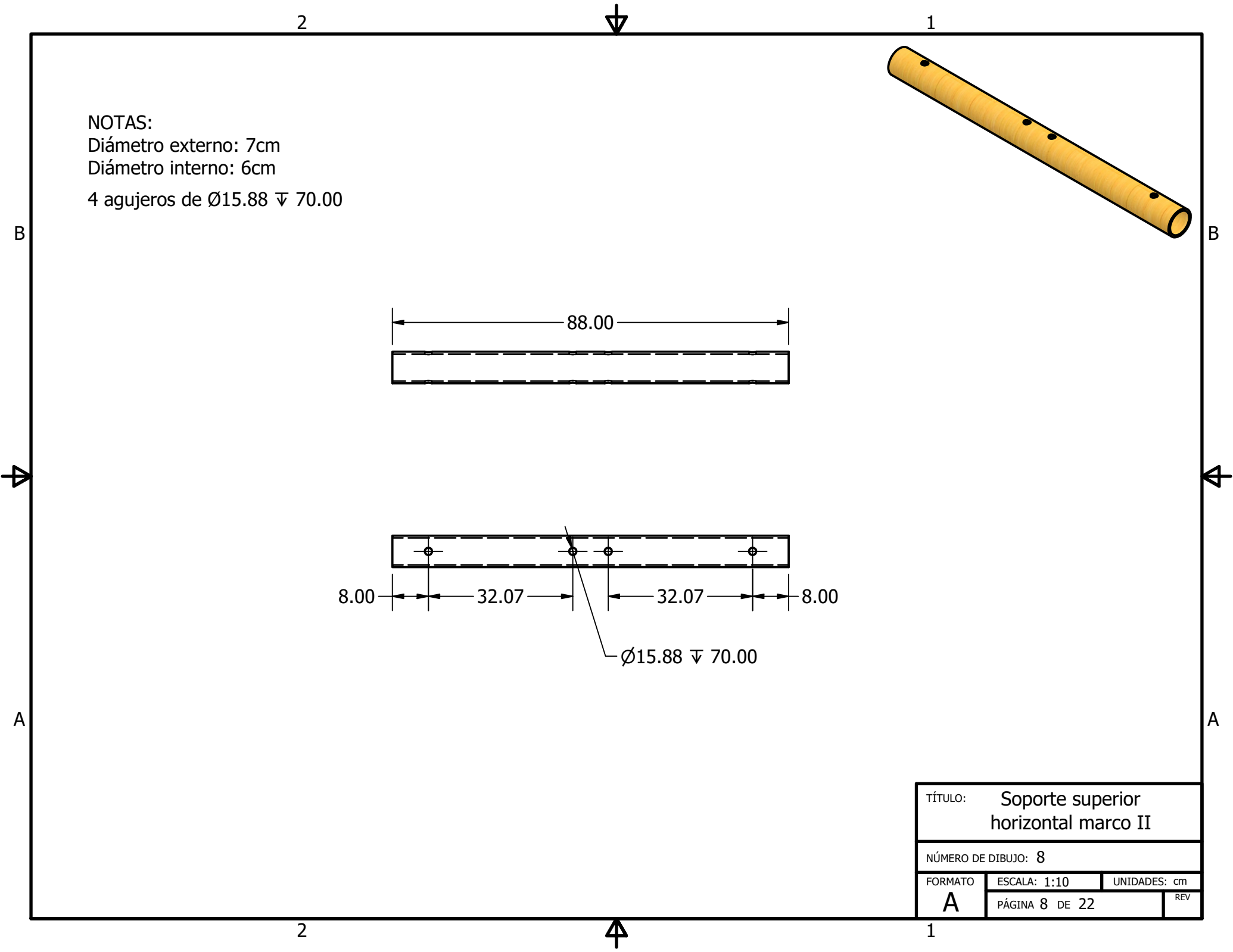


TÍTULO: Soporte vertical marco II		
NÚMERO DE DIBUJO: 7		
FORMATO	ESCALA: 1:20	UNIDADES: cm
A	PÁGINA 7 DE 22	REV

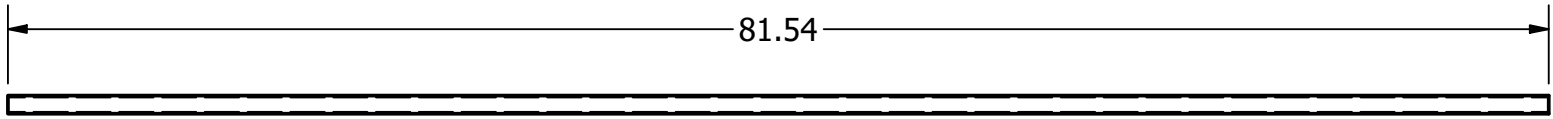
NOTAS:
 Diámetro externo: 7cm
 Diámetro interno: 6cm
 4 agujeros de $\varnothing 15.88 \nabla 70.00$



TÍTULO: Soporte superior horizontal marco II		
NÚMERO DE DIBUJO: 8		
FORMATO	ESCALA: 1:10	UNIDADES: cm
A	PÁGINA 8 DE 22	REV

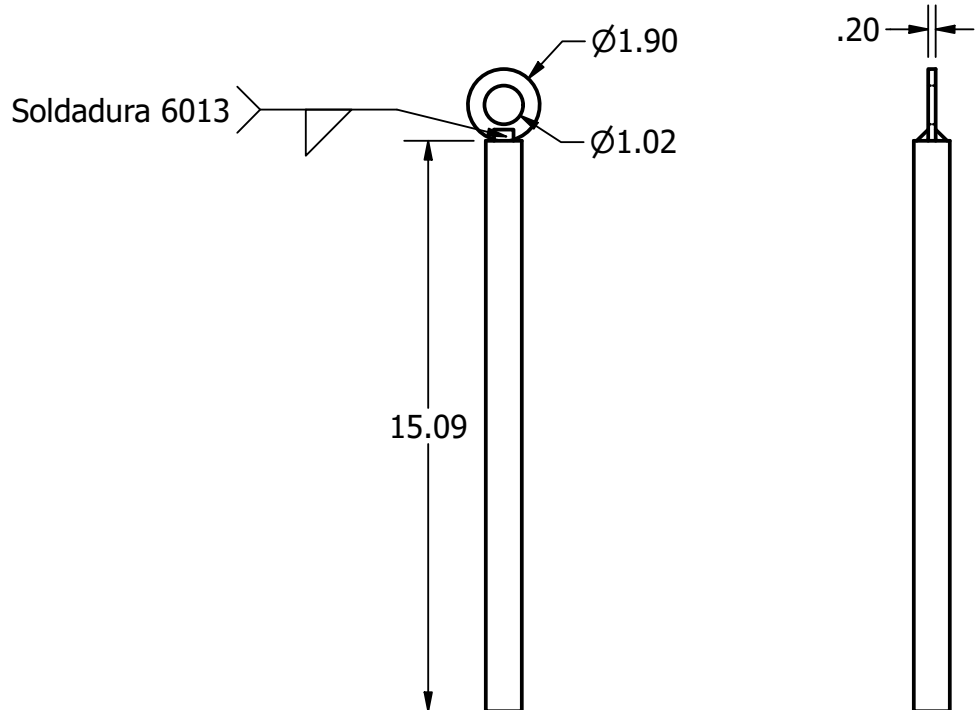


NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC



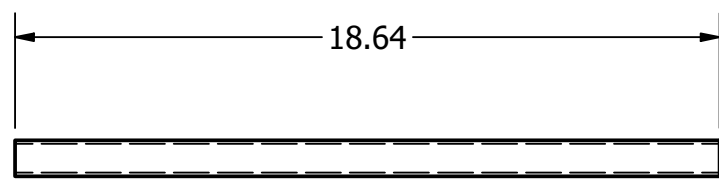
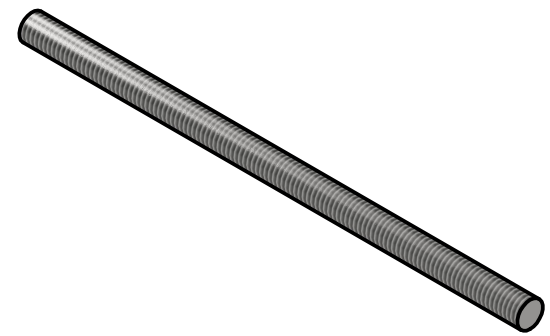
TÍTULO:		Varilla para base 2	
NÚMERO DE DIBUJO: 9			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 9 DE 22		REV

NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC
Arandela de 3/8"



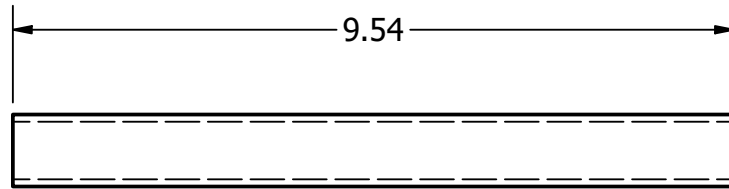
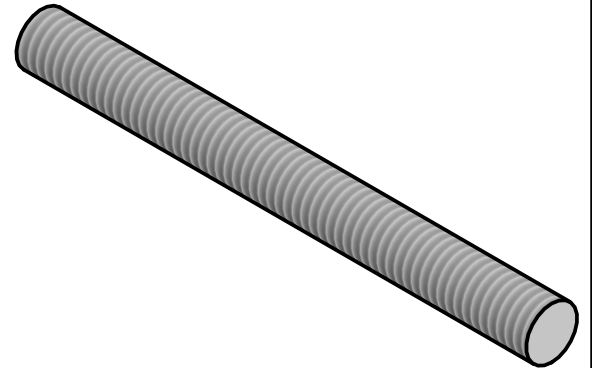
TÍTULO:		Ensamble varilla - arandela	
NÚMERO DE DIBUJO: 10			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: cm	REV
A	PÁGINA 10 DE 22		

NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC



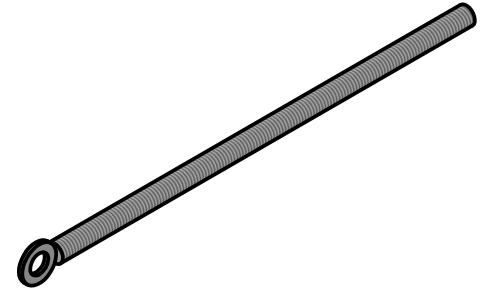
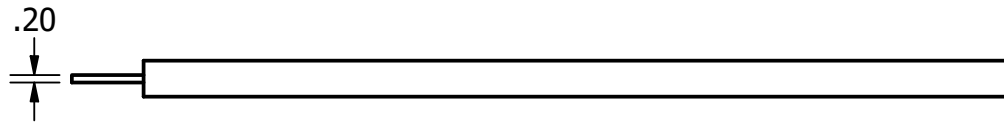
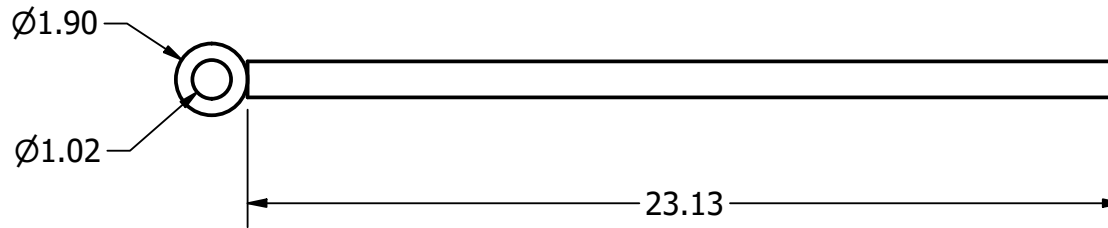
TÍTULO: Varillar horizontal para arandela		
NÚMERO DE DIBUJO: 11		
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: cm
A	PÁGINA 11 DE 22	REV

NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC



TÍTULO: Varilla para unidad de bambú		
NÚMERO DE DIBUJO: 12		
FORMATO: A	ESCALA: 1:1	UNIDADES: cm
	PÁGINA 12 DE 22	REV

NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC
Arandela de 3/8"



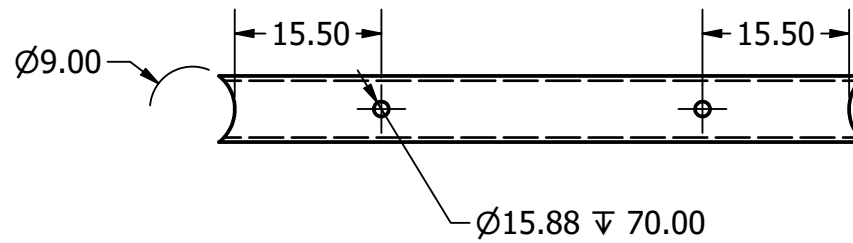
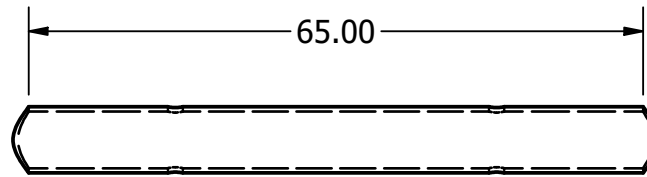
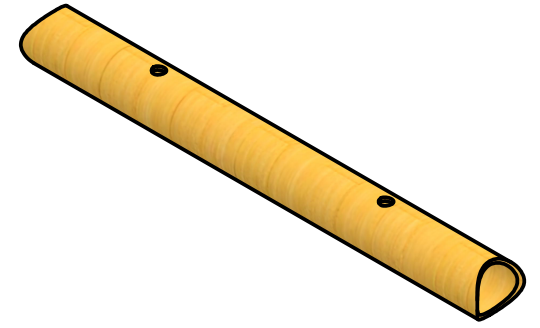
TÍTULO			
Ensamble varilla-arandela para Base 1			
NÚMERO DE DIBUJO: 13			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 13 DE 22		REV

NOTAS:

Diámetro externo: 7cm

Diámetro interno: 6cm

2 agujeros de $\text{Ø}15.88 \nabla 70.00$



TÍTULO: Soporte horizontal
para 200lb

NÚMERO DE DIBUJO: 14

FORMATO

ESCALA: 1:8

UNIDADES: cm

A

PÁGINA 14 DE 22

REV

2

1

1

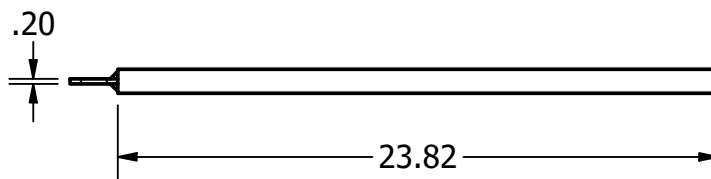
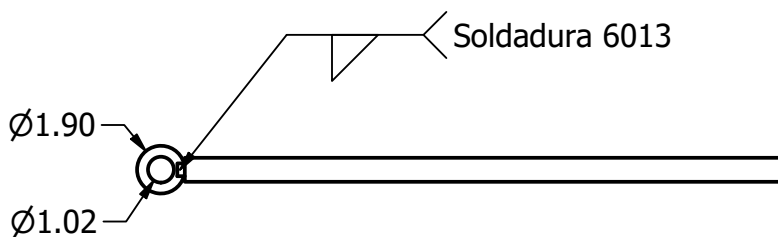
B

B

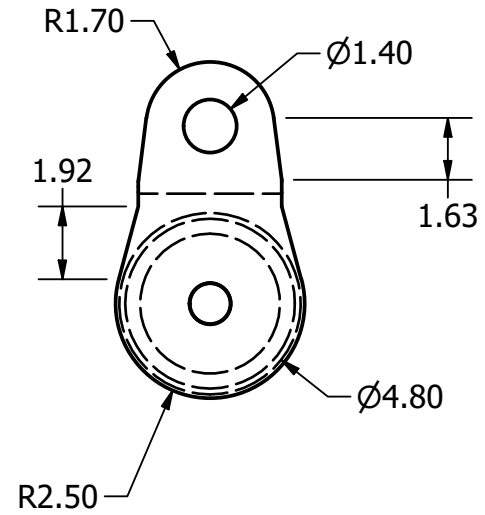
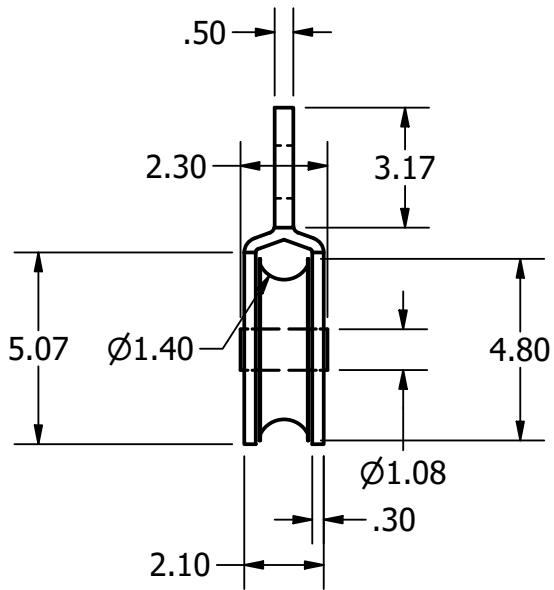
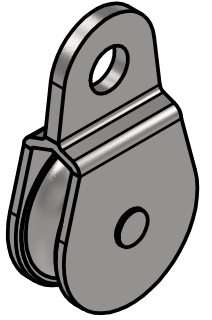
A

A

NOTAS:
Varilla roscada de 3/8" UNC
Arandela de 3/8"

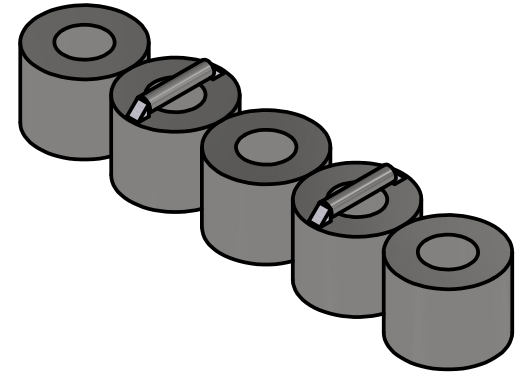
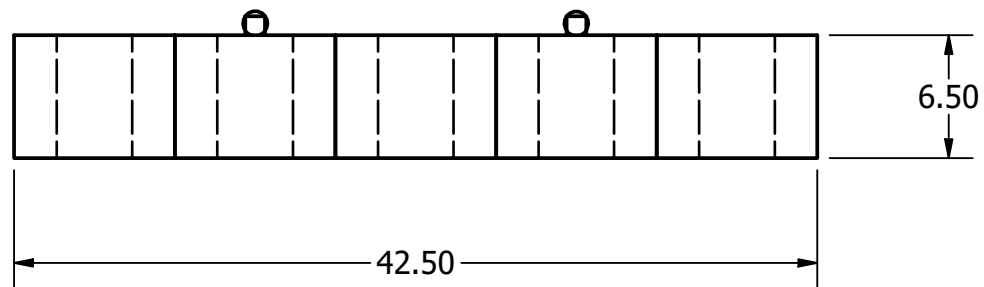
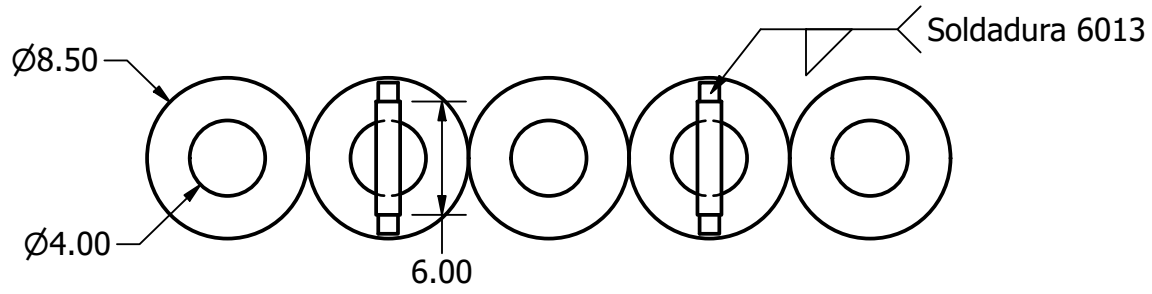


TÍTULO: Ensamble varilla para soporte de 200lb		
NÚMERO DE DIBUJO: 15		
FORMATO	ESCALA: 1:3	UNIDADES: cm
A	PÁGINA 15 DE 22	REV



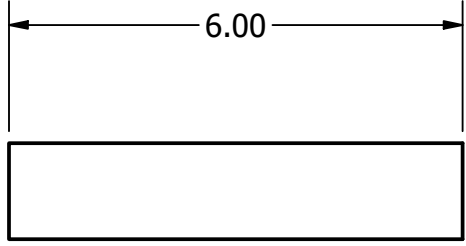
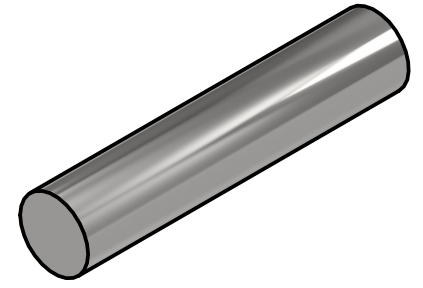
TÍTULO:		Polea	
NÚMERO DE DIBUJO: 16			
FORMATO	ESCALA: 1:2	UNIDADES: cm	REV
A	PÁGINA 16 DE 22		

NOTAS:
Varilla lisa de 1/2"

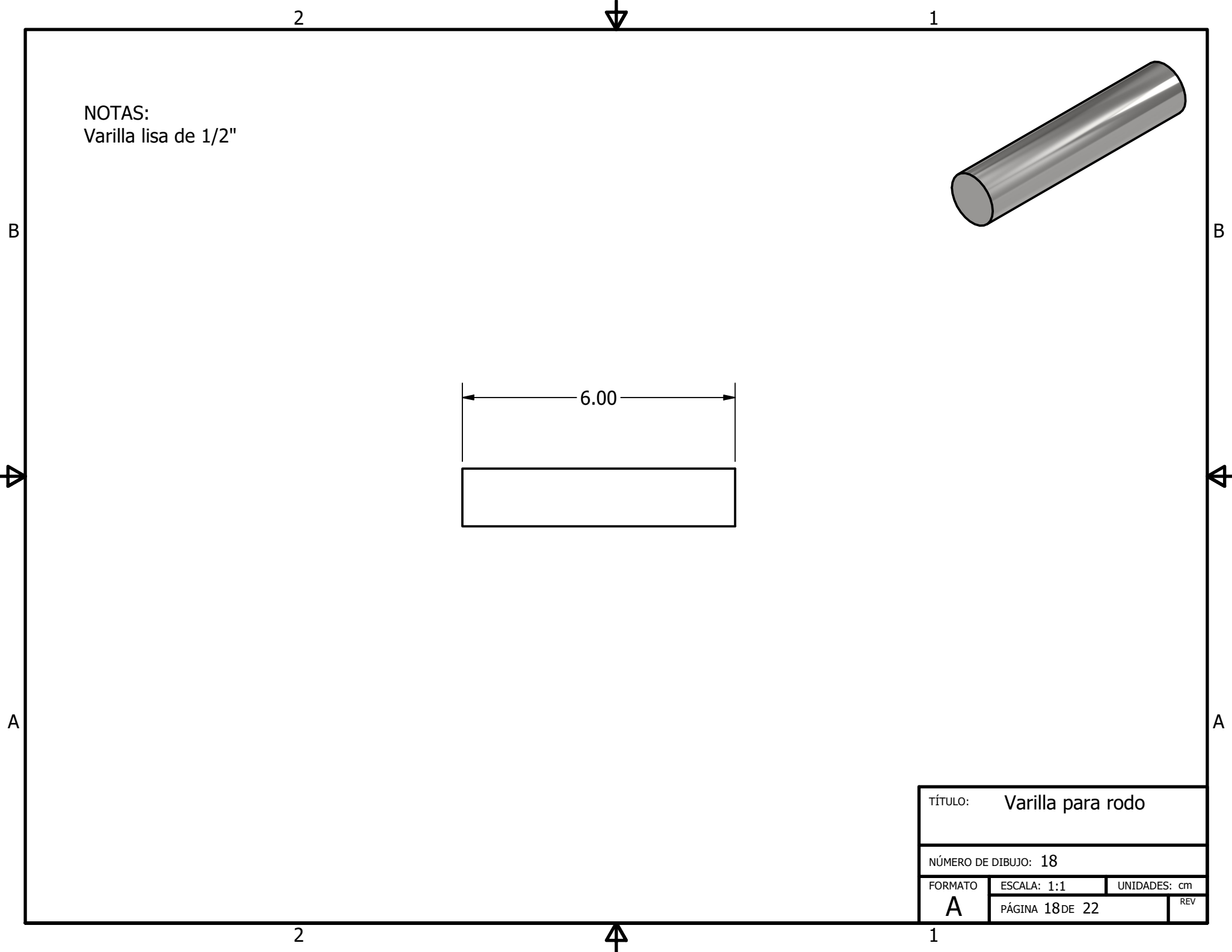


TÍTULO:		Juego de pesas	
NÚMERO DE DIBUJO: 17			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 17 DE 22		REV

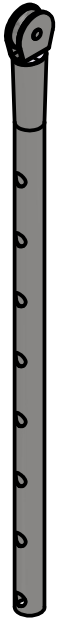
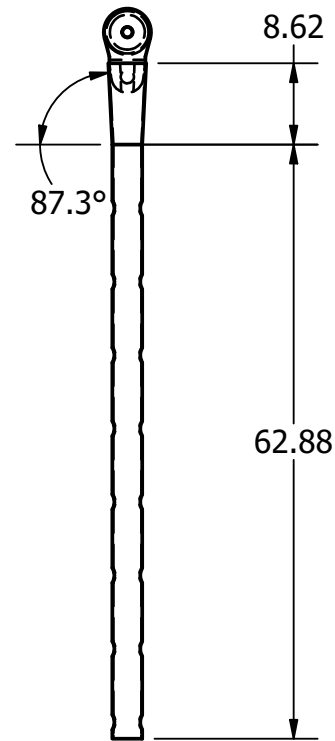
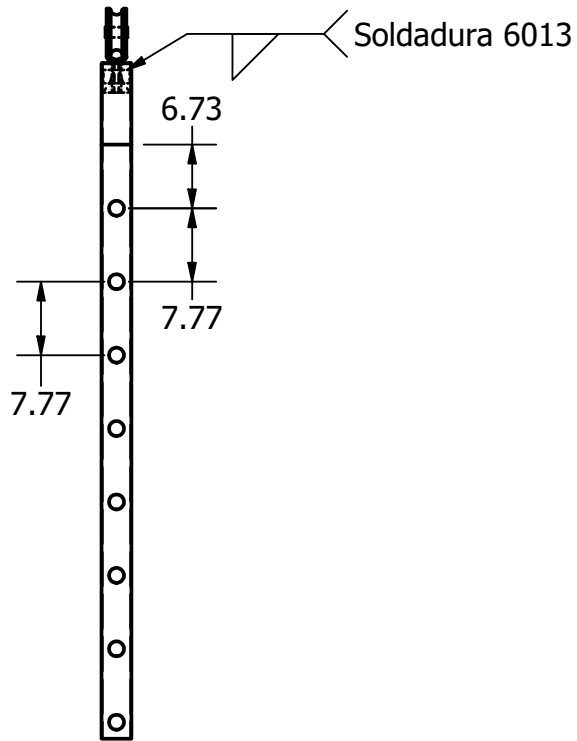
NOTAS:
Varilla lisa de 1/2"



TÍTULO: Varilla para rodo		
NÚMERO DE DIBUJO: 18		
FORMATO	ESCALA: 1:1	UNIDADES: cm
A	PÁGINA 18 DE 22	REV

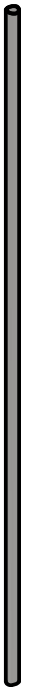
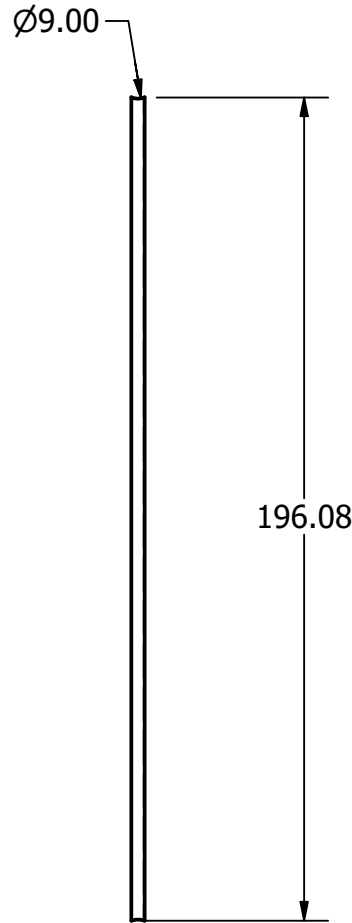


NOTAS:
Tubo de 1 1/4" espesor de 1/8"



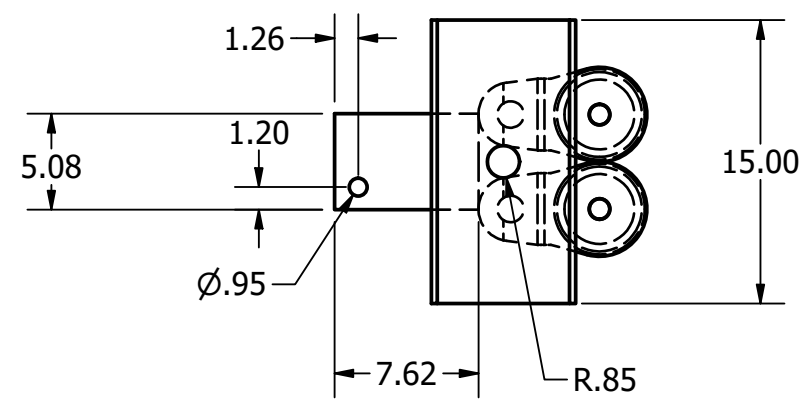
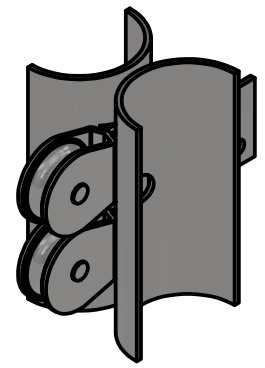
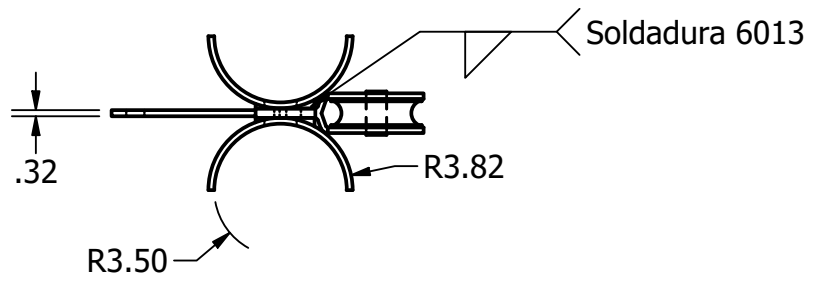
TÍTULO: Eje levantador de pesas con polea			
NÚMERO DE DIBUJO: 19			
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 19 DE 22		REV

NOTAS:
Tubo de 1 1/4" espesor de 1/8"



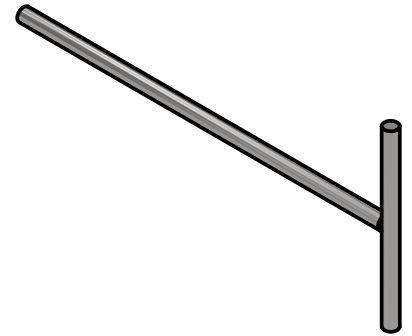
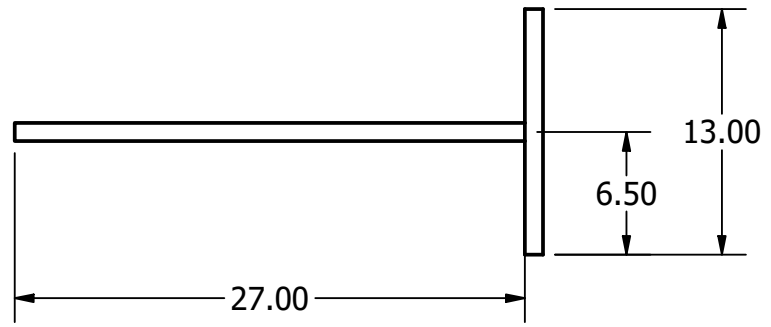
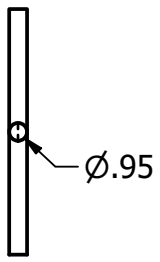
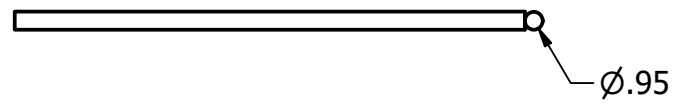
TÍTULO:		Guía para pesas	
NÚMERO DE DIBUJO: 20			
FORMATO	ESCALA: 1:8	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 20 DE 22		REV

NOTAS:
 plancha con espesor de 1/8"



TÍTULO:		Carrito	
NÚMERO DE DIBUJO: 21			
FORMATO	ESCALA: 1:4	UNIDADES: cm	
A	PÁGINA 21 DE 22		REV

NOTAS:
Varilla lisa de 3/8"



TÍTULO: Pasador para carrito			
NÚMERO DE DIBUJO: 22			
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES: cm	
A		PÁGINA 22 DE 22	REV