



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Diseño y construcción de un Banco De Pruebas No Destructivas para vigas en aluminio empotrada en un extremo y libre en el otro.

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de
INGENIERO MECÁNICO AUTOMOTRIZ**

Autor:

ANDRÉS TEODORO RIVERA BARRERA

Director:

HERNÁN ARTURO VITERI CERDA

CUENCA, ECUADOR

2015

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos que me brindaron su apoyo a lo largo de todo este trayecto fundamental en mi vida, a mis amigos y toda mi familia por su preocupación que siempre me ha inspirado para llegar a la perfecta culminación de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDOS	pag.
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: TEORÍA SOBRE LAS MÁQUINAS DE ENSAYO	2
1.1. Conceptos fundamentales	2
1.1.1 Esfuerzo	2
1.1.1.1 Esfuerzo Normal	2
1.1.1.2 Esfuerzo Cortante	3
1.1.2 Deformación	5
1.1.3 Diagrama esfuerzo deformación.....	6
1.1.4 Ley de Hooke.....	10
1.1.5 Esfuerzo de flexión	11
1.1.6 Esfuerzo de torsión	14
1.1.7 Deflexión.....	16
1.1.8 Métodos Finitos	17
1.2 Máquinas de ensayo.....	17
1.2.1 Máquinas de ensayo para la deformación.....	18

CAPITULO II: DISEÑO DE LA MÁQUINA DE ENSAYO23

2.1	Diseño de la máquina.....	23
2.1.1	Diseño preliminar.....	23
2.1.2	Análisis estructural de la máquina de ensayos.....	25
2.1.2.1	Primer caso	26
2.1.2.2	Segundo caso	66
2.1.3	Análisis en un software de métodos finitos	81

CAPITULO III: CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO85

3.1	Procesos de fabricación.....	85
3.1.1	Proceso de fabricación: Bastidor	86
3.1.2	Proceso de fabricación: Placa inferior	89
3.1.3	Proceso de fabricación: Placa superior	91
3.1.4	Proceso de fabricación: Soporte para rodillos	93
3.1.5	Proceso de fabricación: Eje para rodillos.....	95
3.1.6	Proceso de fabricación: Probeta sección cuadrada	97
3.1.7	Proceso de fabricación: Probeta sección circular.....	99
3.1.8	Proceso de fabricación: Palanca de torsión (cuadrado)	101
3.1.9	Proceso de fabricación: Palanca de torsión (circular).....	103
3.1.10	Proceso de fabricación: Empotramiento cuadrado	106
3.1.11	Proceso de fabricación: Empotramiento circular	108
3.1.12	Proceso de fabricación: Base de palpadores	110

3.1.13	Proceso de fabricación: Soporte de pesas	112
3.1.14	Proceso de fabricación: Pesas	114
3.1.15	Proceso de fabricación: Eje, Soporte, Rodillos.....	116
3.1.16	Proceso de fabricación: Máquina completa	118

CAPITULO IV: PRUEBAS EN LA MÁQUINA DE ENSAYOS.....120

4.1	Máquina de ensayos.....	120
4.1.1	Partes del equipo	120
4.1.2	Métodos de uso del equipo	122
4.1.3	Recomendaciones de uso del equipo	125
4.1.4	Normas de seguridad.....	126
4.2	Prácticas en la máquina.....	126
4.2.1	Determinación del módulo de elasticidad de las probetas	127
4.2.1.1	Probeta circular	127
4.2.1.2	Probeta cuadrada.....	129
4.3	Comprobación.....	131
4.3.1	Comprobación mediante cálculos numéricos	131
4.3.1.1	Carga en A1	132
4.3.1.2	Carga en A2	132
4.3.1.3	Carga en A3	135
4.3.2	Comprobación mediante software de elementos finitos	137
4.4	Comparación de datos y porcentaje de error.....	139
4.4.1	Análisis gráfico de resultados	140
4.5	Evaluación de la máquina	142

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	145
ANEXOS.....	149

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: componentes de la máquina de ensayos	7
Tabla 1.2: Modulo de elasticidad de diferentes materiales	11
Tabla 3.1: Proceso de trabajo #1 para construcción del bastidor	86
Tabla 3.2: Proceso de trabajo #2 para construcción de la placa inferior	89
Tabla 3.3: Proceso de trabajo #3 para construcción de la placa inferior	91
Tabla 3.4: Proceso de trabajo #4 para construcción del soporte de rodillos	93
Tabla 3.5: Proceso de trabajo #5 para construcción del eje para rodillos	95
Tabla 3.6: Proceso de trabajo #6 para construcción de la probeta cuadrada.....	97
Tabla 3.7: Proceso de trabajo #7 para construcción de la probeta circular	99
Tabla 3.8: Proceso de trabajo #8 para construcción de la palanca de torsión	101
Tabla 3.9: Proceso de trabajo #9 para construcción de la palanca de torsión (circular)	103
Tabla 3.10: Proceso de trabajo #10 para construcción del empotramiento cuadrado ...	106
Tabla 3.11: Proceso de trabajo #11 para construcción del empotramiento circular	108
Tabla 3.12: Proceso de trabajo #12 para construcción de la base de palpadores	110
Tabla 3.13: Proceso de trabajo #13 para construcción del soporte de pesas	112
Tabla 3.14: Proceso de trabajo #14 para construcción de las pesas	114
Tabla 3.15: Proceso de trabajo #15 para construcción del conjunto eje, soporte y rodillos	116
Tabla 3.16: Proceso de trabajo #16 para armado completo de la máquina	118

Tabla 4.1: Datos para el cálculo del módulo de elasticidad del perfil circular con carga en A1	128
Tabla 4.2: Datos para el cálculo del módulo de elasticidad del perfil cuadrado con carga en A1	130
Tabla 4.3: Evaluación de la máquina de ensayos	142

ÍNDICE DE FIGURAS

Figure 1.1: Esfuerzo normal.....	2
Figure 1.2: Esfuerzo cortante	3
Figure 1.3: Aplicación de cargas.....	4
Figure 1.4: Esfuerzo cortante	5
Figure 1.5: Partes de la máquina universal de ensayos.....	7
Figure 1.6: Esfuerzo-deformación del acero	8
Figure 1.7 Probeta de ensayo	9
Figure 1.8: Diagrama esfuerzo-deformación del aluminio	10
Figure 1.9: Distribución de cargas del Esfuerzo Flexionante	11
Figure 1.10: Diagrama de cuerpo libre	12
Figure 1.11: Aplicación de momentos	12
Figure 1.12: Flexión positiva	13
Figure 1.13: Flexión negativa	13
Figure 1.14: Esfuerzo de torsión.....	14
Figure 1.15: Esfuerzo de torsión resultante	14
Figure 1.16: Flexión negativa	15
Figure 1.17: Deflexión	16
Figure 1.18: Máquina universal de ensayos.....	18
Figure 1.19: Maquina para ensayos de la deformación.....	19
Figure 1.20: Reloj comparador	19
Figure 1.21: Maquina para ensayos con sujeción horizontal	20
Figure 1.22: Maquina para ensayos con sujeción en la parte superior.....	21
Figure 2.1: Maquina de ensayos.....	24
Figure 2.2: Probeta	24
Figure 2.3: Detalle del sistema de aplicación de la carga	25
Figure 2.4: Eje de rodillos.....	26
Figure 2.5: Diagrama de cuerpo libre de eje de rodillos.....	27
Figure 2.6: Resultados del análisis en el software de métodos finitos.....	27

Figure 2.7: Sistema de fuerzas del eje de rodillos.....	28
Figure 2.8: Diagrama de fuerza cortante y momento flector	28
Figure 2.9: Barra de torsión	30
Figure 2.10: Diagrama de cuerpo libre de la barra de torsión.....	31
Figure 2.11: Diagrama de fuerza cortante y momento flector	32
Figure 2.12: Probeta	34
Figure 2.13: Diagrama del cuerpo libre	34
Figure 2.14: Diagrama del cuerpo libre	38
Figure 2.15: Elemento de fijación probeta rectangular.....	42
Figure 2.16: Elemento de fijación.....	45
Figure 2.17: Placa de soporte superior.....	48
Figure 2.18: Diagrama de fuerzas pernos	49
Figure 2.19: Viga superior lateral	51
Figure 2.20: Diagrama del cuerpo libre de la viga.....	51
Figure 2.21: Diagrama del cuerpo libre de la viga.....	52
Figure 2.22: Viga superior	54
Figure 2.23: Diagrama de fuerzas	54
Figure 2.24: Base de soporte inferior.....	56
Figure 2.25: Diagrama de fuerzas.....	56
Figure 2.26: Diagrama del cuerpo libre	57
Figure 2.27: Viga inferior	58
Figure 2.28: Diagrama del cuerpo libre	59
Figure 2.29: Diagrama de fuerzas	60
Figure 2.30: Ubicación de la viga lateral	62
Figure 2.31: Viga lateral	63
Figure 2.32: Diagrama de fuerzas	63
Figure 2.33: Diagrama del cuerpo libre.	64
Figure 2.34: Diagrama de cuerpo libre	67
Figure 2.35: Resultados del análisis.....	67
Figure 2.36: Diagrama de fuerza cortante y momento flector	68
Figure 2.37: Probeta	69

Figure 2.38: Diagrama de fuerzas	70
Figure 2.39: Elemento de fijación.....	74
Figure 2.40: Placa de soporte	78
Figure 2.41: Diagrama de fuerzas	78
Figure 2.42: Diagrama del cuerpo libre viga superior	80
Figure 2.43: Interface del software ANSYS	82
Figure 2.44: Deformación total	82
Figure 2.45: Esfuerzo equivalente de Von Misses.....	83
Figure 2.46: Esfuerzo cortante	83
Figure 2.47: Factor de seguridad.....	84
Figure 3.1: Bastidor.....	86
Figure 3.2: Placa inferior.....	89
Figure 3.3: Placa superior	91
Figure 3.4: Soporte para rodillos.....	93
Figure 3.5: Eje para rodillos.....	95
Figure 3.6: Probeta Sección Cuadrada	97
Figure 3.7: Probeta Circular	99
Figure 3.8: Palanca de torsión (cuadrado).....	101
Figure 3.9: Palanca de torsión (circular)	103
Figure 3.10: Empotramiento cuadrado.....	106
Figure 3.11: Empotramiento circular	108
Figure 3.12: Base de palpadores	110
Figure 3.13: Soporte de pesas	112
Figure 3.14: Pesas	114
Figure 3.15: Conjunto Eje, Soporte, Rodillos	116
Figure 3.16: Maquina completa	118
Figure 4.1: Denominación de agujeros de carga.....	121
Figure 4.2: Distribución espacial de la máquina.....	122
Figure 4.3: Sección probeta circular	128
Figure 4.4: Sección probeta cuadrada	130
Figure 4.5: Carga en A2	132

Figure 4.6: Carga en A2, segmento AB	133
Figure 4.7: Carga en A2, segmento BC	133
Figure 4.8: Carga en A3, segmento AB	135
Figure 4.9: Carga en A3, segmento AB	135
Figure 4.10: Carga en A3, segmento BC	136
Figure 4.11: Biblioteca de materiales.....	138
Figure 4.12: Propiedades nuevo material.....	139
Figure 4.13: Grafico estadístico de resultados en probeta circular.	141
Figure 4.14: Grafico estadístico de resultados en probeta cuadrada.....	141

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Tablas de datos de pruebas experimentales.....	147
Anexo B: Tablas y gráficos estadísticos de resultados de pruebas experimentales.....	157
Anexo C: Cálculos analíticos del módulo de elasticidad.....	163
Anexo D: Comprobación mediante cálculos analíticos de la deflexión	168
Anexo E: Tablas del porcentaje de error comparativo con las pruebas experimentales	198
Anexo F: Laminas de construcción de piezas de la máquina de ensayos	200

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir un banco de pruebas no destructivas para vigas de aluminio empotrada en un extremo y libre en el otro.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar las teorías de la deformación en materiales.
- Diseñar y seleccionar la estructura, materiales y equipos del banco de pruebas.
- Construir el banco de pruebas.
- Validar los resultados analíticos con los experimentales.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS NO
DESTRUCTIVAS PARA VIGAS EN ALUMINIO EMPOTRADA EN UN
EXTREMO Y LIBRE EN EL OTRO.**

RESUMEN

El diseño y construcción del banco de pruebas, es un equipo didáctico destinado para que los estudiantes logren comprender y comprobar los efectos de la deformación de una viga (flexión y torsión) empotrada en uno de sus extremos y libre en el otro.

Como resultado final se obtuvo el módulo de elasticidad en dos probetas de aluminio de distintas secciones transversales y de igual manera se determinó el porcentaje de error ocasionado por la máquina de ensayos con respecto al valor del módulo de elasticidad proporcionado por el fabricante del aluminio.

Palabras Clave:

Módulo de elasticidad, Flexión, Torsión, Análisis estructural, Máquina de ensayos.



Hernán Arturo Viteri Cerda

Director de Tesis



Diego Francisco Torres Moscoso

Director de Escuela



Andrés Teodoro Rivera Barrera

Autor

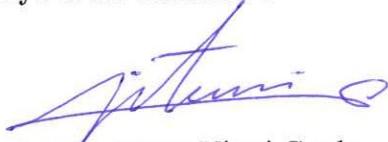
DESIGN AND CONSTRUCTION OF A NONDESTRUCTIVE TEST BANK FOR ALUMINIUM BEAMS EMBEDDED AT ONE END AND FREE AT THE OTHER.

ABSTRACT

The test bank is designed and built as didactic equipment for students to achieve understanding as well as to monitor the effects of the deformation of a beam (bending and torsion) embedded in one end and free at the other.

As a final result, we obtained the elasticity modulus in two test aluminum tubes of different cross-sections. Also, it was possible to determine the error rate caused by the testing machine in regard to the value of the modulus of elasticity provided by the aluminum manufacturer.

Keywords: Modulus of Elasticity, Bending, Torsion, Structural Analysis, Testing Machine



Hernán Arturo Viteri Cerda

Thesis Director



Diego Francisco Torres Moscoso

School Director



Andrés Teodoro Rivera Barrera

Author



Translated by,

Lic. Lourdes Crespo

Andrés Teodoro Rivera Barrera

Trabajo de Graduación

Ing. Hernán Arturo Viteri Cerda

Enero 2016

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS NO
DESTRUCTIVAS PARA VIGAS EN ALUMINIO EMPOTRADA EN UN
EXTREMO Y LIBRE EN EL OTRO.**

INTRODUCCIÓN

Los materiales que se utilizan para la fabricación de máquinas y estructuras en la industria deben cumplir ciertos requerimientos y exigencias, de tal manera que no se produzcan fallas durante el funcionamiento; para garantizar la fiabilidad del sistema es importante una correcta selección del material con las propiedades adecuadas; dichas propiedades dependen de cada material y son determinadas experimentalmente en un laboratorio de materiales mediante varios ensayos y pruebas prácticas; este trabajo de gradación busca diseñar y construir un banco de pruebas no destructivas para vigas en aluminio empotrada en un extremo y libre en el otro, para determinar la deflexión que se produce al aplicar una carga y visualizar el efecto de flexión y torsión de vigas en voladizo. Al dotar al laboratorio de mecánica de materiales de la Facultad de Ciencia y Tecnología de un banco didáctico funcional para la visualización de dichos efectos en vigas, se facilitará el aprendizaje teórico/práctico a los estudiantes para que desarrollen habilidades y destrezas en el área del diseño mecánico y lleven a cabo un estudio de dichos efectos, siendo beneficioso en el ámbito académico.

CAPÍTULO I

TEORÍA SOBRE LAS MÁQUINAS DE ENSAYO

Sin duda los componentes y elementos de las diferentes máquinas que se emplean en la actualidad están diseñados para soportar los esfuerzos y exigencias durante el funcionamiento de los mecanismos, para ello un correcto diseño mecánico y un adecuado material en el proceso de construcción es importante para garantizar la operación sin fallas inesperadas; en este capítulo se estudia los conceptos y teorías fundamentales necesarios para el diseño de elementos como el esfuerzo normal, cortante, flexión, torsión, etc., además se menciona a las máquinas de ensayo y sus múltiples aplicaciones para determinar las propiedades de los materiales.

1.1. Conceptos fundamentales

1.1.1 Esfuerzo

Es una magnitud física que permite cuantificar la distribución de las fuerzas internas que se distribuyen en una sección de un cuerpo dado.

1.1.1.1 Esfuerzo Normal

Este tipo de esfuerzo se presenta debido a cargas externas que estén aplicadas de forma paralela al centro de inercia de la viga en estudio o en otras palabras, perpendiculares a la sección de la misma. Estas cargas se las denomina cargas axiales.



Figura 1.1: Esfuerzo normal
Fuente: Autor

El esfuerzo que se genera en un objeto (Fig. 1.1) con área transversal A en la cual se aplica una fuerza P ; Se representa con la letra griega minúscula sigma (σ), a este se lo conoce con el nombre de esfuerzo normal. Para calcular o cuantificar su valor, se utiliza la siguiente formula:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area}} \qquad \sigma = \frac{P}{A}$$

El esfuerzo se expresa en unidades de fuerza sobre unidades de área, en el sistema internacional (SI) en Pascales (Pa), los cuales equivalen a Newtons sobre metros al cuadrado (N/m^2); En el sistema inglés se expresa en libras por pulgada cuadrada (lb/pulg^2), esta unidad se llama psi (Shigley & Mischke, 2012)

1.1.1.2 Esfuerzo Cortante

Las fuerzas que generan este tipo de esfuerzo se producen debido a reacciones internas de las cargas externas aplicadas de forma paralela a la sección o área de la viga, como se muestra en la figura 1.2. A estas se les conoce como tensiones cortantes.

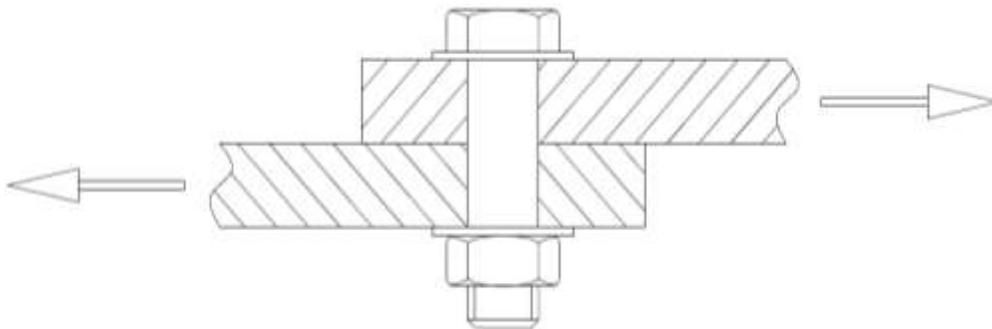


Figura 1.2: Esfuerzo cortante
Fuente: (Beer P., Johnston E, 2010)

Para el estudio de este tipo de esfuerzo se requiere realizar el diagrama de cuerpo libre en el punto que se desea analizar para encontrar la tensión cortante, ya que el esfuerzo en las

fibras a lo largo de la viga varía dependiendo de otras cargas aplicadas o apoyos que se posean en diferentes puntos de la misma.

En la figura 1.3 se observa la viga AB con sus cargas, a la cual se le realizará un corte en el punto C, para la obtención y análisis de las fuerzas cortantes internas que existen.

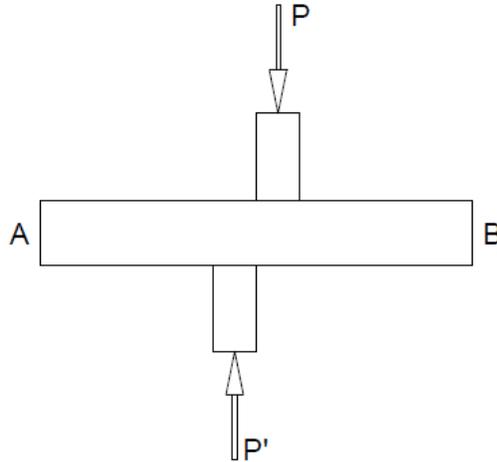


Figure 1.3: Aplicación de cargas
Fuente: (Beer P., Johnston E, 2010)

En la figura 1.4 se observa la fuerza cortante V, la cual la dividimos para la sección transversal A y el resultado será el esfuerzo cortante promedio (τ_{prom}).

$$\tau = \frac{V}{A}$$

Dónde:

τ =Esfuerzo cortante

V=Fuerza Cortante

A= Area

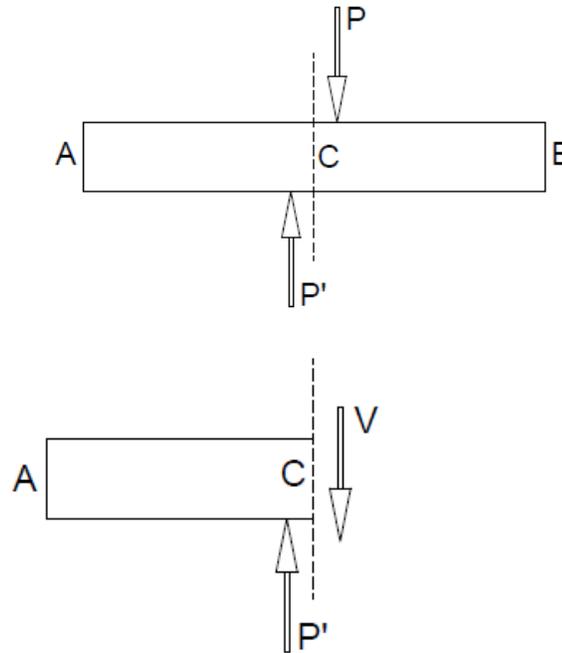


Figure 1.4: Esfuerzo cortante
Fuente: Autor

Las unidades para el esfuerzo cortante, son las mismas que para el esfuerzo normal, es decir Pascales o lb/pulg² dependiendo del sistema utilizado; los esfuerzos cortantes se los encuentra generalmente en elementos de sujeción como pernos, pasadores, remaches, soldaduras, etc. (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010).

1.1.2 Deformación

La deformación es el cambio de forma de un cuerpo debido a la acción de una fuerza, el cambio de temperatura u otras variables, cuando se produce una carga axial a tracción o compresión en una viga prismática se producirá una deformación lineal donde se dará un cambio que se medirá en unidades de longitud; la relación de la deformación lineal es la siguiente:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Dónde:

δ =Alargamiento total

L =Longitud total

ϵ = Deformación lineal

El alargamiento del cuerpo producido por la fuerza dependerá del tipo de elemento con el cual se está trabajando, puesto que cada material tendrá un valor de alargamiento determinado, estas propiedades se determinan mediante el diagrama esfuerzo deformación (Shigley & Mischke, 2012).

1.1.3 Diagrama esfuerzo deformación

El diagrama esfuerzo deformación permite observar el comportamiento de los materiales bajo la acción de una carga conocida, de esta manera se puede determinar las propiedades mecánicas de cada uno de los elementos que se utilizan en la ingeniería, dicho diagrama se obtiene a partir del ensayo a tracción, el mismo que se realiza bajo condiciones establecidas según normas internacionales como la ASTM (American Society for Testing and Materials, ASA (American Standards Association), NIST (National Institute of Standards and Technology); en cada norma se determina las dimensiones de la probeta, la velocidad de aplicación de la carga y el procedimiento para realizar el ensayo, por lo cual los resultados se pueden generalizar para cada material (Callister, 2012).

El dispositivo que permite realizar el ensayo es conocido como maquina universal de ensayos, en el punto ; El principio de funcionamiento de la máquina de ensayos es el mismo, sin importar el fabricante; básicamente se dispone de dos cabezales, uno fijo y otro móvil que servirá para aplicar la carga en la probeta por medio de un grupo hidráulico, además se tiene de las mordazas para sujetar la pieza, y los elemento encargados de registrar la información del ensayo y transmitirlos a una pc u otro medio para que el usuario pueda interpretar los resultados.

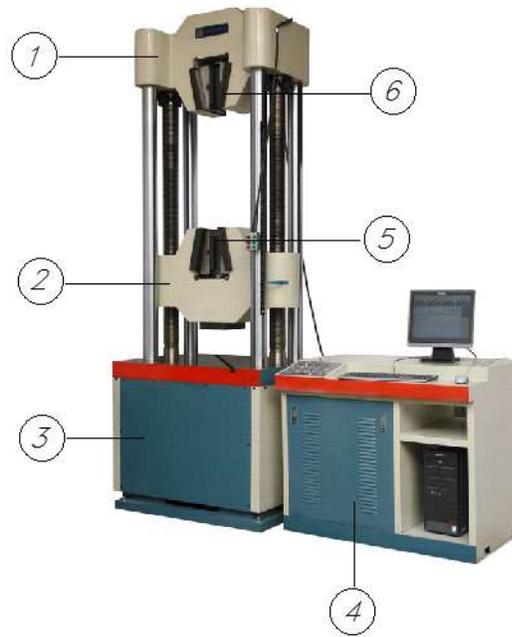


Figure 1.5: Partes de la máquina universal de ensayos
 Fuente: (<http://testersupply.es/2-3-universal-testing-machine.html>, 2012)

Dónde:

Tabla 1.1: componentes de la máquina de ensayos

Nº	Denominación
1	Cabezal móvil
2	Cabezal fijo
3	Grupo hidráulico
4	Unidad de procesamiento de datos
5	Mordaza del cabezal fijo
6	Mordaza del cabezal móvil

El diagrama de esfuerzo-deformación dependerá del tipo de material con el cual se esté trabajando, sin embargo se toma como referencia el ensayo del acero estructural, debido a que este elemento es el que se utiliza ampliamente en las diversas áreas de la ingeniería, en la figura 1.6 se muestra el diagrama del acero estructural 1006.

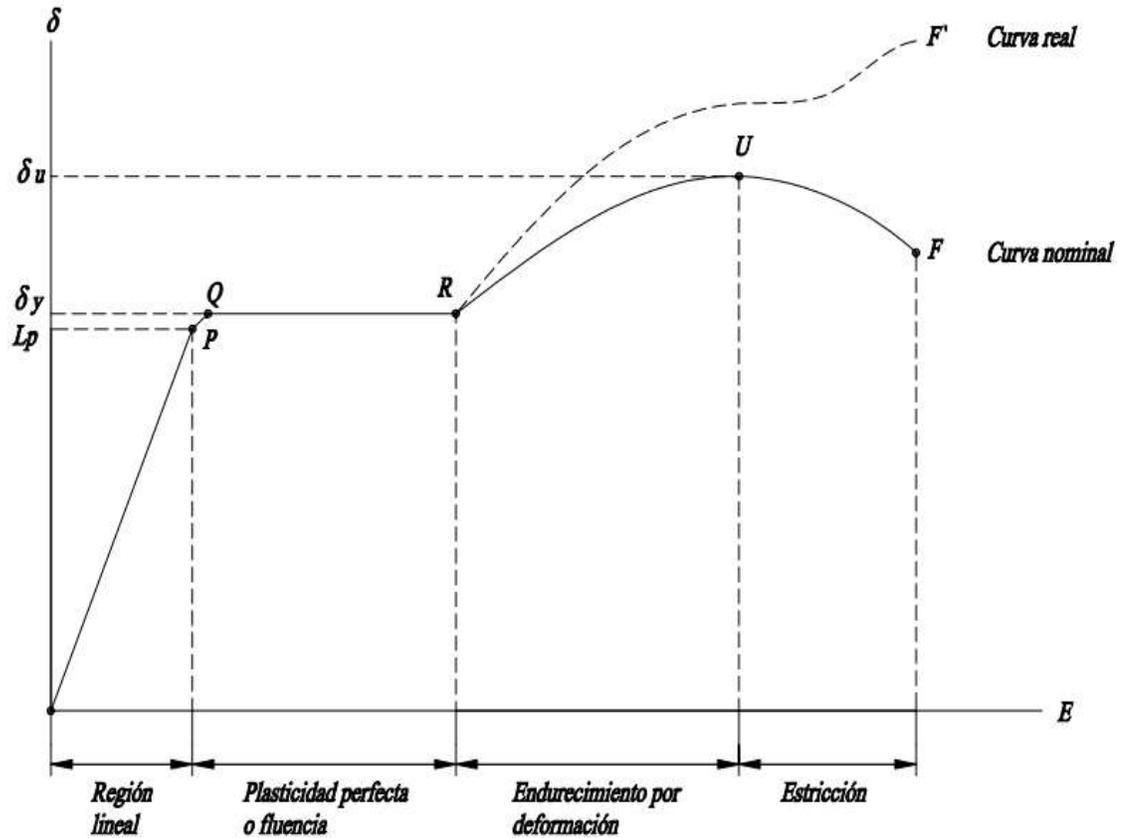


Figure 1.6: Esfuerzo-deformación del acero

Fuente: (<http://www.unet.edu.ve/~jtorres/matsoft/01.traccion.html>, 2014)

En la primera parte del diagrama se tiene una zona lineal y proporcional entre el esfuerzo y la deformación, dicha relación se da desde el origen hasta punto P (límite de proporcionalidad), luego se presenta la zona de fluencia, en esta zona se presenta un cambio de la pendiente, hasta que en el punto Q se da un incremento considerable de la deformación con un mínimo aumento del esfuerzo, es decir la curva se vuelve horizontal, a este punto se le conoce como la fluencia o cedencia del material, después de esta zona el acero sufre grandes cambios en su estructura cristalina debido a la deformación; como consecuencia se debe aplicar una mayor carga para lograr una deformación del material, finalmente al aumentar la carga se produce la falla (ruptura) del material en el punto F.

En la siguiente imagen se muestra una probeta luego de haber realizado el ensayo.

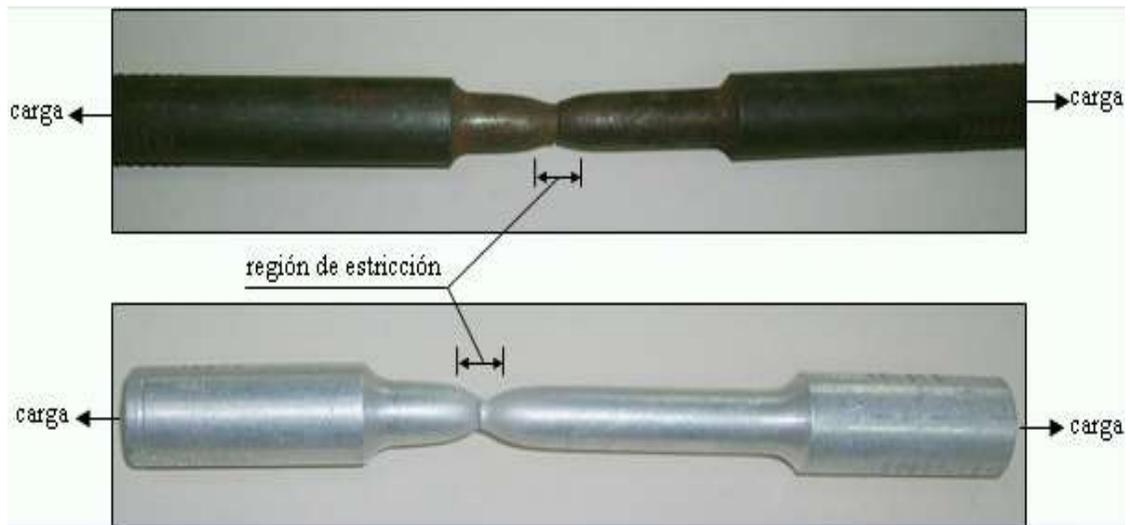


Figure 1.7 Probeta de ensayo

Fuente: (<http://www.unet.edu.ve/~jtorres/matsoft/01.traccion.html>, 2014)

Como se puede apreciar en la zona donde se produce la fractura se genera una estricción del diámetro de la probeta, por lo cual al volver a calcular la deformación con el nuevo valor del diámetro se obtiene el valor de la deformación real, sin embargo se toma la curva nominal para el diseño de componentes.

El diagrama que se observó anteriormente es válido para los materiales dúctiles, para los materiales frágiles el diagrama varia; A continuación se observa el diagrama Esfuerzo-Deformación Unitaria para el Aluminio y otros metales que no tienen punto de fluencia:

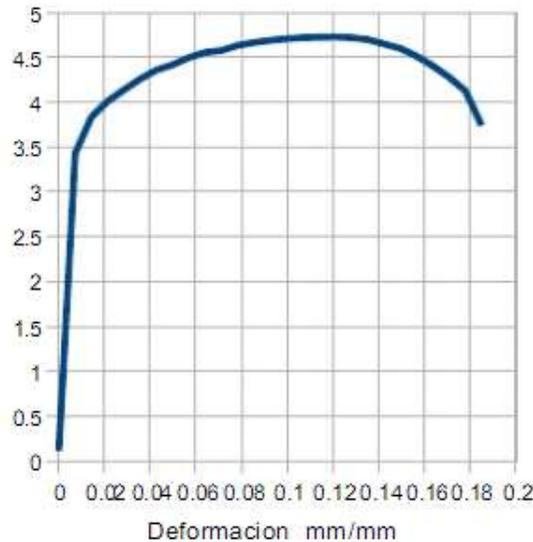


Figure 1.8: Diagrama esfuerzo-deformación del aluminio

Fuente: (<http://es.scib, 2014>)

En este caso no existe la zona de fluencia, se pasa directamente de la zona de fluencia a la zona de endurecimiento, es decir una vez que el material inicia su deformación se genera la fractura (Hibbeler, 2012).

1.1.4 Ley de Hooke

Como se pudo apreciar en el diagrama de esfuerzo deformación se encuentra la zona elástica, que está limitada desde el origen hasta el punto P, en esta zona se da una relación de proporcionalidad entre la deformación y el esfuerzo que se conoce como la ley de Hooke, dicha relación esta expresada de la siguiente manera:

$$\sigma = \epsilon * E$$

Dónde:

σ =Esfuerzo

E =Módulo de elasticidad o módulo de Young

ϵ = Deformación unitaria

El valor del módulo de elasticidad dependerá de cada material, la siguiente tabla muestra el valor de algunos materiales empleados en la ingeniería (Mott, 2009).

Tabla 1.2: Modulo de elasticidad de diferentes materiales

Metal	Módulo de Young $Y \cdot 10^{10} \text{N/mm}^2$
Cobre estirado en frio	12.7
Cobre fundición	8.2
Cobre laminado	10.8
Aluminio	6.3-7.0
Acero al carbono	19.5-20.5
Acero aleado	20.6
Acero fundición	17.0
Cinc laminado	8.2
Latón estirado al frio	8.9
Latón naval laminado	9.7
Bronce al aluminio	<u>10.3</u>

1.1.5 Esfuerzo de flexión

Son las tensiones y deformaciones que se generan internamente al aplicar una carga externa sobre una viga, dichos esfuerzos se pueden resolver al encontrar las fuerzas internas que actúan en la sección transversal de la viga. Si se toma como referencia la figura 1.9.

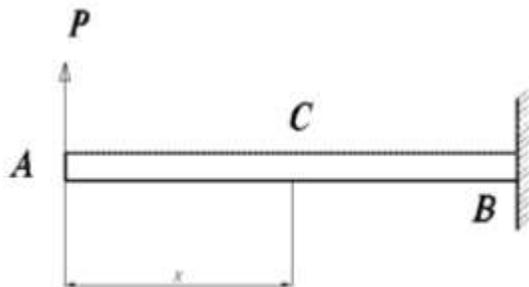


Figure 1.9: Distribución de cargas del Esfuerzo Flexionante
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Se tiene una viga empotrada en B a la cual se le aplica una carga externa P en su extremo libre A, al aislar el extremo A hasta el punto C ubicado a una distancia X de la carga P , se tiene un esfuerzo cortante V y un momento flector M que actúan como resultante de la carga inicial; no se tiene ninguna carga axial sobre la sección transversal.

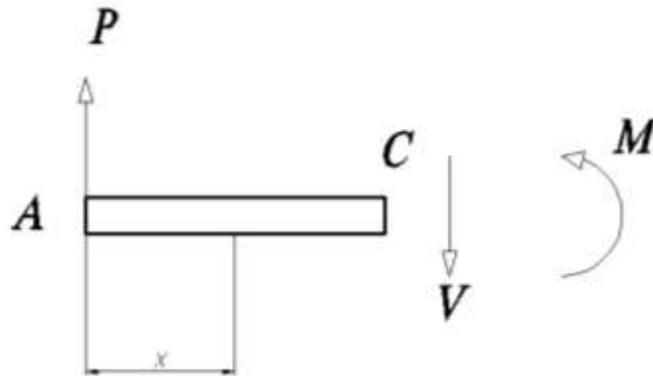


Figure 1.10: Diagrama de cuerpo libre
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Las fuerzas cortantes y el momento flector producirán la flexión en la viga, sin embargo dependiendo de la acción de cada una de ellas se tendrá la flexión pura en la cual actúa solo un momento flector y la flexión no uniforme, en la cual está un momento flector y un esfuerzo cortante.



Figure 1.11: Aplicación de momentos
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Para que exista el esfuerzo hay que tener ciertas consideraciones como que la viga esté sometida a flexión, el material deberá ser homogéneo, isotrópico y cumplir con la ley de Hooke, la viga deberá tener una sección prismática, en reposo ser recta y fallar por flexión, no por otro tipo de esfuerzos, deberá tener un eje de simetría en el plano de la flexión y las secciones transversales de la viga deberán permanecer planas durante el esfuerzo. La convención de signos es la siguiente, cuando la concavidad de la viga en flexión esta hacia

arriba el signo del momento será positivo y cuando la concavidad este hacia abajo el signo del momento será negativo, en cuanto a la deformación y el esfuerzo son negativos si las fibras están en compresión, positivas si están a tracción y existirá una superficie de fibras donde tanto la deformación como el esfuerzo se anulen, a esta se le llama superficie neutra (Hibbeler, 2012).

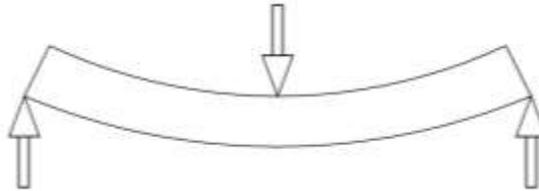


Figure 1.12: Flexión positiva
Fuente: Autor

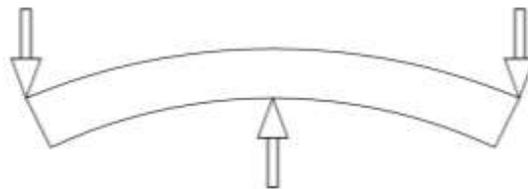


Figure 1.13: Flexión negativa
Fuente: Autor

La relación para encontrar el esfuerzo de flexión tiene la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

Dónde:

σ =Esfuerzo de flexión

M =Momento flector

c = Distancia desde el eje neutro de la viga hasta la fibra más alejada

I =Momento de inercia del área transversal de la viga

1.1.6 Esfuerzo de torsión

Al igual que el esfuerzo de flexión, cuando aplicamos un torque sobre una viga o un eje se producirán esfuerzos internos, en este caso esfuerzos torsionales; en la imagen 1.14 se puede observar a un eje al cual se le aplica un torque T en A.

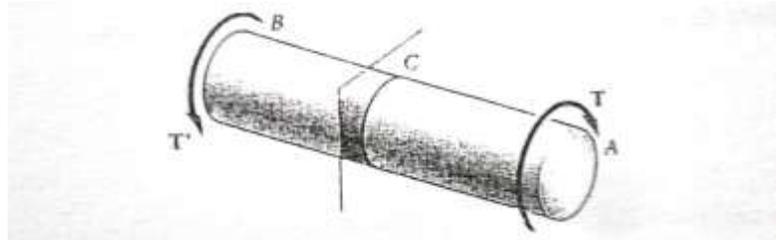


Figure 1.14: Esfuerzo de torsión
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Al aislar las fuerzas internas en C se obtiene un torque resultante, que actúa en toda el área transversal del eje en forma de una fuerza cortante

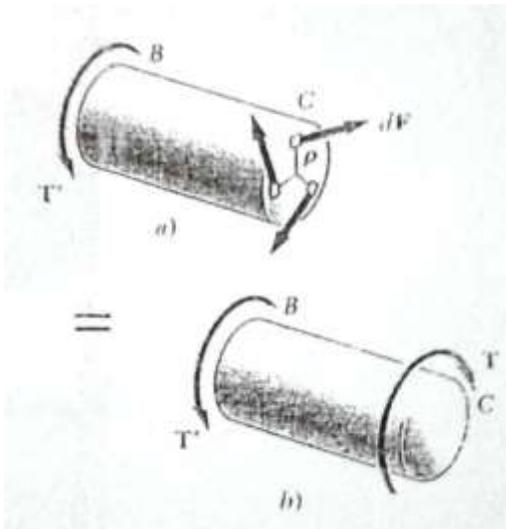


Figure 1.15: Esfuerzo de torsión resultante
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

El esfuerzo de torque se encuentra mediante la siguiente relación:

$$\tau = \frac{T * c}{J}$$

Dónde:

τ =Esfuerzo de torsión

T =torque

c = Distancia desde el eje neutro de la viga hasta la fibra más alejada

J =Momento polar de inercia

En la torsión a más del esfuerzo de torsional se produce una deformación angular, como se muestra en la siguiente figura:

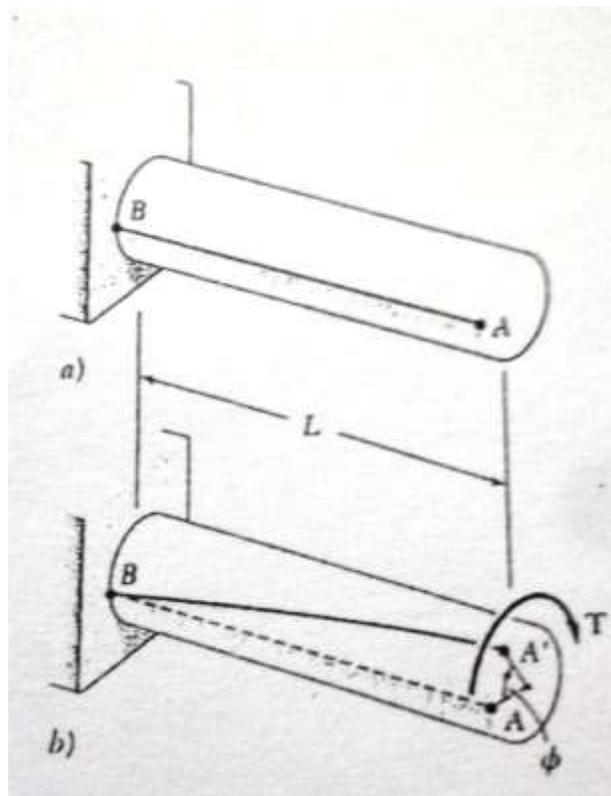


Figure 1.16: Flexión negativa
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Si al eje empotrado en B y libre en A se le aplica un torque T en el extremo libre, se producirá una deformación angular ϕ que se define mediante la siguiente relación:

$$\phi = \frac{T * L}{J * G}$$

Dónde:

ϕ =Angulo de giro

T =torque

L = Longitud del eje

J = Momento polar de inercia

G = Módulo de rigidez

La relación de ángulo de giro es válida únicamente para la zona elástica de los materiales

1.1.7 Deflexión

Cuando se analizó el esfuerzo de flexión se consideró todas las fuerzas internas que actúan sobre la sección transversal de la viga, pero no se consideró la distancia que se desplaza la viga por causa de las fuerzas, esto se puede explicar en la figura 1.17:

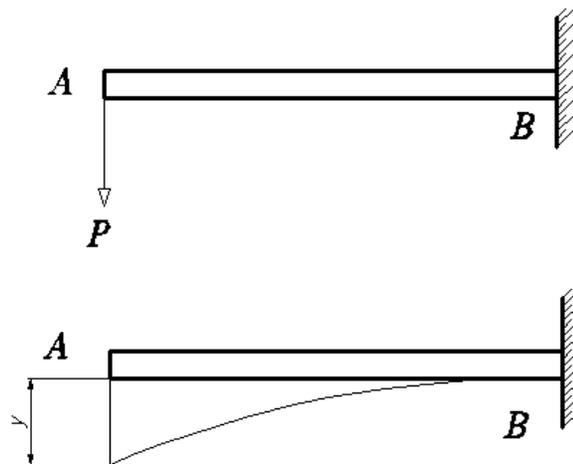


Figure 1.17: Deflexión
Fuente: (Beer P., Johnston E., 2010)

Si a una viga se le aplica una carga P en A , se producirá una deflexión con un valor de “ y ”; para encontrar el valor de la deflexión se emplea el método de la doble integral.

$$EI y = \int_0^x dx \int_0^x M(x) dx + C_1 x + C_2$$

Los valores de $C1$ y $C2$ se encuentran mediante las condiciones de frontera, que dependerán del sistema de fijación de la viga

1.1.8 Métodos Finitos

El método de elementos finitos (MEF) es un procedimiento numérico generalmente utilizado para soluciones de ecuaciones diferenciales de problemas con alto grado de dificultad, con aplicaciones como la física, matemáticas e ingeniería. El MEF es empleado en diferentes softwares computacionales con el fin de facilitar el análisis del comportamiento de un objeto ante la presencia de fuerza, calor, vibración, flujo de fluidos, fenómenos eléctricos y magnéticos, entre otros (Celigüeta, 2011).

El MEF considera a la estructura como el enlace de un número finito de partículas pequeñas, estas partículas son los llamados elementos finitos, los puntos donde los elementos finitos están interconectados, se conocen como nodos y el procedimiento de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, se lo conoce como discretización. Al discretizar el continuo y resolver cada uno de los elementos para luego ensamblarlos, se obtiene una solución total. La cual luego será modelada de forma gráfica (Cubillos, 2007).

1.2 Máquinas de ensayo

Las máquinas de ensayo son empleadas para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los elementos a partir de pruebas destructivas y no destructivas de los materiales, la configuración de cada mecanismo dependerá de las propiedades que se busca determinar, en la figura 1.18 se muestra una maquina universal de ensayos de última generación con la cual se puede realizar ensayos de tracción, compresión, flexión, corte directo y otros (Torres, 2007).



Figure 1.18: Máquina universal de ensayos

Fuente: (<http://www.testerinchina.es/1-1-universal-testing-machine.html>, 2014)

1.2.1 Máquinas de ensayo para la deformación

Tiene como objetivo aportar al estudio teórico de las propiedades mecánicas de los materiales, en este caso a partir de los datos que se obtienen en el ensayo se determina el módulo de elasticidad del material de la probeta, también se podrá validar si los cálculos realizados de forma teórica concuerdan con los experimentales, además se observa de una manera didáctica los efectos de la deformación de la probeta empotrada en uno de sus extremos y libre en el otro causados por los esfuerzos de flexión y torsión, en la figura 1.19 se observa una máquina de ensayos para la deformación.



Figure 1.19: Maquina para ensayos de la deformación

Fuente: (<http://edibon.com/products/img/units/mechanicsmaterials/strengthmaterials/MVV.jpg>, 2014)

Todas la máquinas de este tipo tienen un funcionamiento similar, básicamente se tiene una probeta que va empotrada en un extremo, mientras que en el otro extremo libre se coloca la carga progresivamente mediante una serie de pesas calibradas, además están los mecanismos de medición como se observa en la figura 1.20, que permiten observar el efecto de deflexión de la viga durante el funcionamiento de la máquina.



Figure 1.20: Reloj comparador

Fuente: (<http://elind.com.ar/es/productos/relojes-comparadores-digitales-analogicos-y-palpadores-mitutoyo-37.htm>, 2014)

A continuación se pueden observar a los bancos de pruebas que existen en el medio, cada uno tiene sus ventajas y desventajas que servirán como punto inicial para determinar el diseño de máquina de ensayo que se fabricará para ello se considera la facilidad de fabricación, los costos y la posición de la viga (con respecto a las cargas que puedan existir por efecto de la gravedad). Hay que tener presente que los elementos de medición en todos los bancos de pruebas son relojes comparadores de tipo mecánico.

En la figura 1.21 se puede observar variaciones con respecto al banco de pruebas anteriormente descrito, aunque el principio de funcionamiento es el mismo. En este se muestra que la probeta está dispuesta en posición horizontal, por lo que se debe considerar el peso propio de la viga. Se tiene un diseño sencillo en la estructura, se dispone únicamente una base metálica con una columna vertical a la cual se sujetará la probeta mediante pernos, los elementos de medición son desmontables y no necesariamente parte de la estructura, tienen bases magnéticas para colocarlas a conveniencia, pero esto podría generar fallas al momento de tomar los datos; la carga se aplica por medio de pesas calibradas.



Figure 1.21: Máquina para ensayos con sujeción horizontal

Fuente: (<http://www.edlabquip.com/catalogue/st-062-unsymmetrical-cantilever-apparatus/>, 2014)

En la figura 1.22 se puede observar que existen diferencias tanto estructurales como de ubicación de la probeta, en este caso se tiene una configuración similar a la figura 1.21, de forma vertical, pero la variación está en que el punto de sujeción se localiza en la parte de arriba, lo cual permite despreciar el peso de la viga; en la estructura se observa que tiene cuatro pilares de sección circular que soportan una placa, la misma que sujetará a la probeta. Los mecanismos de medición están posicionados en la parte baja de forma fija que consta de dos relojes comparadores, además posee pesas calibradas, la carga es transferida a la viga por medio de un cable tensor apoyado en una polea.



Figure 1.22: Maquina para ensayos con sujeción en la parte superior

Fuente: (<http://www.tecquipment.com/Materials-Testing/Structures/SM1003.aspx>, 2014)

El banco de pruebas a construir sería similar al de la figura 1.23, debido a que la forma de diseño afecta menos en los ensayos, puesto que el peso propio de la viga no afecta a las

pruebas; También se nota una estructura más sencilla de construir, lo cual generará costos más bajos en cuanto a mecanizado.

Se implementará una viga transversal en la cual se apoyarán los instrumentos de medición, permitiendo desplazar el punto donde se genera la carga, de esta manera se puede observar los efectos de torsión en la viga. La deformación se medirá por medio de dos relojes comparadores que se dispondrán de forma paralela, a una misma altura y distancia del centro de gravedad de la viga, estos resultados deberán ser validados con el análisis teórico obtenido a través de fórmulas ya establecidas, tomando siempre en cuenta el tipo de material y las dimensiones principales de la viga. Al banco de pruebas a construir se le suministrará de probetas de secciones de aluminio que se pueden encontrar en nuestro medio, de sección circular y rectangular, para que se realicen las pruebas. Las medidas y configuración de la máquina de ensayos se especificarán en el capítulo 2.

CAPITULO 2

DISEÑO DE LA MÁQUINA DE ENSAYO

En este capítulo se propone un diseño para la máquina de ensayos que permita observar la deflexión al aplicar una carga externa en una probeta de aluminio, para ello se realiza los cálculos teóricos correspondientes según lo mencionado en el capítulo 1, además se validarán los valores obtenidos en un software de elementos finitos, de esta manera se garantizará la fiabilidad de la máquina de ensayos.

2.1 Diseño de la máquina

2.1.1 Diseño preliminar

En la figura 2.1 se observa el diseño propuesto de la máquina de ensayo, la misma está conformada por una estructura rectangular que servirá como bastidor para soportar los diferentes componentes del sistema, al mismo tiempo se tiene una platina ubicada en la parte superior que se utiliza para empotrar a la probeta de aluminio al bastidor mediante una base de fijación y cuatro pernos M8; por otro lado se tiene una segunda platina ubicada en la parte inferior que se utiliza para soportar al mecanismo empleado para colocar la carga al sistema mediante una serie de pesas calibrada, los elementos de la máquina están conformados por un acero estructural 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280\text{Mpa}$, mientras la probeta de ensayo será confeccionada en un aluminio AISI 6063 con un tratamiento térmico de grado T5 con un valor de $S_y=145\text{MPa}$. Cabe mencionar que en el ensayo a la deflexión se utilizan dos tipos de probetas, una cuadrada de $25.4 \times 1.2\text{mm}$ y longitud de 420mm y otra circular de $\varnothing = 23.4\text{mm}$ y una longitud de 420mm

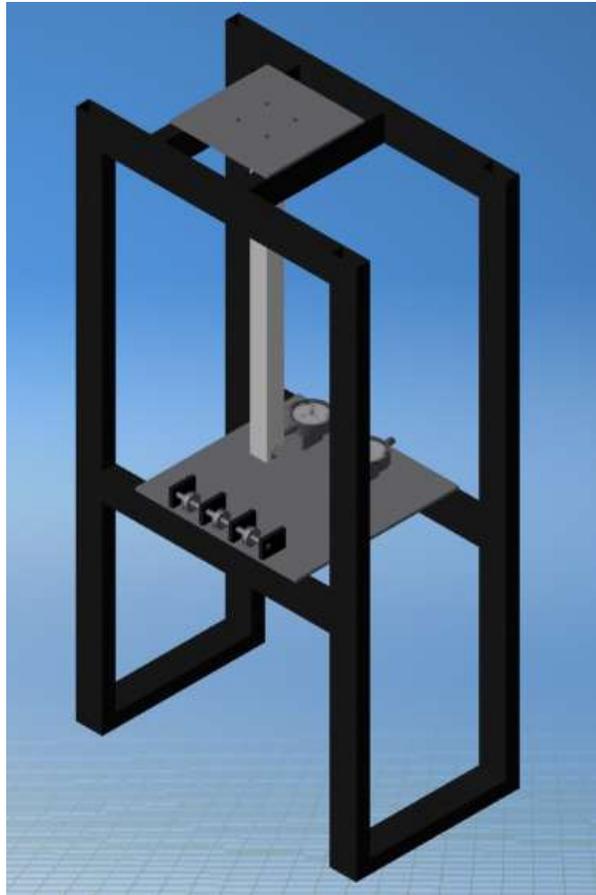


Figure 23: Maquina de ensayos
Fuente: Autor



Figure 24: Probeta
Fuente: Autor

En la figura 2.3 se puede observar el mecanismo para aplicar la carga a la probeta, para ello se dispone de una pequeña palanca de torsión rectangular que se ubica al final de la viga de aluminio que servirá para la aplicación de la carga y además para obtener la lectura de la deformación mediante dos relojes comparadores, al mismo tiempo se dispone de tres poleas fijas al final de la platina que permitirán variar el punto de aplicación de la carga en el extremo de la probeta, este mecanismo es importante si se quiere aplicar flexión y un torque a la probeta para observar la deformación.

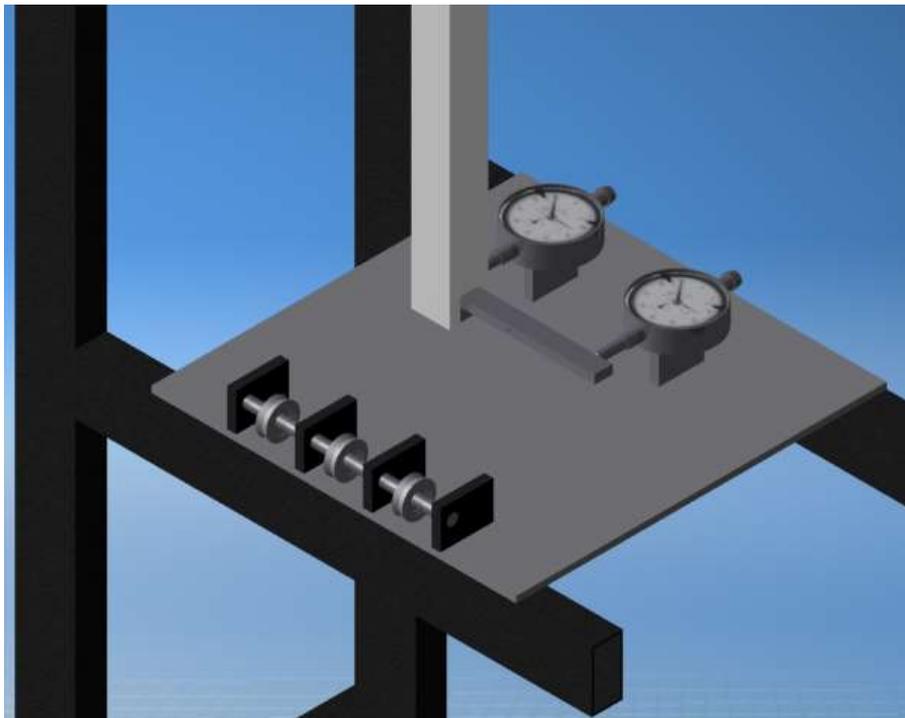


Figure 25: Detalle del sistema de aplicación de la carga
Fuente: Autor

2.1.2 Análisis estructural de la máquina de ensayos.

Para el diseño de los componentes de la máquina de ensayos se tomarán en cuenta dos puntos diferentes, que estarán en función del lugar donde se colocará la carga del sistema en las diferentes poleas ubicadas en el eje de rodillos.

2.1.2.1 Primer caso

Para este caso la carga del sistema se coloca en el punto más lejano de la palanca de torsión, es decir en la polea 1 ubicada a la derecha en el eje de rodillos como se observa en la figura 2.4, la fuerza que se tomará en cuenta para el cálculo es de 5Kg es decir 49,05N.

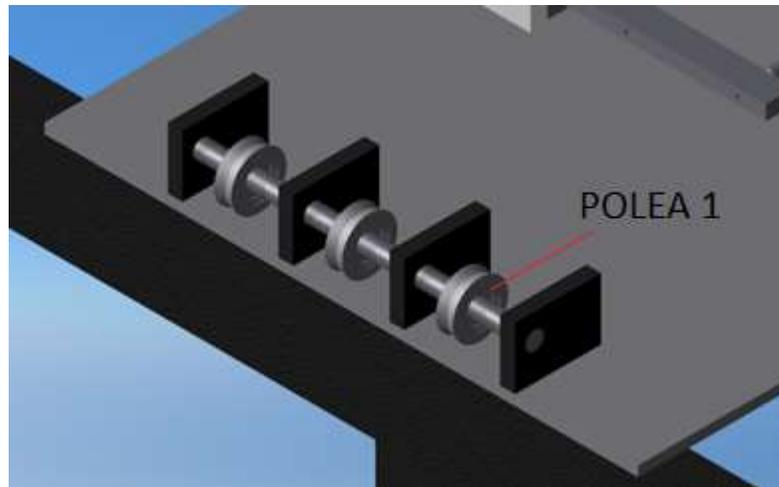
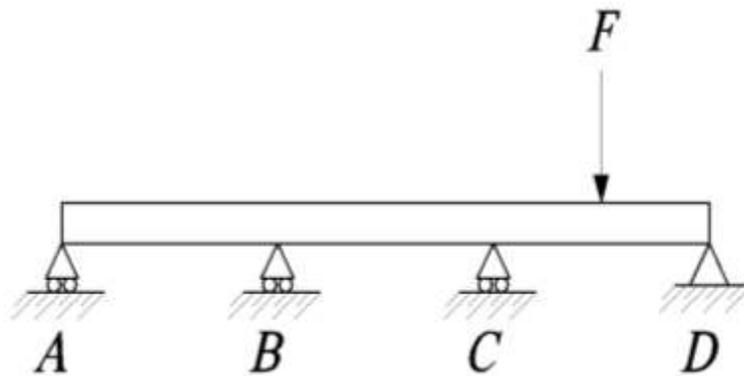


Figure 26: Eje de rodillos
Fuente: Autor

En primer lugar se realiza el estudio del eje de rodillos, el mismo se encuentra soportado por 4 apoyos y bajo la acción de la carga de 5Kg; el eje tiene un diámetro de 7,52mm y una longitud de 141mm, a continuación en la figura 2.5 se muestra la configuración del sistema de fuerzas.



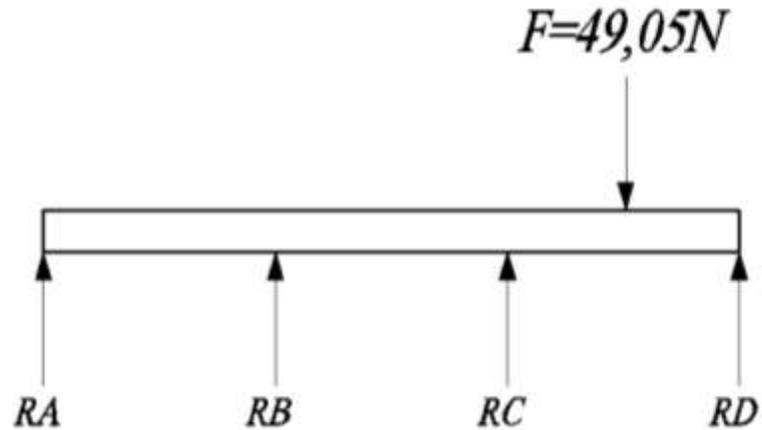


Figure 27: Diagrama de cuerpo libre de eje de rodillos
 Fuente: Autor

Como se puede observar en el diagrama de cuerpo libre el número de incógnitas es mayor al número de ecuaciones estáticas; por tal razón se emplea un software de elementos finitos para determinar las reacciones de los apoyos; a continuación en la figura 2.6 y 2.7 se observa los resultados del análisis:

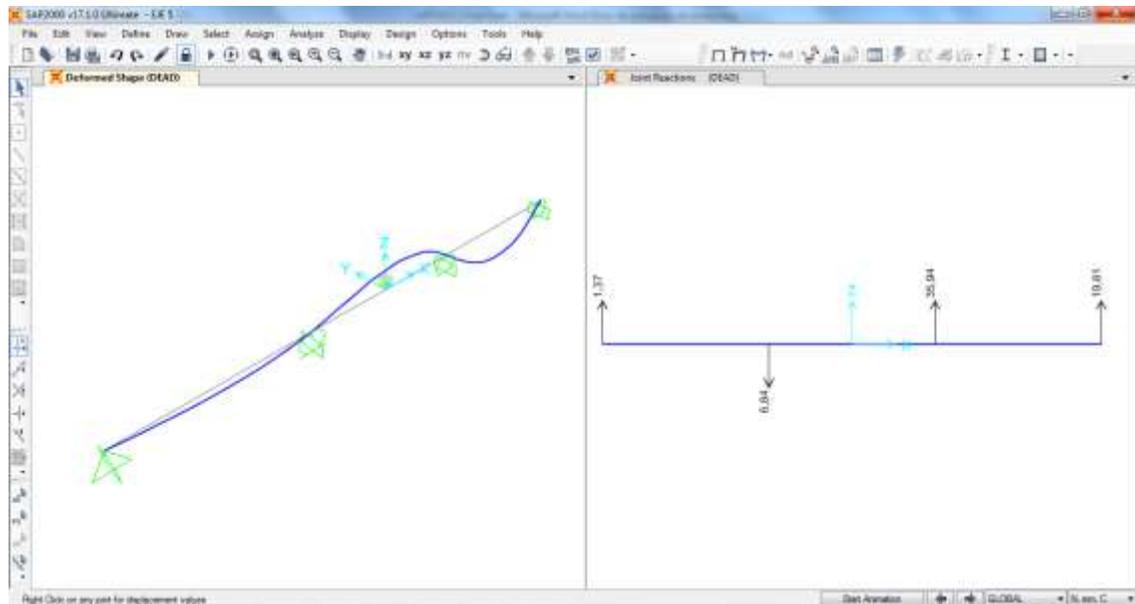


Figure 28: Resultados del análisis en el software de métodos finitos
 Fuente: Autor

Los resultados son:

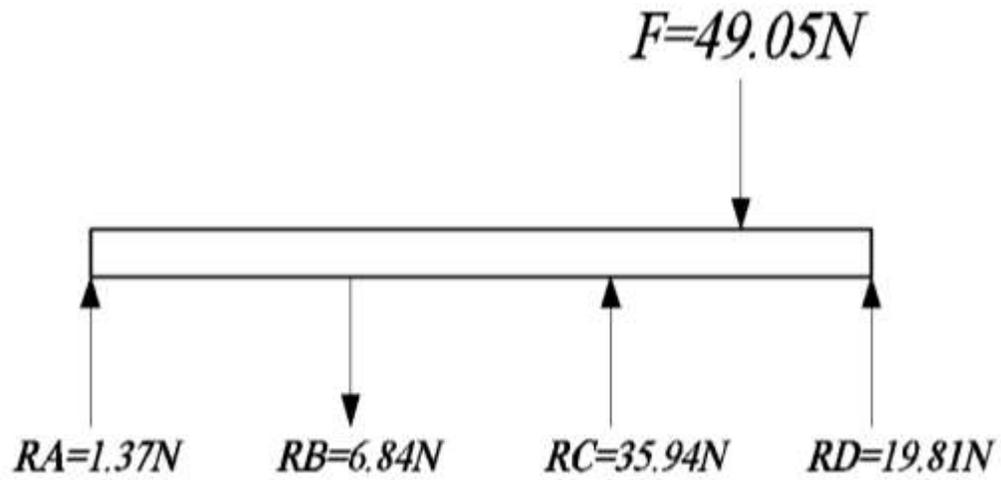


Figure 29.7: Sistema de fuerzas del eje de rodillos
Fuente: Autor

El diagrama del momento flector es:

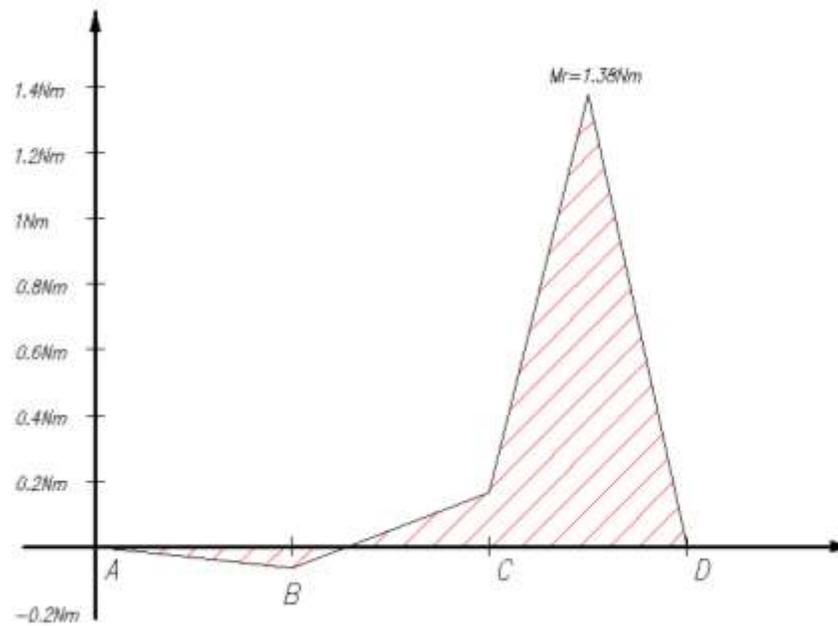


Figure 30: Diagrama de fuerza cortante y momento flector
Fuente: Autor

- Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

Dónde:

$\sigma_{flexion}$ = Esfuerzo de flexión

M_{max} = Momento flector maximo

c = Distancia de la fibra mas lejana al eje neutro

I = Momento de inercia de la sección

$$M_{max} = 1.38N * m$$

$$c = 0.004m$$

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}; \quad I = \frac{\pi * (0.00376m)^4}{4}; \quad I = 1.56x10^{-10}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{1.38N * m * 0.00376m}{2.01x10^{-10}m^4} = \mathbf{25.81MPa}$$

- Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

Dónde:

τ = Esfuerzo cortante

V = Fuerza cortante

A = Area

$$A = \pi * r^2; \quad A = \pi * (0.00376m)^2; \quad A = 4.44x10^{-5}m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} = \frac{49.05N}{0.0000444m^2} = \mathbf{1.104MPa}$$

Se utiliza un acero estructural 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280\text{MPa}$, de acuerdo con este material el valor del factor de seguridad para flexión será:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{admisible}} = \frac{S_y}{\sigma_{flexion}} = \frac{280\text{MPa}}{25.81\text{MPa}} \quad n = 10.84$$

Para el factor de seguridad a esfuerzo cortante se tiene:

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} = \frac{(0.577)280\text{MPa}}{1.104\text{MPa}} \quad n = 146.34$$

Continuando con el diseño se analiza la palanca de torsión, la misma que servirá para aplicar la carga en diferentes puntos y así poder producir tanto flexión como torsión a la probeta de aluminio, en la figura 2.9 se puede observar la disposición de la barra de torsión; la sección transversal de este elemento es de 12 x 6 mm con una longitud de 90mm.

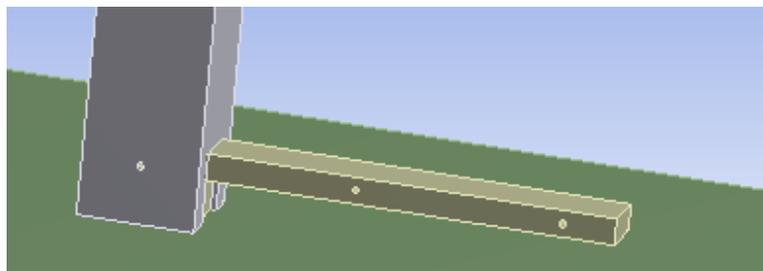


Figure 31: Barra de torsión
Fuente: Autor

Si se considera que la barra se encuentra empotrada en la probeta de aluminio y se aplica la carga de 49.05N del sistema de pesas se tiene la siguiente distribución de carga como se puede observar en la figura 2.10

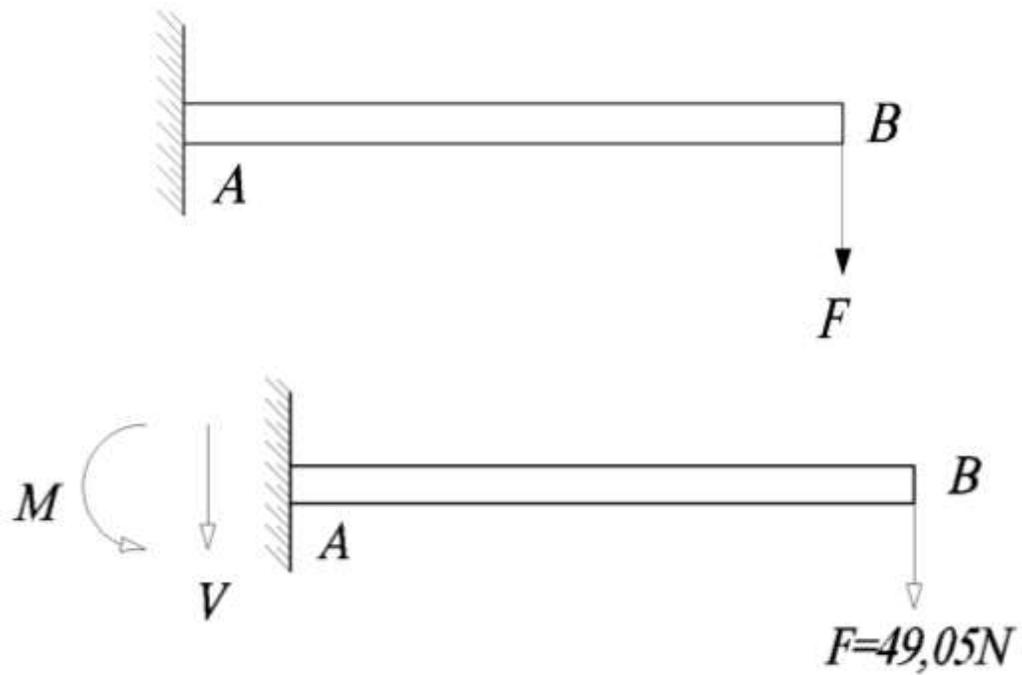


Figure 32: Diagrama de cuerpo libre de la barra de torsión
Fuente: Autor

Por el sistema de fijación el M_{max} será el que se genera en el empotramiento

$$M_{max} = F * d = 49.05N * 0.09m = 4.4145Nm$$

Mientras la fuerza cortante será de 49.05N, en la figura 2.11 se puede observar el diagrama de fuerza cortante:

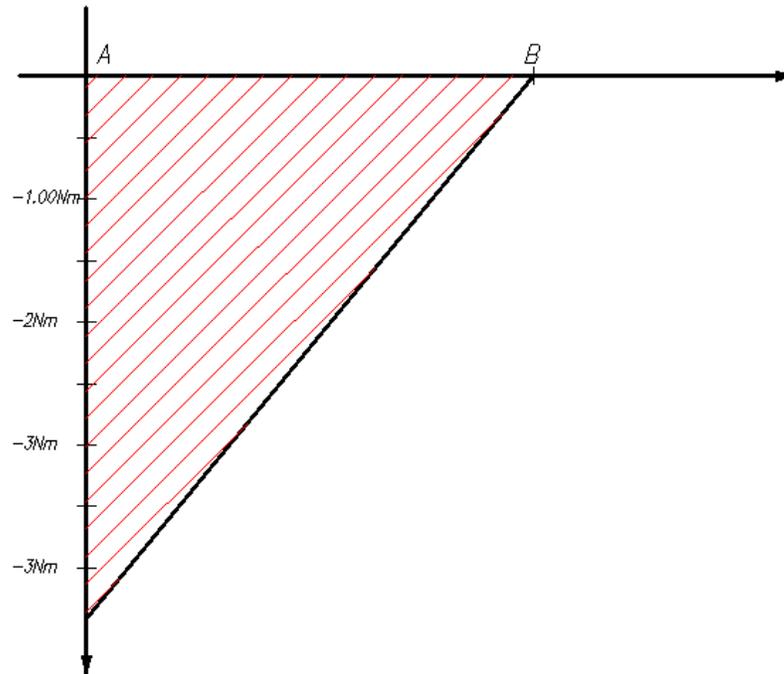


Figure 33: Diagrama de fuerza cortante y momento flector
Fuente: Autor

- Esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$M_{max} = 4.4145 Nm$$

$$c = 0.003 m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12}; \quad I = \frac{0.012 m * (0.006 m)^3}{12}; \quad I = 2.16 \times 10^{-10} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{4.4145 Nm * 0.003 m}{2.16 \times 10^{-10} m^4}; \quad \sigma_{flexion} = 61.31 MPa$$

- Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 49.05N$$

$$A = b * h; \quad A = 0.012m * 0.006m; \quad A = 7.2 \times 10^{-5}m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} = \frac{49.05N}{0.000072m^2} = \mathbf{0.68MPa}$$

Se utiliza un acero 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280Mpa$

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{admeisib}}; \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{flexion}}; \quad n = \frac{280MPa}{61.31MPa} \quad \mathbf{n = 4.57}$$

Para esfuerzo cortante tenemos

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{0.68MPa} \quad \mathbf{n = 237.59}$$

Ahora se procede a realizar el análisis de la probeta de aluminio rectangular y a diseñar al conjunto donde se fija la misma en la parte superior de la máquina de ensayos, en la figura 2.12 se puede observar a la probeta con una sección transversal de 25.4 x 25.4 x 1.2mm

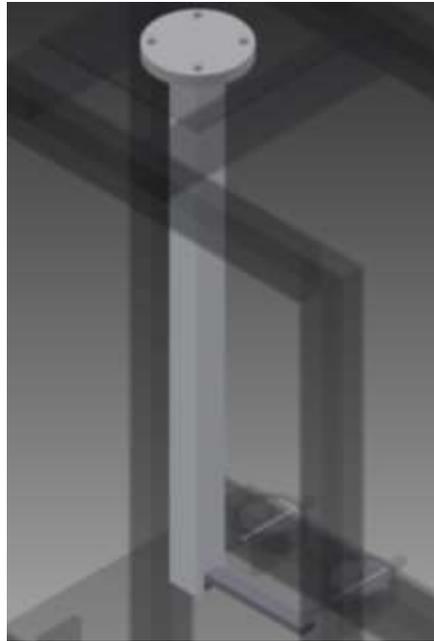


Figure 34: Probeta
Fuente: Autor

La mayor concentración de esfuerzos que se generan debido a la acción de la carga de 49.05N es en el empotramiento de la probeta, en la figura 2.13 se muestra el diagrama de cuerpo libre.



Figure 35: Diagrama del cuerpo libre
Fuente: Autor

La fuerza F en el empotramiento de la viga genera los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzo Cortante

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 49.05N$$

$$A = (b * h) - (b1 * h1)$$

$$A = (0.0254m * 0.0254m) - (0.023m * 0.023m)$$

$$A = 1.1616 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}; \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.0001616m^2}; \quad \tau_{max} = 0.422MPa$$

- Torque

$$\tau_{cortante} = \frac{T_{max} * c}{J}$$

$\tau_{cortante}$ = Esfuerzo cortante

T_{max} = Torque maximo

c = Distancia de la fibra mas lejana al eje neutro

J = Momento polar de inercia

$$T = F * d; \quad T = 49.05N * 0.09m; \quad T = 4.4145Nm$$

$$c = 0.0127m$$

$$J = \frac{1}{12}b * h * (b^2 + h^2) - \frac{1}{12}b1 * h1 * (b1^2 + h1^2)$$

$$J = \frac{1}{12}0.0254m * 0.0254m ((0.0254m)^2 + (0.0254m)^2) - \frac{1}{12}0.023m * 0.023m ((0.023m)^2 + (0.023m)^2)$$

$$J = 2.2732 \times 10^{-8} m^4$$

$$\tau_{cortante} = \frac{4.4145N * m * 0.0127m}{2.52732 \times 10^{-8} m^4}; \quad \tau_{cortante} = 2.456 MPa$$

- Momento Flector

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$M = F * D; \quad M = 49.05N * 0.407m; \quad M = 19.96Nm$$

$$c = 0.0127m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0254m * (0.0254m)^3}{12} - \frac{0.023m * (0.023m)^3}{12}$$

$$I = 1.1366 \times 10^{-8} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.96N * m * 0.0127m}{1.1366 \times 10^{-8} m^4}; \quad \sigma_{flexion} = 22.306 MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema, se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 22.306MPa$$

$$\tau_{cortante} = 2.456MPa$$

El esfuerzo equivalente será:

$$\sigma_{1.2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{1.2} = \frac{22.306Mpa}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{22.306Mpa}{2}\right)^2 + (2.456Mpa)^2}$$

$$\sigma_{max} = 22.573Mpa$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{21.487Mpa}{2}\right)^2 + (2.456Mpa)^2}$$

$$\tau_{max} = 11.420MPa$$

Para la probeta se utiliza una aleación de aluminio 6063 T5 con un valor de $S_y=145Mpa$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}; \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}; \quad n = \frac{145MPa}{22.573Mpa}; \quad n = 6.424$$

Para esfuerzo cortante se tiene:

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)145MPa}{11.420MPa}; \quad n = 7.326$$

Continuando con el análisis se realiza el estudio de la probeta circular, puesto que se tendrá dos secciones para realizar el ensayo y así establecer las propiedades del aluminio que se utilizó como referencia, para el análisis de la probeta circular se toman las mismas fuerzas que actúan en la probeta rectangular puesto que no se han modificado las condiciones del sistema de fuerzas.

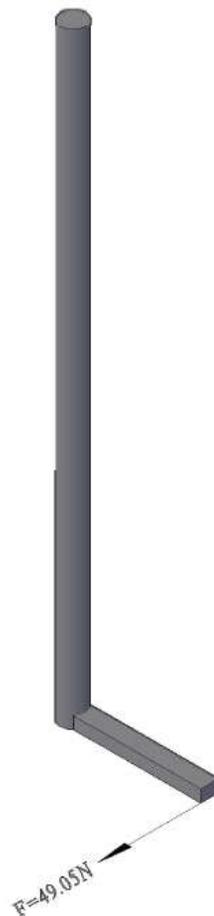


Figure 36: Diagrama del cuerpo libre
Fuente: Autor

- Esfuerzo Cortante

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 49.05N$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} - \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (0.0234m)^2}{4} - \frac{\pi * (0.0206m)^2}{4}$$

$$A = 4.30x10^{-4}m^2 - 3.33x10^{-4}m^2 = 9.70x10^{-5}m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}; \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.0000970m^2}; \quad \tau_{max} = 505.670KPa$$

- Torque

$$\tau_{cortante} = \frac{T_{max} * c}{J}$$

$$T = F * r; \quad T = 49.05 * 0.09m; \quad T = 4.414Nm$$

$$c = 0.0117m$$

$$J = \frac{1}{2}\pi * R^4 - \frac{1}{2}\pi * r^4$$

$$J = \frac{1}{2}\pi * 0.0117^4 - \frac{1}{2}\pi * 0.0103^4$$

$$J = 2.90x10^{-8} m^4 - 1.70 x10^{-8} m^4 = 1.20 x10^{-8} m^4$$

$$\tau_{cortante} = \frac{4.414N * m * 0.0117m}{1.20x10^{-8}m^4}; \quad \tau_{cortante} = 4.303MPa$$

- Momento Flector

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$M = F * D; \quad M = 49.05N * 0.407m; \quad M = 19.96Nm$$

$$c = 0.0117m$$

$$I = \frac{1}{4}\pi * R^4 - \frac{1}{4}\pi * r^4$$

$$I = \frac{1}{4}\pi * 0.0117^4 - \frac{1}{4}\pi * 0.0103^4$$

$$I = 1.40 \times 10^{-8} m^4 - 0.8 \times 10^{-8} m^4 = 6 \times 10^{-9} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.96N * m * 0.0117m}{6 \times 10^{-9}m^4}; \quad \sigma_{flexion} = 38.929MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 38.929MPa$$

$$\tau_{cortante} = 4.303MPa$$

El esfuerzo equivalente es:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{38.929\text{Mpa}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{38.929\text{Mpa}}{2}\right)^2 + 4.303\text{Mpa}^2}$$

$$\sigma_{max} = 39.399\text{Mpa}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{57.38\text{Mpa}}{2}\right)^2 + 4.303\text{Mpa}^2}$$

$$\tau_{max} = 19.934\text{MPa}$$

Para la probeta se utiliza una aleación de aluminio 6063 T5 con un valor de $S_y=145\text{Mpa}$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}; \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}; \quad n = \frac{145\text{MPa}}{39.399\text{MPa}} \quad n = 3.68$$

Para esfuerzo cortante tenemos

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)145\text{MPa}}{19.934\text{MPa}} \quad n = 4.198$$

Ahora se diseña el componente que sirve para fijar a la probeta rectangular, al igual que el caso anterior se toma en cuenta todos los esfuerzos combinados generados por la fuerza F , en la figura 2.15 se observa al elemento de fijación.

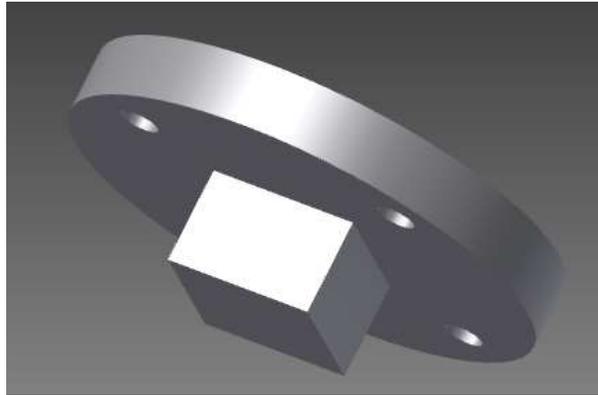


Figure 37: Elemento de fijación probeta rectangular
Fuente: Autor

- Esfuerzo Cortante

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 49.05N$$

$$A = (b * h); \quad A = (0.023m * 0.023m); \quad A = 5.29 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}; \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.000529m^2}; \quad \tau_{max} = 92.722KPa$$

- Torque

$$\tau_{cortante} = \frac{T_{max} * c}{J}$$

$$T = F * r; \quad T = 49.05N * 0.09m; \quad T = 4.414Nm$$

$$c = 0.0115m$$

$$J = \frac{1}{12}b * h * (b^2 + h^2)$$

$$J = \frac{1}{12}0.023m * 0.023m (0.023m^2 + 0.023m^2)$$

$$J = 4.664x10^{-8} m^4$$

$$\tau_{cortante} = \frac{4.414N * m * 0.0115m}{4.664x10^{-8}m^4}; \quad \tau_{cortante} = 1.08MPa$$

- Momento Flector

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$M = F * D; \quad M = 49.05N * 0.407m; \quad M = 19.963Nm$$

$$c = 0.0115m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12}; \quad I = \frac{0.023m * (0.023m)^3}{12}; \quad I = 2.332x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.963N * m * 0.0115m}{2.332x10^{-8}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 9.845MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 9.845MPa$$

$$\tau_{cortante} = 1.08MPa$$

El esfuerzo equivalente será:

$$\sigma_{1.2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{1.2} = \frac{9.845Mpa}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{9.845Mpa}{2}\right)^2 + (1.08Mpa)^2}$$

$$\sigma_{max} = 9.96Mpa$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{9.845}{2}\right)^2 + (1.08Mpa)^2}$$

$$\tau_{max} = 5.04MPa$$

Se utiliza un acero 1006 con un valor de $S_y=280MPa$, los factores de seguridad son:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}; \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}; \quad n = \frac{280MPa}{9.96MPa} \quad n = 28.106$$

Para esfuerzo cortante se tiene:

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{5.04MPa} \quad n = 32.05$$

Luego se analiza el elemento de fijación para la probeta circular con un diámetro de $d=20.6mm$, la siguiente imagen muestra la configuración de este componente:

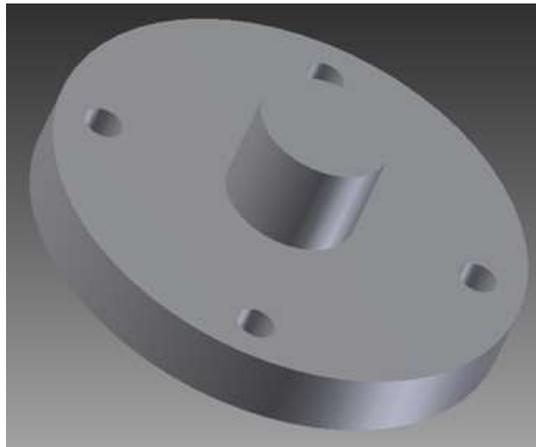


Figure 38: Elemento de fijación
Fuente: Autor

Los esfuerzos a las que está sometida la probeta son:

- Esfuerzo Cortante

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 49.05N$$

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}; \quad A = \frac{\pi * (0.0206m)^2}{4}; \quad A = 3.33 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}; \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.000333m^2}; \quad \tau_{max} = 147.29KPa$$

- Torque

$$\tau_{cortante} = \frac{T_{max} * c}{J}$$

$$T = F * r; \quad T = 49.05N * 0.09m; \quad T = 4.414Nm$$

$$c = 0.0117m$$

$$J = \frac{1}{2}\pi * r^4; \quad J = \frac{1}{2}\pi * (0.0103m)^4; \quad J = 1.70 * 10^{-8} m^4$$

$$\tau_{cortante} = \frac{4.414N * m * 0.0117m}{1.70 * 10^{-8} m^4}; \quad \tau_{cortante} = 3.03MPa$$

- Momento Flector

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$M = F * D; \quad M = 49.05N * 0.407m; \quad M = 19.963Nm$$

$$c = 0.0117m$$

$$I = \frac{1}{4}\pi * r^4; \quad I = \frac{1}{4}\pi * (0.0103m)^4; \quad I = 8 * 10^{-9} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.963Nm * 0.0117m}{8 * 10^{-9} m^4}; \quad \sigma_{flexion} = 29.196MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 29.196MPa$$

$$\tau_{cortante} = 3.03MPa$$

El esfuerzo equivalente es:

$$\sigma_{1.2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{1.2} = \frac{29.196Mpa}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{29.196Mpa}{2}\right)^2 + (3.03Mpa)^2}$$

$$\sigma_{max} = 29.507Mpa$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{29.196Mpa}{2}\right)^2 + 4.303Mpa^2}$$

$$\tau_{max} = 15.22MPa$$

Se utiliza un acero 1006 con límite elástico 280Mpa, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}; \quad n = \frac{Sy}{\sigma_{max}}; \quad n = \frac{280MPa}{29.507MPa} \quad n = 9.49$$

Para esfuerzo cortante tenemos

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{15.22MPa} \quad n = 10.61$$

Continuando con el análisis se diseña la base superior que soportará a la probeta; la misma tiene una sección de 146 x 146 x 4.2mm, además se dispone de cuatro pernos empleados para sujetar a la probeta, en la figura 2.17 se puede observar al conjunto armado.

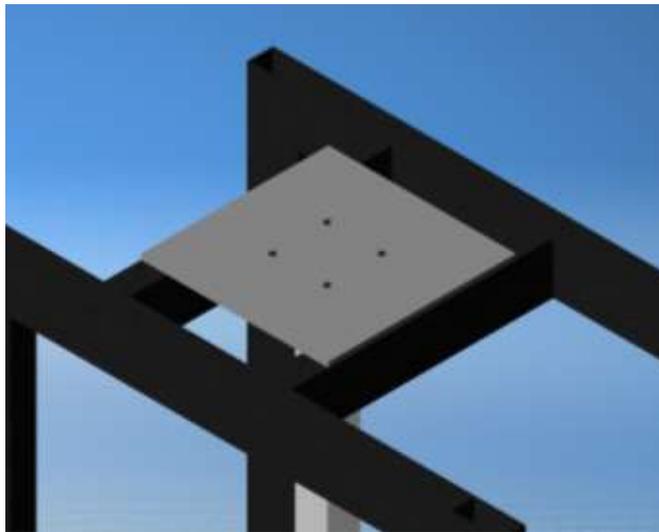


Figure 39: Placa de soporte superior
Fuente: Autor

Como primera parte se analiza a los 4 pernos, los mismos están bajo la acción de dos cargas la primera F' causada por la acción de la fuerza cortante y F'' generado por el torque del sistema de fuerzas, en el siguiente gráfico se observa el diagrama de fuerzas (Figura 2.18).

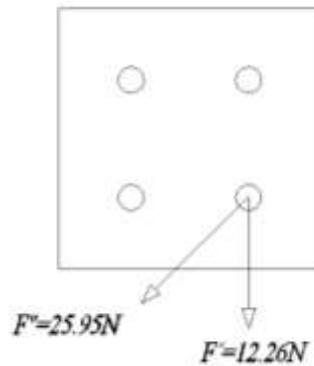


Figure 40: Diagrama de fuerzas pernos
Fuente: Autor

Las fuerzas que están presentes son:

$$F1' = \frac{V}{4} = \frac{49.05N}{4} = 12.26N$$

$$F1'' = \frac{M * r1}{r1^2 + r2^2 + r3^2 + r4^2}$$

$$F1'' = \frac{4.414Nm * 0.0425m}{(0.0425m)^2 + (0.0425m)^2 + (0.0425m)^2 + (0.0425m)^2}$$

$$F1'' = \frac{0.1875Nm^2}{7.225 \times 10^{-3}m^2} = 25.951N$$

La fuerza resultante es:

$$FR = \sqrt{(12.26N)^2 + (25.951N)^2}$$

$$FR = \sqrt{823.76N^2}$$

$$FR = 28.70N$$

El perno que se emplea es un M8 con un grado de dureza de 4.6 con las siguientes características:

$$A_t = 36.6 \text{ mm}^2$$

$$S_y = 240 \text{ Mpa}$$

El análisis del esfuerzo cortante es:

$$\tau = \frac{FR}{A_t} = \frac{28.70 \text{ N}}{0.0000366 \text{ m}^2} = \mathbf{0.784 \text{ MPa}}$$

$$\tau_{adm} = S_y * 0.577 = 240 \text{ Mpa} * 0.577 = \mathbf{138.48 \text{ Mpa}}$$

$$n = \frac{\tau_{adm}}{\tau} = \frac{138.48 \text{ Mpa}}{0.784 \text{ Mpa}} = \mathbf{176.63}$$

Por otro lado el análisis del esfuerzo de aplastamiento será:

$$\sigma = \frac{FR}{A} = \frac{Fr}{d * t}$$

$$d = 8 \text{ mm}$$

$$t = 4.2 \text{ mm}$$

$$\sigma = \frac{28.70 \text{ N}}{0.008 \text{ m} * 0.0042 \text{ m}} = \mathbf{0.854 \text{ MPa}}$$

$$\sigma_{adm} = 0.9 * S_y = 0.9 * 240 \text{ Mpa} = \mathbf{216 \text{ Mpa}}$$

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma} = \frac{216 \text{ Mpa}}{0.854 \text{ Mpa}} = \mathbf{252.92}$$

Ahora se realiza el análisis de la viga superior que sirve de soporte para la placa (Figura 2.19); para ello se considera el momento flector de 20.601Nm causado por la acción de la carga inicial que actúa en la probeta, en la figura 2.20 se observa la distribución de fuerzas y el diagrama del cuerpo libre.

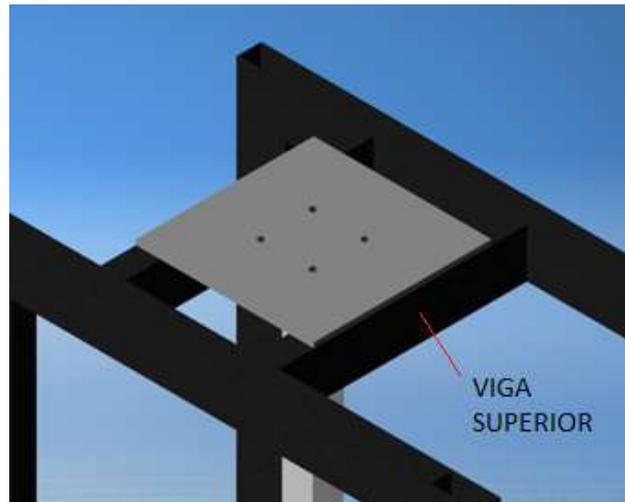


Figure 41: Viga superior lateral
Fuente: Autor

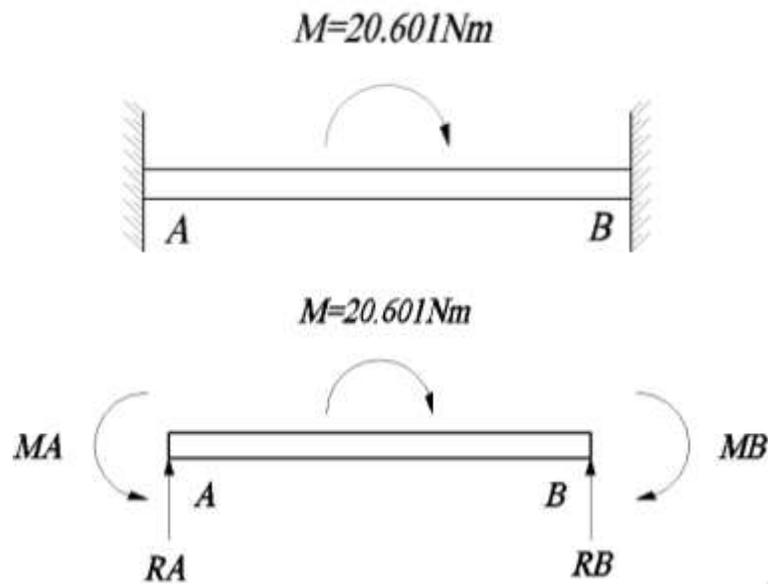


Figure 42: Diagrama del cuerpo libre de la viga
Fuente: Autor

$$R_A = \frac{6 * M * a}{L^2} \left(1 - \frac{a}{L}\right) = \frac{6 * 20.601N * m * 0.145m}{(0.291m)^2} \left(3 - \frac{0.145m}{0.291m}\right)$$

$$R_A = 106.1907N$$

$$M_A = M \left(-1 + 4 \frac{a}{L} - 3 \frac{a^2}{L^2}\right) = 20.601N * m \left(-1 + 4 \frac{0.145m}{0.291m} - 3 \frac{(0.145m)^2}{(0.291m)^2}\right)$$

$$M_A = 5.15025N * m$$

$$R_B = -\frac{6 * M * a}{L^2} \left(1 - \frac{a}{L}\right) = -\frac{6 * 20.601N * m * 0.145m}{(0.291m)^2} \left(3 - \frac{0.145m}{0.291m}\right)$$

$$R_B = -106.1907N$$

$$M_B = \frac{M * a}{L} * \left(2 - 3 \frac{a}{L}\right) = \frac{20.601N * m * 0.1455m}{0.291m} * \left(2 - 3 \frac{0.145m}{0.291m}\right)$$

$$M_B = 5.2033N * N * m$$

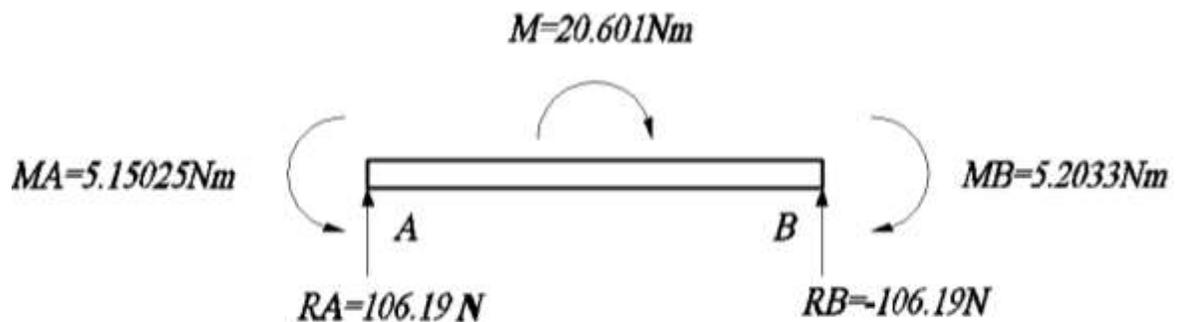


Figure 43: Diagrama del cuerpo libre de la viga
Fuente: Autor

El momento flector máximo es de: 20.601N

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$c = 0.0021mm$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0205 * (0.0402m)^3}{12} - \frac{0.0175 * (0.0372m)^3}{12}$$

$$I = 1.110x10^{-7}m^4 - 7.51x10^{-8}m^4$$

$$I = 3.59x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{20.601N * m * 0.0021m}{3.59x10^{-8}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 1.205MPa$$

Un acero 1006 CD (estirado en frio) tiene un límite elástico de 280Mpa, para el cual el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}; \quad n = \frac{Sy}{\sigma_{max}}; \quad n = \frac{280Mpa}{1.05MPa} \quad n = 232.3651$$

Ahora se realiza el análisis de la viga superior del bastidor que sirve como apoyo a sistema de fijación de la probeta, a continuación se muestra la ubicación de la viga en la máquina de ensayos.

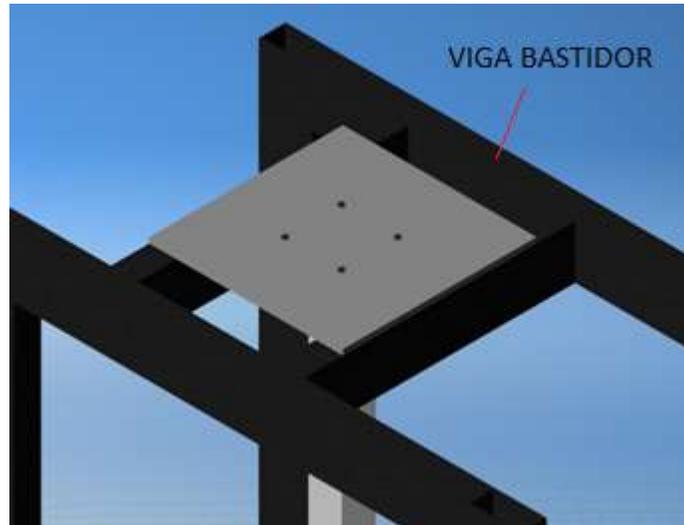


Figure 44: Viga superior
Fuente: Autor

La viga estará sujeta a los esfuerzos de flexión que actuarán en forma de torque debido a la disposición de la viga como se muestra a continuación en la figura 2.23:

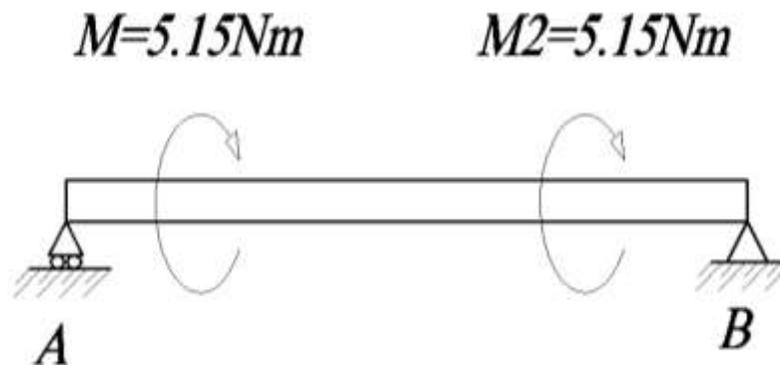


Figure 45: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

$$\tau_{cortante} = \frac{T_{max} * c}{J}$$

$$T = 5.15N * m$$

$$c = 0.0201m$$

$$J = \frac{1}{12} b_1 * h_1 * (b_1^2 + h_1^2) - \frac{1}{12} b * h * (b^2 + h^2)$$

$$J = \frac{1}{12} 0.0205m * 0.0402m (0.0205m^2 + 0.0402m^2) - \frac{1}{12} 0.0175m * 0.0372m (0.0175m^2 + 0.0372m^2)$$

$$J = 1.3984x10^{-7} m^4 - 9.1687x10^{-8} m^4$$

$$J = 4.81226x10^{-8} m^4$$

$$\tau_{cortante} = \frac{5.15N * m * 0.0201m}{4.812x10^{-8}m^4}; \quad \tau_{cortante} = 2.15MPa$$

Ahora se procede a encontrar el factor de seguridad de la viga; se utiliza un acero 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280MPa$

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{0.68MPa} \quad n = 237.59$$

Continuando con el análisis del conjunto se realiza el estudio de la platina inferior que sirve de soporte para el eje de rodillos y para los 2 relojes comparadores, la base se muestra en la siguiente figura

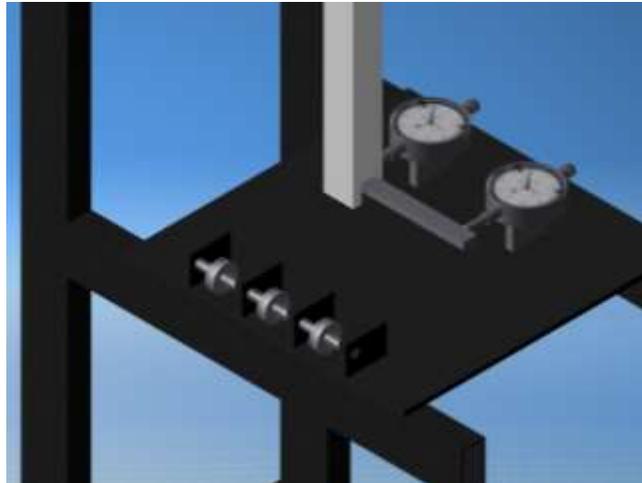


Figure 46: Base de soporte inferior
Fuente: Autor

En la platina inferior se apoya el eje de rodillos, por tal razón se genera una fuerza de 35.94N que es la reacción generada por uno de los apoyos del eje cuando actúa la fuerza inicial, además se considera el peso del reloj comparador (4N), de esta manera el diagrama del cuerpo libre es como se muestra en la figura 2.25:

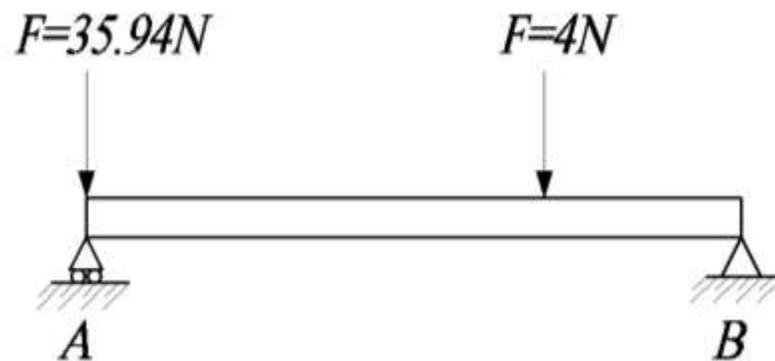


Figure 47: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

Al resolver el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes reacciones (figura 2.26):

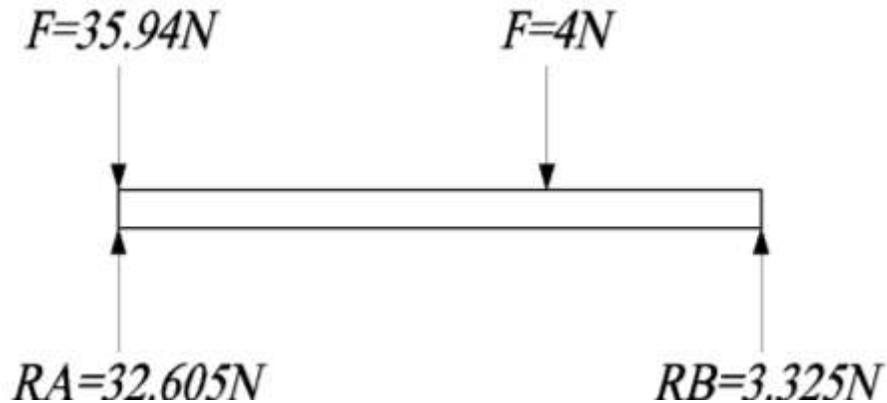


Figure 48: Diagrama del cuerpo libre
Fuente: Autor

El momento flector máximo del sistema es de: 0.68135Nm

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$c = 0.0021m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12}; \quad I = \frac{0.241m * (0.0042m)^3}{12}; \quad I = 1.500 \times 10^{-9} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{0.68136N * m * 0.0021m}{1.500^{-9} m^4}; \quad \sigma_{flexion} = 953.904 KPa$$

Un acero 1006 CD (estirado en frio) tiene un valor de $S_y=280Mpa$, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{280MPa}{0.954MPa} \quad n = 293.5$$

La fuerza cortante es de 35.94N

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$V = 35.94N$$

$$A = (b1 * h 1); \quad A = (0.241m * 0.0042m); \quad A = 1.5705 \times 10^{-3} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}; \quad \tau_{max} = \frac{35.94N}{0.00101m^2}; \quad \tau_{max} = 35.584KPa$$

Al igual que el caso anterior se usa un acero 1006 CD

$$n = \frac{0.577Sy}{\tau_{max}}; \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{0.35MPa} \quad n = 461.6$$

Continuando con el análisis se procede a diseñar la viga inferior que sirve de soporte para la máquina de ensayos, en la figura 2.27 se observa a la viga, la misma tiene un área de $1,76 \times 10^{-4} m^2$

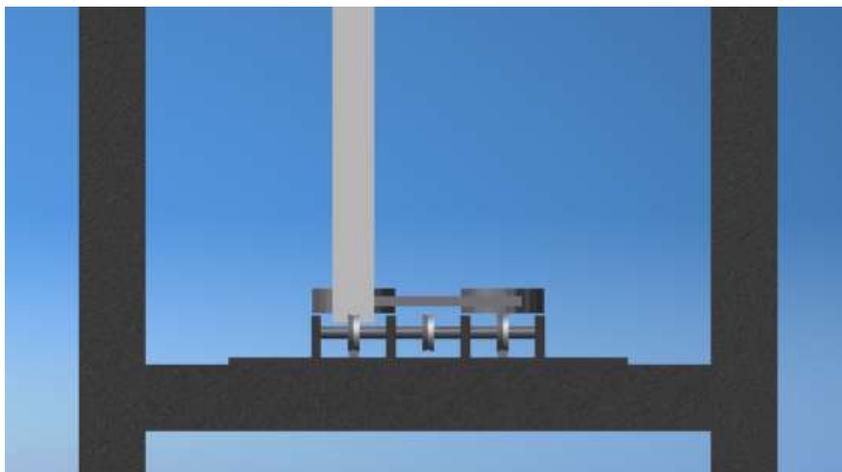


Figure 49: Viga inferior
Fuente: Autor

El diagrama del cuerpo libre es el mostrado en la figura 2.28

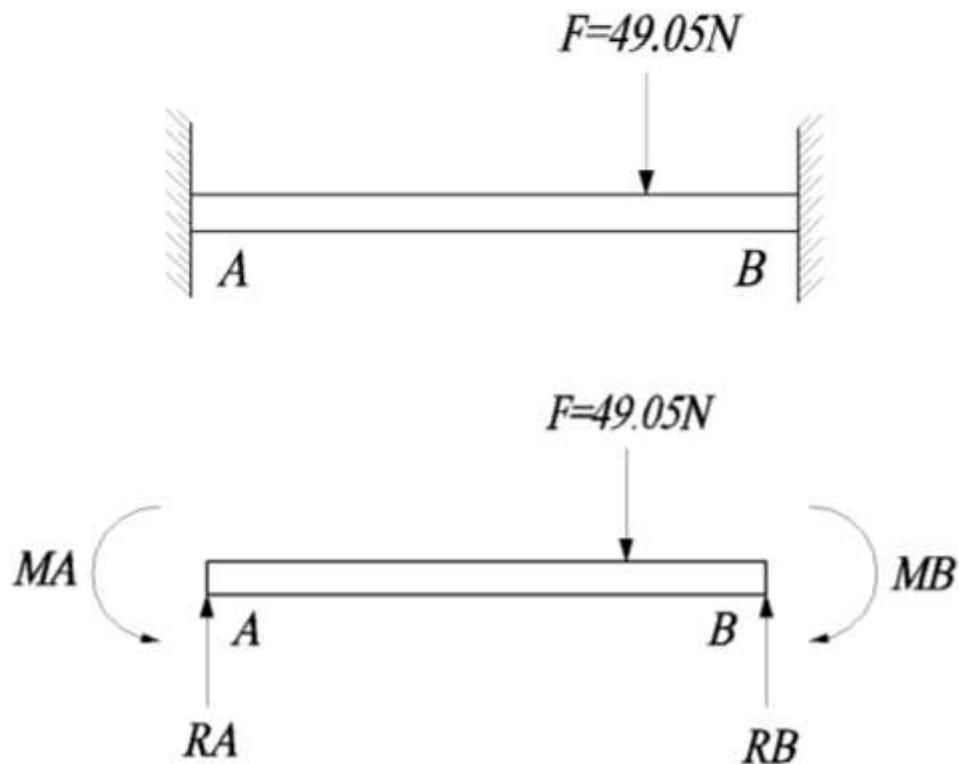


Figure 50: Diagrama del cuerpo libre
Fuente: Autor

Las reacciones se pueden determinar las siguientes ecuaciones:

$$R_A = \frac{F * b^2}{I^2} (3a + b) = \frac{49.05 * (0.1255m)^2}{(0.341m)^2} (3(0.2155) + 0.1255)$$

$$R_A = 6.6438N * 0.772 = 5.129N$$

$$R_B = \frac{F * a^2}{I^3} (3b + a) = \frac{49.05 * (0.2155m)^2}{(0.341m)^3} (3(0.1255) + 0.2155)$$

$$R_B = 57.4474N * 0.592 = 34N$$

$$MA = -\frac{F * a * b^2}{l^2}$$

$$MA = \frac{F * a * b^2}{l^2} = \frac{49.05N * 0.2155m * (0.1255)^2}{(0.341)^2}$$

$$MA = 1.4317N * m$$

$$MB = -\frac{F * a^2 * b}{l^2}$$

$$MB = -\frac{F * b * a^2}{l^2} = -\frac{49.05N * 0.1255m * (0.2155)^2}{(0.341)^2}$$

$$MB = -2.4585N * m$$

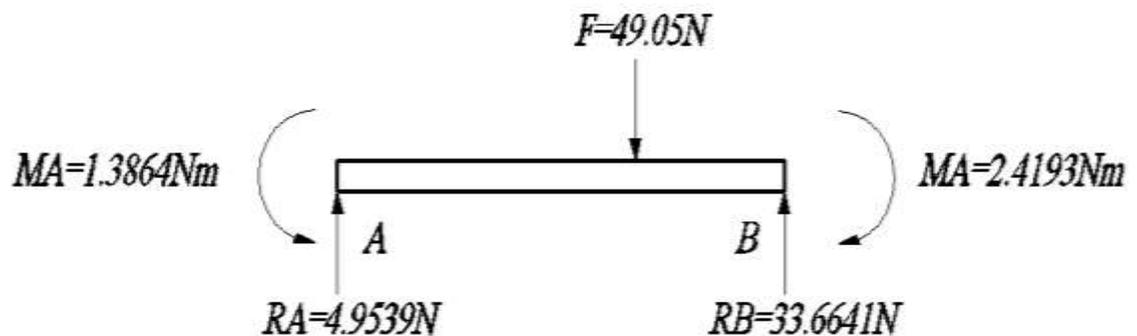


Figure 51: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

El esfuerzo Flexionante es:

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$M_{max} = F * d; \quad M_{max} = 49.05N * 0.2155m; \quad M_{max} = 10.57Nm$$

$$c = 0.0201m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0205 * (0.0402m)^3}{12} - \frac{0.0175 * (0.0372m)^3}{12}$$

$$I = 1.110x10^{-7}m^4 - 7.51x10^{-8}m^4$$

$$I = 3.59x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{2.4193N * m * 0.0201m}{3.59x10^{-8}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 1.345MPa$$

Para un acero 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280Mpa$, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{280MPa}{1.345MPa} \quad n = 208.17$$

Por otro lado la fuerza cortante es de 49.05

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = (b * h) - (b1 * h1)$$

$$A = (0.0205m * 0.0402m) - (0.0175m * 0.037m)$$

$$A = 8.24x10^{-4}m^2 - 6.475x10^{-4}m^2$$

$$A = 1.765x10^{-4}m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{1.765 \times 10^{-4} m^2} \quad \tau_{max} = 279.328 KPa$$

Al igual que el caso anterior se usa un acero 1006 CD

$$n = \frac{0.577 S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577) 280 MPa}{0.279 MPa} \quad n = 598.37$$

Finalmente se analiza la viga lateral del bastidor, que sirve como soporte de todo el conjunto, a continuación en la figura 2.30 se muestra la ubicación de la viga lateral.

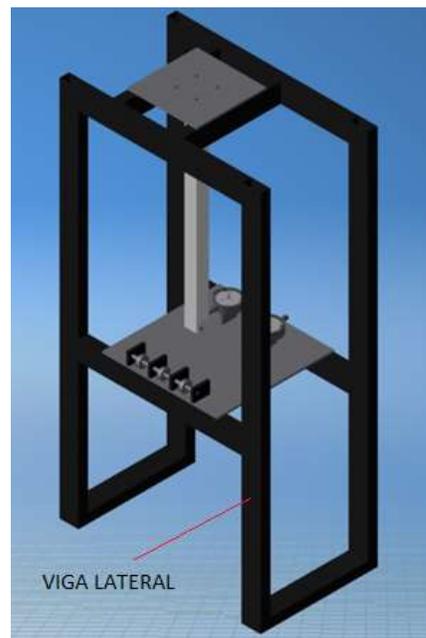


Figure 52: Ubicación de la viga lateral
Fuente: Autor

Al realizar el análisis de fuerzas que actúa en la viga se tendrá las fuerzas reaccionantes en la viga superior y en la viga intermedia; en la figura 2.31 se muestra la ubicación de fuerzas en la viga



Figure 53: Viga lateral
Fuente: Autor

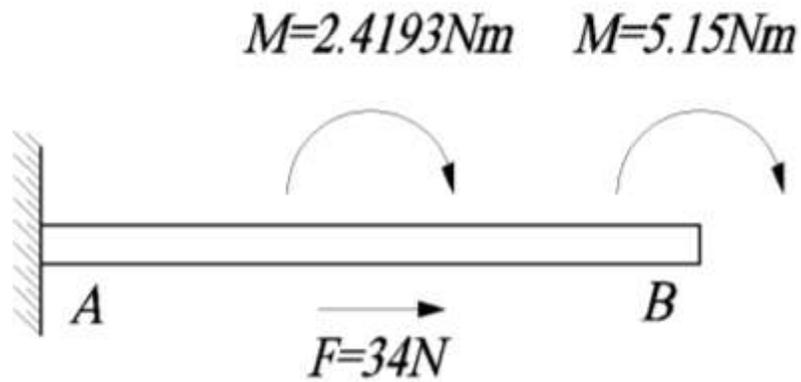


Figure 54: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

El diagrama del cuerpo libre es el mostrado en la figura 2.33:

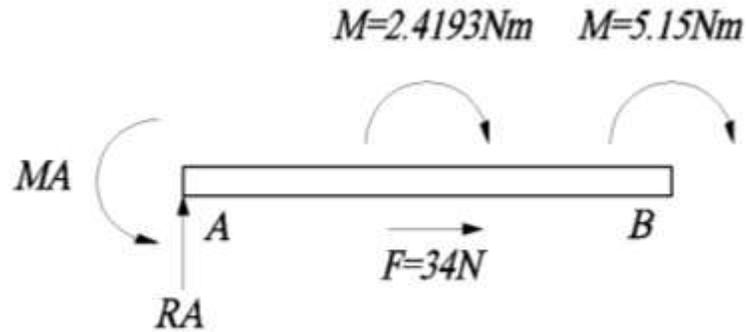


Figure 55: Diagrama del cuerpo libre.
Fuente: Autor

$$\sum MA = 0$$

$$MA - M1 - M2 = 0$$

$$MA = M1 + M2 = 2.4193Nm + 5.15Nm = 7.5491Nm$$

$$\sum M2 = 0$$

$$MA + RA * 0.8m - M1 - M2 = 0$$

$$RA = 0$$

El momento maximo es de 7.5491Nm, de esta manera se tendrá el siguiente analisis

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$c = 0.0201m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0205 * (0.0402m)^3}{12} - \frac{0.0175 * (0.0372m)^3}{12}$$

$$I = 1.110x10^{-7}m^4 - 7.51x10^{-8}m^4$$

$$I = 3.59x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{7.5491N * m * 0.0201m}{3.59x10^{-8}m^4}$$

$$\sigma_{flexion} = 4.616MPa$$

Para un acero 1006 CD (estirado en frio) el valor de $S_y=280MPa$, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{280MPa}{4.616MPa} \quad n = 60.55$$

El esfuerzo axial es el siguiente:

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

$$F = 34N$$

$$A = (b * h) - (b1 * h1);$$

$$A = (0.0402m * 0.0205m) - (0.0372m * 0.0175m);$$

$$A = 1.731 \times 10^{-4} m^2$$

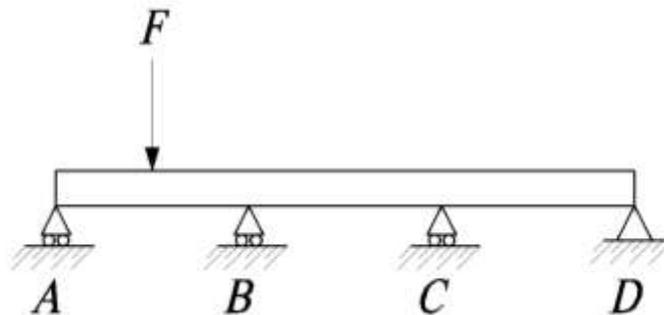
$$\sigma = \frac{V}{A}; \quad \sigma = \frac{34N}{1.7314 \times 10^{-4} m^2}; \quad \sigma = 196.41 KPa$$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma} \quad n = \frac{280 MPa}{0.196 MPa} \quad n = 1428.57$$

2.1.2.2 Segundo caso

Para la segunda parte del análisis se coloca la carga en la primera polea del eje de rodillos, al igual que el primer caso se coloca una carga de 5Kg, de esta manera en la probeta se genera únicamente flexión. Si se considera los cuatro apoyos de la viga y se aplica la carga en la polea de la derecha para generar la deflexión en la probeta se tiene el siguiente sistema de fuerzas (figura 2.34).



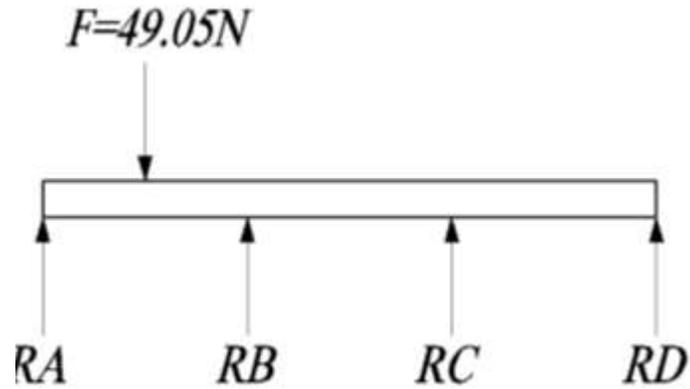


Figure 56: Diagrama de cuerpo libre
Fuente: Autor

Utilizando el software de elementos finitos las reacciones son las mostradas en la figura 2.35:

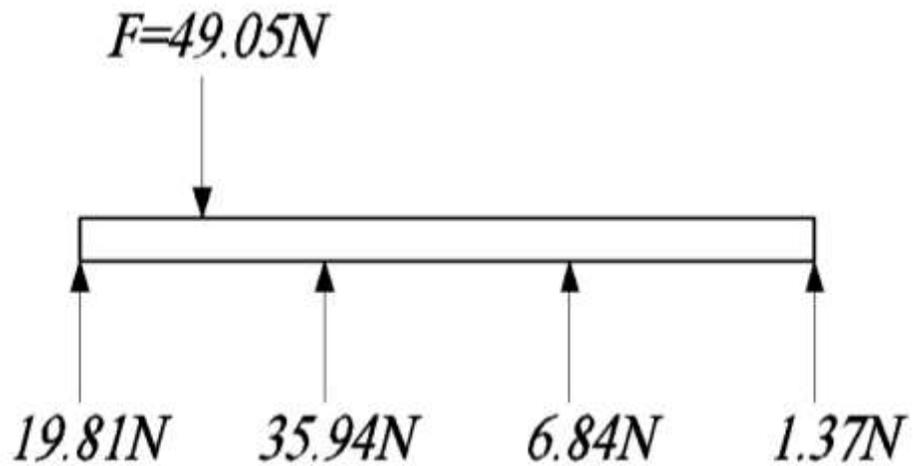


Figure 57: Resultados del análisis
Fuente: Autor

El diagrama del momento flector es el de la figura 2.36

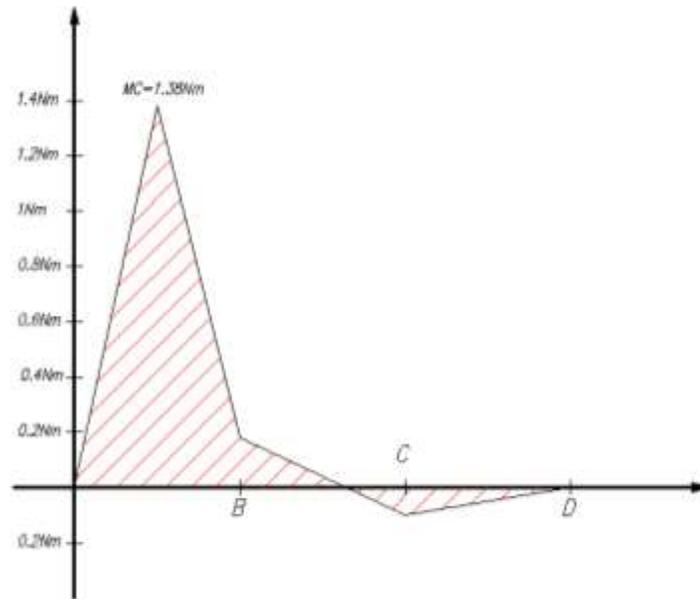


Figure 58: Diagrama de fuerza cortante y momento flector
Fuente: Autor

El momento flector máximo será de 1.38Nm, con este valor el esfuerzo de flexión es:

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$c = 0.004m$ (Distancia de la fibra más lejana al eje neutro)

$$I = \frac{\pi * r^4}{4} \quad I = \frac{\pi * (0.00376m)^4}{4} \quad I = 1.56 * 10^{-10} m^4 \text{ (Momento de inercia)}$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{1.38N * m * 0.00376m}{2.01 * 10^{-10} m^4} \quad \sigma_{flexion} = 25.81 MPa$$

El esfuerzo cortante es:

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = \pi * r^2 \quad A = \pi * (0.00376m)^2 \quad A = 4.44 * 10^{-5} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.0000444m^2} \quad \tau_{max} = 1.104MPa$$

Al igual que el primer caso se utiliza un acero 1006 CD (estirado en frío) con un valor de $S_y=280MPa$, el valor del factor de seguridad para flexión es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{admisible}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{flexion}} \quad n = \frac{280MPa}{25.81MPa} \quad n = 10.84$$

Para esfuerzo cortante tenemos

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{1.104MPa} \quad n = 146.34$$

Ahora se procede a diseñar al conjunto donde se fija la probeta de aluminio en la parte superior de la máquina de ensayos, en la figura 2.37 se puede observar a la probeta con una sección transversal de 25.4 x 25.4 x 1.2mm; no se analiza la palanca de torsión puesto que no actúa el torque en el sistema.

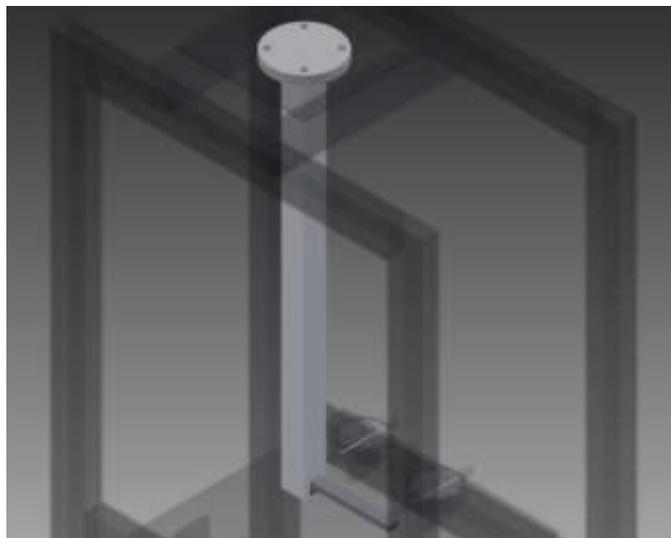


Figure 59: Probeta
Fuente: Autor

Los esfuerzos que se toman en cuenta para el análisis del sistema serán los mostrados en la figura 2.38:

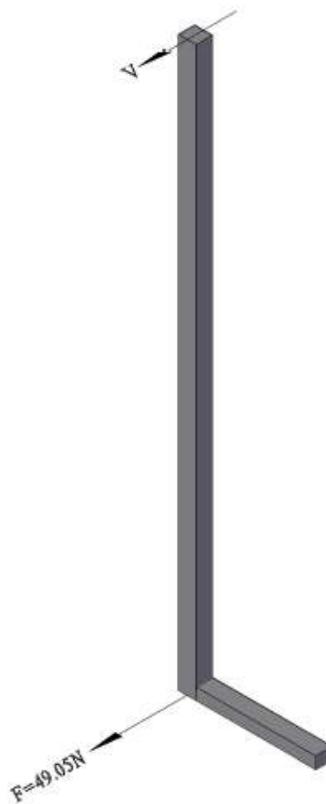


Figure 60: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

La fuerza F en el empotramiento de la viga genera los siguientes esfuerzos:

- Esfuerzo Cortante

$$V = 49.05N$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = (b * h) - (b1 * h1)$$

$$A = (0.0254m * 0.0254m) - (0.023m * 0.023m)$$

$$A = 1.1616 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.0001616m^2} \quad \tau_{max} = 0.422MPa$$

- Esfuerzo flector

$$M = F * D \quad M = 49.05N * 0.407m \quad M = 19.96Nm$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$c = 0.0127m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0254m * (0.0254m)^3}{12} - \frac{0.023m * (0.023m)^3}{12}$$

$$I = 1.1366x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.96N * m * 0.0127m}{1.1366x10^{-8}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 22.306MPa$$

Por la configuración de las fuerzas se tiene que el esfuerzo de flexión es de mayor valor:

$$\sigma_{flexion} = 22.306MPa$$

Al igual que el primer casos se utiliza una aleación de aluminio 6063 T5 con un valor de $S_y=145Mpa$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{145MPa}{22.306MPa} \quad n = 6.5$$

Para esfuerzo cortante se tiene

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577)145MPa}{0.422MPa} \quad n = 198.25$$

Continuando con el análisis se realiza el estudio de la probeta circular tomando en cuenta las mismas fuerzas que actúan en la probeta rectangular

- Esfuerzo Cortante

$$V = 49.05N$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} - \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (0.0234m)^2}{4} - \frac{\pi * (0.0206m)^2}{4}$$

$$A = 4.30 \times 10^{-4} m^2 - 3.33 \times 10^{-4} m^2 = 9.70 \times 10^{-5} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}$$

$$\tau_{max} = \frac{49.05N}{0.0000970m^2}$$

$$\tau_{max} = 505.670KPa$$

- Momento Flector

$$M = F * D$$

$$M = 49.05N * 0.407m$$

$$M = 19.96Nm$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$c = 0.0117m$$

$$I = \frac{1}{4}\pi * R^4 - \frac{1}{4}\pi * r^4$$

$$I = \frac{1}{4}\pi * 0.0117^4 - \frac{1}{4}\pi * 0.0103^4$$

$$I = 1.40x10^{-8} m^4 - 0.8 x10^{-8} m^4 = 6x10^{-9} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{19.96N * m * 0.0117m}{6x10^{-9}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 38.929MPa$$

El esfuerzo máximo es:

$$\sigma_{flexion} = 38.929MPa$$

Para la probeta se usa una aleación de aluminio 6063 T5 con un valor de $S_y=145Mpa$

El factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{145MPa}{38.929MPa} \quad n = 3.72$$

Para esfuerzo cortante se tiene:

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577)145MPa}{0.505MPa} \quad n = 165.67$$

Ahora se diseña el componente que sirve para fijar a la probeta rectangular, en la figura 2.39 se observa al elemento de fijación.



Figure 61: Elemento de fijación
Fuente: Autor

Se usa un acero 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280Mpa$, los esfuerzos son:

- Esfuerzo Cortante

$$V = 49.05N$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = (b * h)$$

$$A = (0.023m * 0.023m)$$

$$A = 5.29 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A}$$

$$\tau_{max} = \frac{49.05N}{0.000529m^2}$$

$$\tau_{max} = 92.722KPa$$

- Momento Flector

$$M = F * D$$

$$M = 49.05N * 0.420m$$

$$M = 20.601Nm$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{Mmax * c}{I}$$

$$c = 0.0115m$$

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$I = \frac{0.023m * (0.023m)^3}{12}$$

$$I = 2.332 \times 10^{-8} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{20.601N * m * 0.0115m}{2.332 \times 10^{-8} m^4}$$

$$\sigma_{flexion} = 10.159MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 10.159MPa$$

$$\tau_{cortante} = 1.08MPa$$

Para un acero 1006 con un valor de $S_y=280MPa$, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{280MPa}{10.159MPa}$$

$$n = 27.5617$$

Para esfuerzo cortante se tiene

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{1.08MPa} \quad n = 149.592$$

Continuando con el análisis se realiza el estudio del elemento de fijación para la probeta circular con un diámetro de $d=20.6mm$, los esfuerzos a las que está sometida la probeta son:

- Esfuerzo Cortante

$$V = 49.05N$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad A = \frac{\pi * (0.0206m)^2}{4} \quad A = 3.33 \times 10^{-4} m^2$$

$$\tau_{max} = \frac{V}{A} \quad \tau_{max} = \frac{49.05N}{0.000333m^2} \quad \tau_{max} = 147.29KPa$$

- Momento Flector

$$M = F * D \quad M = 49.05N * 0.420m \quad M = 20.601Nm$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$c = 0.0117m$$

$$I = \frac{1}{4} \pi * r^4$$

$$I = \frac{1}{4} \pi * (0.0103m)^4$$

$$I = 8 \times 10^{-9} m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{20.601N * m * 0.0117m}{8 \times 10^{-9} m^4} \quad \sigma_{flexion} = 30.128MPa$$

Si se analiza el punto más crítico del sistema se tiene:

$$\sigma_{flexion} = 30.128MPa$$

$$\tau_{cortante} = 0.147MPa$$

Se obtiene el factor de seguridad tomando en cuenta un acero 1006 con un valor de $S_y=280MPa$

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{280MPa}{30.128MPa} \quad n = 9.2936$$

Para esfuerzo cortante tenemos

$$n = \frac{0.577S_y}{\tau_{max}} \quad n = \frac{(0.577)280MPa}{0.147MPa} \quad n = 1099.047$$

Ahora se diseña la base que soportara a la probeta; la misma tiene una sección de 146 x 146 x 4.2mm, además se dispone de cuatro pernos empleados para sujetar a la probeta, en la figura 2.40 se puede observar al conjunto armado.

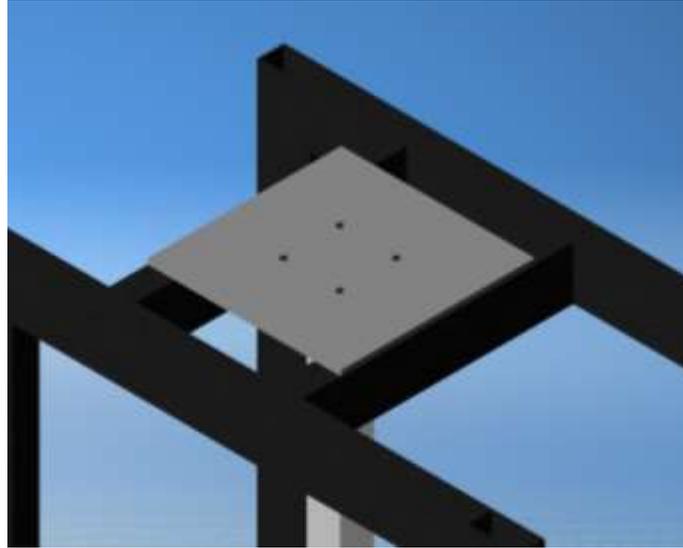


Figure 62: Placa de soporte
Fuente: Autor

Como primera parte se analiza a los 4 pernos, si consideramos el estudio de fuerzas realizado anteriormente se tendrá el siguiente diagrama de fuerzas:

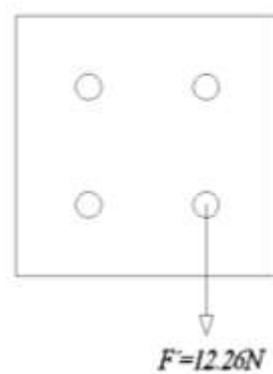


Figure 63: Diagrama de fuerzas
Fuente: Autor

Las fuerzas que están presentes son:

$$F1'' = V = 49.05N$$

El perno que se emplea es un M8 con un grado de dureza de 4.6 con las siguientes características:

$$At = 36.6mm^2$$

$$Sy = 240Mpa$$

El análisis del esfuerzo cortante es:

$$\tau = \frac{FR}{At} = \frac{49.05N}{0.0000366m^2} = 1.34MPa$$

$$\tau_{adm} = Sy * 0.577 = 240Mpa * 0.577 = 138.48Mpa$$

$$n = \frac{\tau_{adm}}{\tau} = \frac{138.48Mpa}{1.34Mpa} = 103.34$$

Por otro lado el análisis del esfuerzo de aplastamiento será:

$$\sigma = \frac{FR}{A} = \frac{Fr}{d * t}$$

$$d = 8mm$$

$$t = 4.2mm$$

$$\sigma = \frac{49.05N}{0.008m * 0.0042m} = \mathbf{1.459MPa}$$

$$\sigma_{adm} = 0.9 * S_y = 0.9 * 240Mpa = \mathbf{216Mpa}$$

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma} = \frac{216Mpa}{1.459Mpa} = \mathbf{148.04}$$

Se realiza el de análisis de la viga superior; se considera un momento flector de 20.601Nm causado por la acción de la carga inicial.

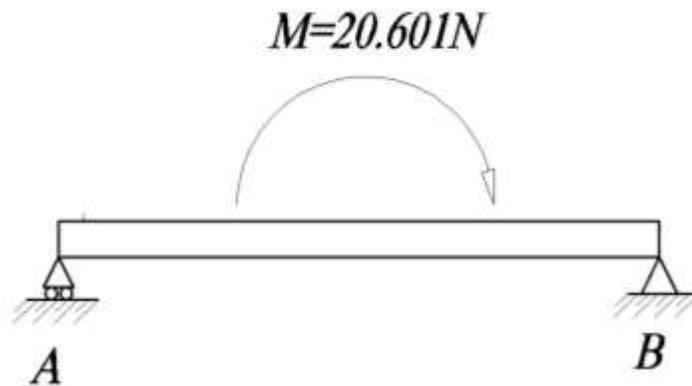


Figure 64: Diagrama del cuerpo libre viga superior
Fuente: Autor

El momento flector máximo es de: 20.601N

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{max} * c}{I}$$

$$c = 0.0021mm$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} - \frac{b1 * h1^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0205 * (0.0402m)^3}{12} - \frac{0.0175 * (0.0372m)^3}{12}$$

$$I = 1.110x10^{-7}m^4 - 7.51x10^{-8}m^4$$

$$I = 3.59x10^{-8}m^4$$

$$\sigma_{flexion} = \frac{20.601N * m * 0.0021m}{3.59x10^{-8}m^4} \quad \sigma_{flexion} = 1.205MPa$$

Se utiliza un acero 1006 CD (estirado en frio) con un valor de $S_y=280MPa$, el factor de seguridad es:

$$n = \frac{\sigma_{fluencia}}{\sigma_{adm}} \quad n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad n = \frac{280MPa}{1.05MPa} \quad n = 232.3651$$

2.1.3 Análisis en un software de métodos finitos

A continuación se realiza el análisis de la máquina de ensayos en un software de métodos finitos, en este caso se utilizó el programa de computadora ANSYS, este software es ampliamente utilizado en diversas áreas de la ingeniería debido a que posee una gran variedad de herramientas que permiten resolver problemas de alta complejidad de estructuras, fluidos, calor, magnetismo, y otras áreas. En la figura 2.43 se observa la interface del software

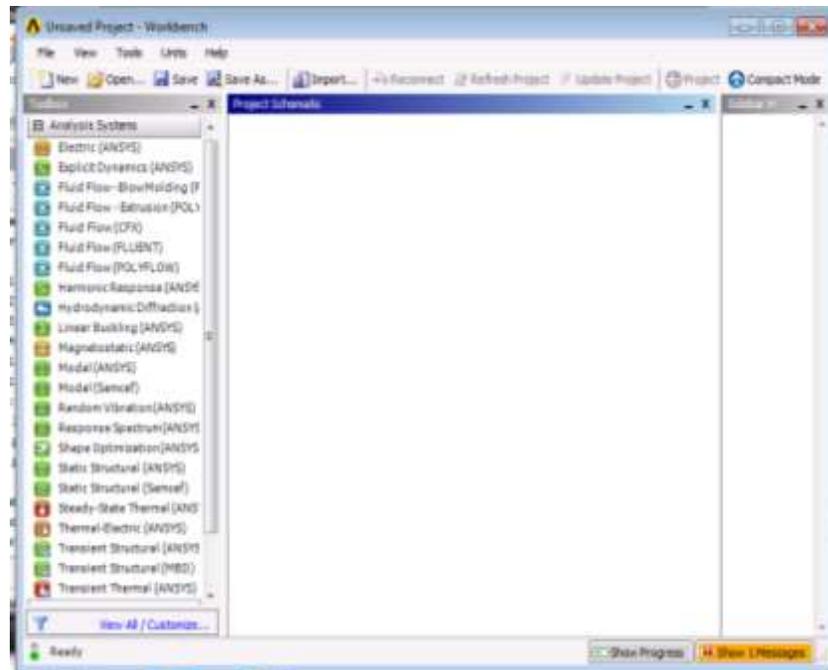


Figure 65: Interface del software ANSYS
Fuente: Autor

Los resultados del analisis en el software son::

- La deformacion total

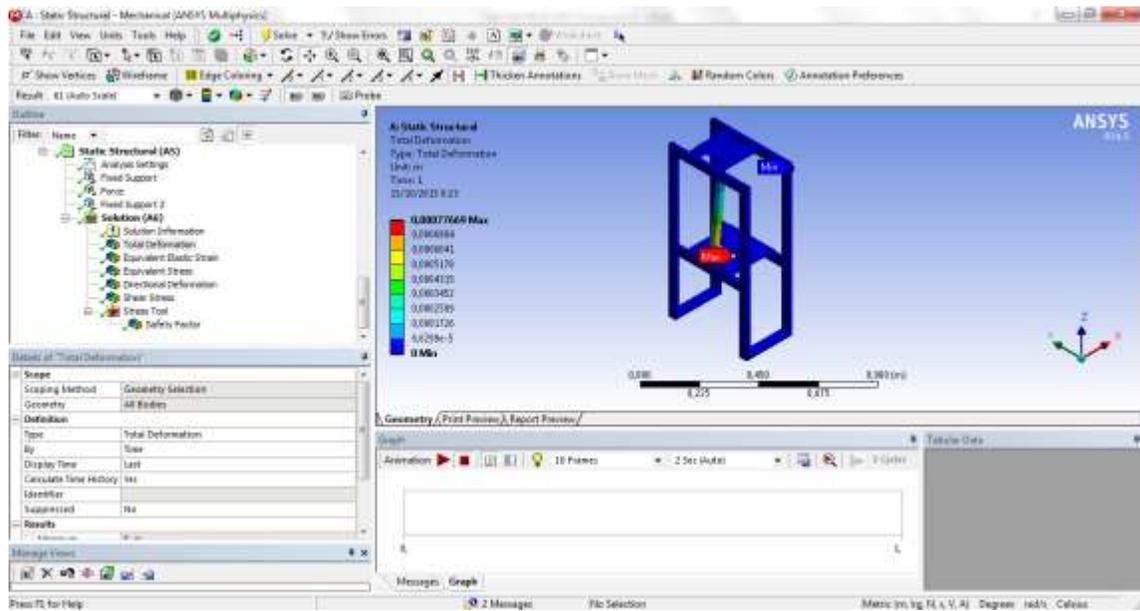


Figure 66: Deformación total
Fuente: Autor

- El esfuerzo equivalente de Von Mises

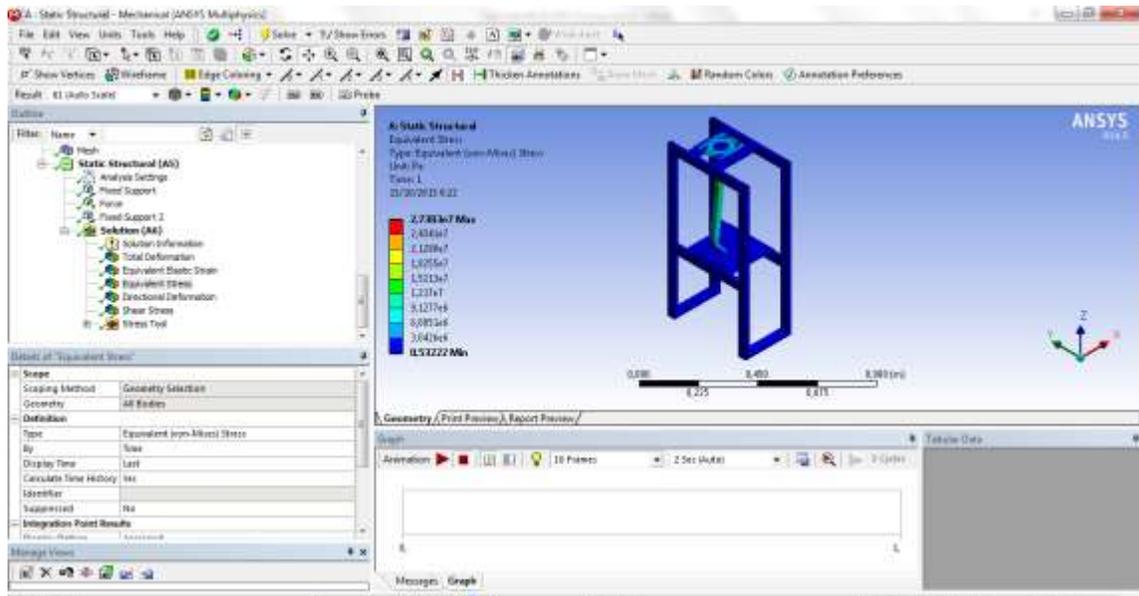


Figure 67: Esfuerzo equivalente de Von Mises
Fuente: Autor

- El esfuerzo cortante

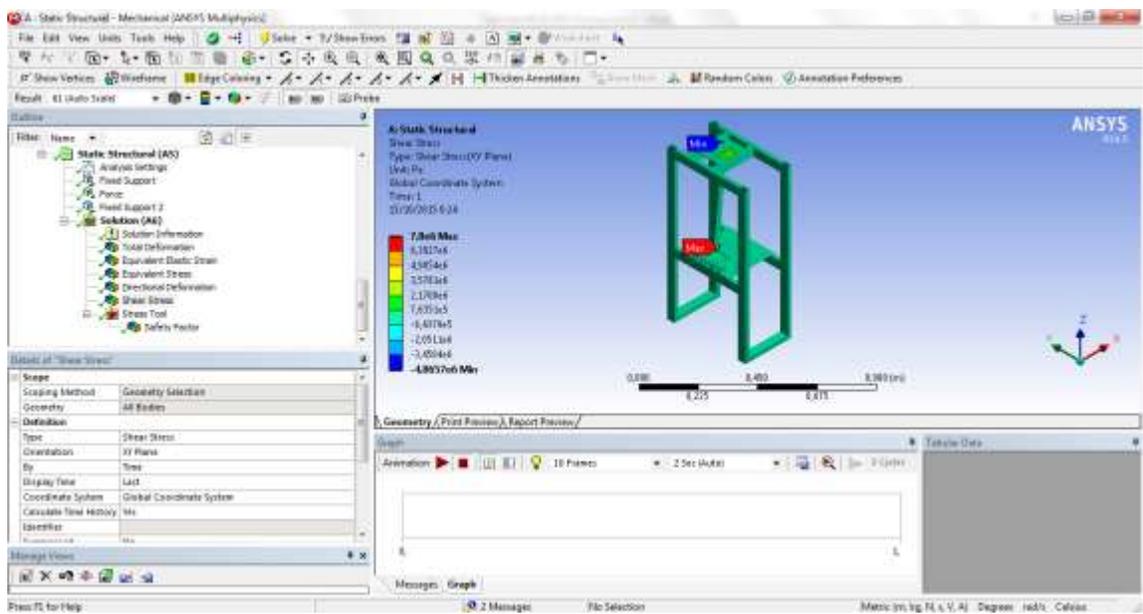


Figure 68: Esfuerzo cortante
Fuente: Autor

- El factor de seguridad a caga estática

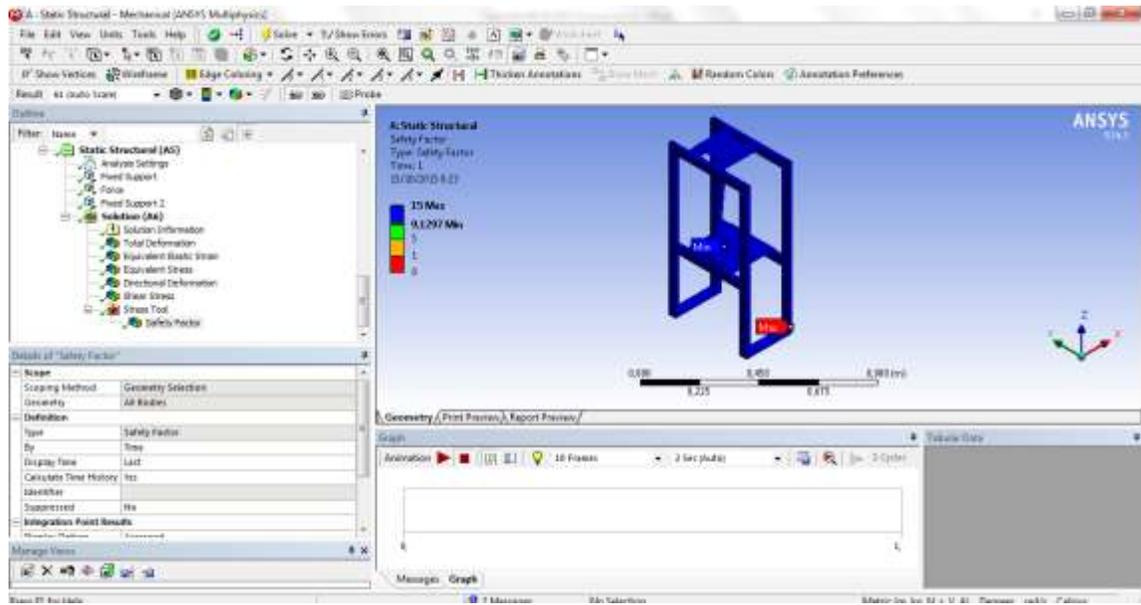


Figure 69: Factor de seguridad
Fuente: Autor

CAPITULO 3

CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO

En este capítulo se detallará el proceso de fabricación que se emplea para la construcción de los diferentes componentes de la máquina de ensayos según el diseño y la selección de materiales realizados en el capítulo anterior, de esta manera, se garantizara la fiabilidad a carga estática y otros factores que se generan durante el funcionamiento de la máquina, también se tomara en cuenta las herramientas y equipos especiales que se requerirán durante el proceso de construcción.

3.1 Procesos de fabricación

Para la fabricación de los diferentes componentes se realizará un diagrama de proceso con el cual se define el sistema adecuado de producción según el diseño de cada elemento; de esta manera se tiene una secuencia lógica y se puede definir la distancia, el tiempos y las inspecciones durante todo el proceso de fabricación. La simbología utilizada en el diagrama de fabricación se representa gráficamente como se muestra a continuación:

- Operación (○): Se presenta en el momento en el cual se altera de cualquier forma al objeto o material de la operación.
- Transporte (⇔): Es el momento en el cual se debe cambiar de estación de trabajo o movilizar a la pieza para su almacenaje, se deberá definir la distancia recorrida.
- Control (□): Durante el proceso de producción se debe verificar que se estén cumpliendo con las medidas o estándares definidos en el diseño.
- Demora (▷): Se da cuando por alguna circunstancia no se puede continuar con el proceso de forma fluida.
- Almacenaje (▽): Se dará el momento en el cual ya no se deba realizar más cambios a la pieza en trabajo, para protegerla o guardarla.

En los siguientes procesos de trabajo se detalla los pasos para la fabricación de cada elemento necesario en la maquina:

3.1.1 Proceso de fabricación: Bastidor

El diseño del bastidor a seguir es el siguiente (Figura 3.1):

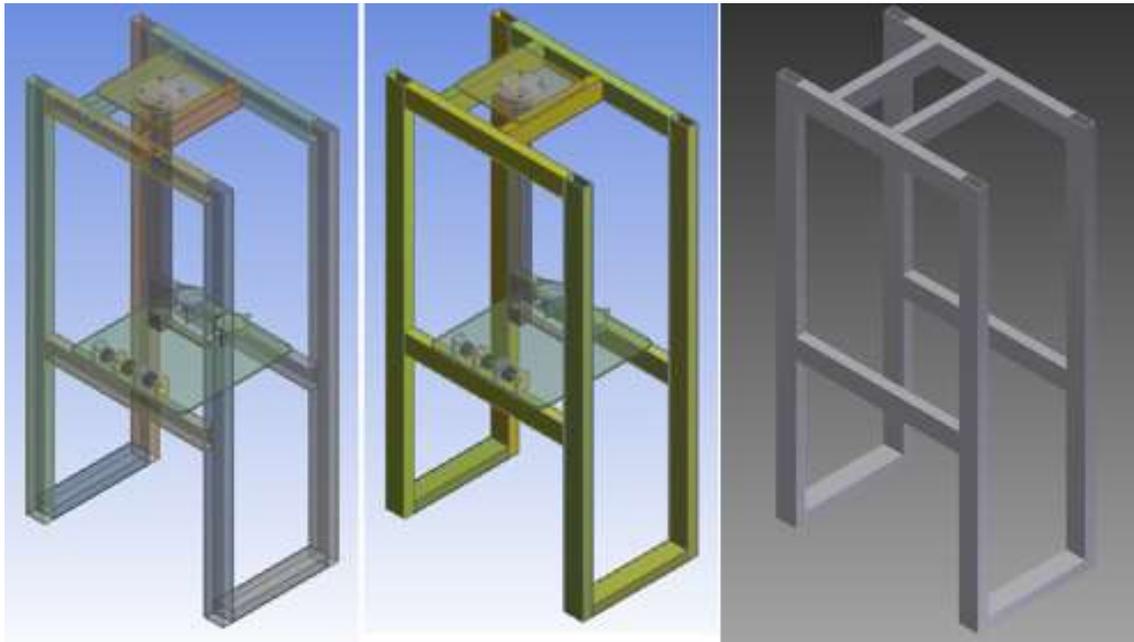


Figure 70: Bastidor
Fuente: Autor

El proceso de trabajo de este elemento es el siguiente:

Tabla 3.1: Proceso de trabajo #1 para construcción del bastidor

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 01		
				RESUMEN		
Trabajo:	Construcción del bastidor	ACCIONES		N°	Dist.	Tie.
Material:	Tubo rectangular 40mm x 20mm x 1,2mm AISI 1006		Operación	14		211
Inicio:	Bodega		Transporte	4	74	28
Fin:	Bodega		Control	4		37
Preparado por:	Andrés Rivera		Demora	4		10

Fecha:		10 de Marzo / 2015					▼	Almacenaje	1		
							TOTAL	27	74	286	
PASON°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES	
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje					
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽					
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30	2	10		
3	Obtención de herramientas de medición	●	⇄	□	□	▽			5	Necesario flexómetro	
4	Obtención de herramientas de trazado	●	⇄	□	□	▽			5	Necesario rayador y escuadra	
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		4	15	Trazar a 80cm de distancia	
6	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		4	15	Trazar a 34.1cm de distancia	
7	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		4	15	Trazar a 20.4cm de distancia	
8	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4	2	8		
9	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽		6	6		
10	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽		16	40	Cortar sobre la línea trazada	
11	Cambio de herramienta manual	○	⇄	□	■	▽			2	Utilizar lima plana	
12	Remover excesos	●	⇄	□	□	▽			30	Todos los extremos	
13	Cambio de herramienta de medición	○	⇄	□	■	▽			2	Flexómetro	
14	Verificación de medidas y perpendicularidad	○	⇄	■	□	▽			15	Flexómetro y escuadra	
15	Traslado de elementos a mesa de soldadura	○	➔	□	□	▽	10		5		
16	Clasificación elementos por medidas	○	⇄	■	□	▽			5		
17	Preparación soldadora	●	⇄	□	□	▽			10		
18	Preparación elementos para soldar	●	⇄	□	□	▽			15	Verificar perpendicularidad con escuadra	
19	Colocación de puntos de suelda	●	⇄	□	□	▽		12	25		
20	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Herramientas de medida y comprobación	
21	Verificación de medidas y perpendicularidad	○	⇄	■	□	▽			12		
22	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			4	Soldadora	
23	Realizar cordón de suelda	●	⇄	□	□	▽			35	Todas las uniones en contacto	
24	Verificación de cordones de suelda	○	⇄	■	□	▽			10		
25	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			15		
26	Traslado del bastidor a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		5		
27	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼					



3.1.2 Proceso de fabricación: Placa inferior

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.2):

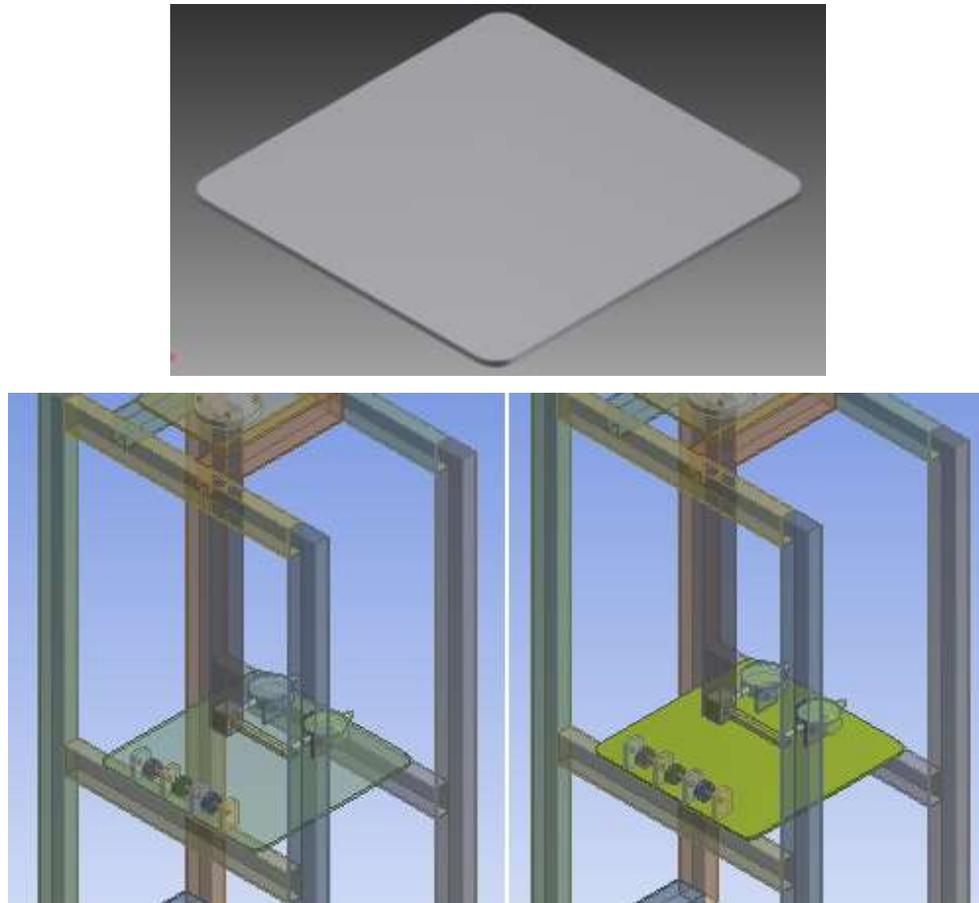
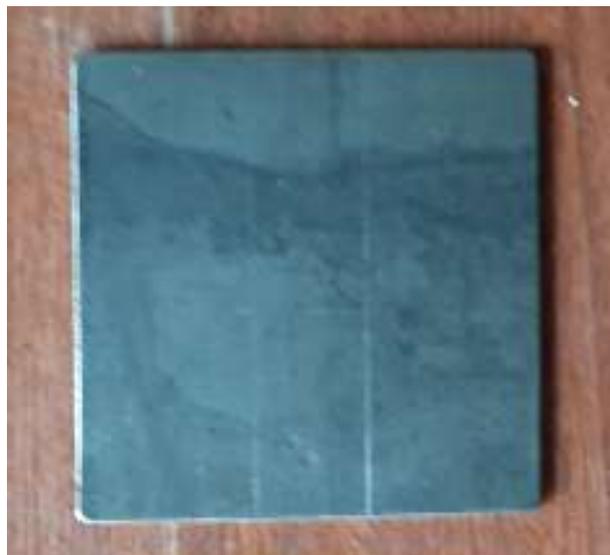


Figure 71: Placa inferior
Fuente: Autor

Tabla 3.2: Proceso de trabajo #2 para construcción de la placa inferior

PROCESO DE TRABAJO					
UNIVERSIDAD DEL AZUAY			N° 02		
			RESUMEN		
Trabajo:	Construcción de la placa inferior	ACCIONES	N°	Dist.	Tie.
Material:	Platina 4.5mm AISI 1006		Operación	9	93
Inicio:	Bodega		Transporte	3	64
Fin:	Bodega		Control	1	6
Preparado por:	Andrés Rivera		Demora	2	4

Fecha:		18 de Marzo / 2015					▼	Almacenaje	1		
							TOTAL		16	64	117
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES	
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje					
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▼					
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▼	30		5		
3	Obtención de herramientas de medición	●	⇄	□	□	▼			5	Necesario flexómetro	
4	Obtención de herramientas de trazado	●	⇄	□	□	▼			5	Necesario rayador y escuadra	
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▼		1	10	241mm X 245mm	
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▼	4		4		
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▼			3		
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▼			15	Cortar sobre la línea trazada	
9	Cambio de herramienta manual	○	⇄	□	■	▼			2	Utilizar lima plana	
10	Remover excesos con la lima	●	⇄	□	□	▼		4	25	Todos los extremos	
11	Redondear todas las esquinas	●	⇄	□	□	▼		4	15	Utilizar la lima	
12	Cambio de herramienta de medición	○	⇄	□	■	▼			2	Flexómetro	
13	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▼			6		
14	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▼			15		
15	Traslado del bastidor a la bodega	○	➔	□	□	▼	30		5		
16	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼					



3.1.3 Proceso de fabricación: Placa superior

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.3):

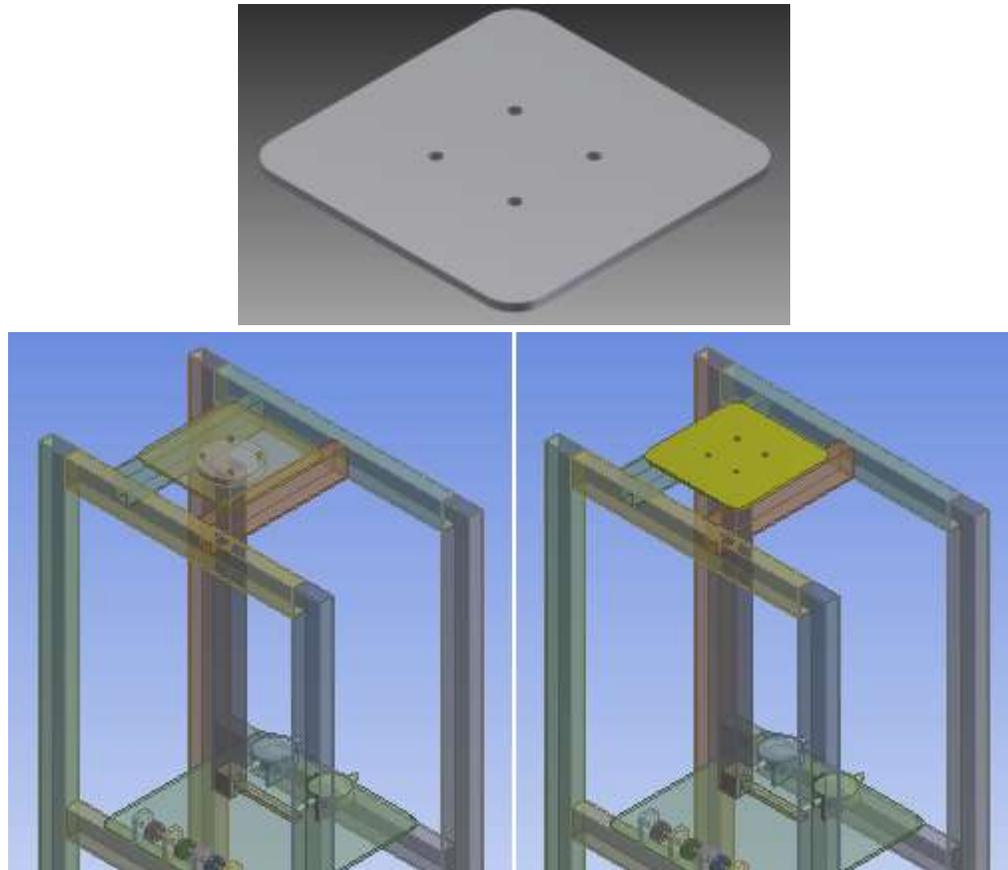


Figure 72: Placa superior
Fuente: Autor

Tabla 3.3: Proceso de trabajo #3 para construcción de la placa inferior

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY			N° 03			
			RESUMEN			
Trabajo:	Construcción de la placa superior	ACCIONES	N°	Dist.	Tie.	
Material:	Platina 4.5mm espesor AISI 1006	 Operación	13		111	
Inicio:	Bodega	 Transporte	4	84	19	
Fin:	Bodega	 Control	2		16	
Preparado por:	Andrés Rivera	 Demora	5		15	
Fecha:	18 de Marzo / 2015	 Almacenaje	1			
		TOTAL	25		161	

PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		5	
3	Obtención de herramientas de medición	●	⇄	□	□	▽			5	Necesario flexómetro
4	Obtención de herramientas de trazado	●	⇄	□	□	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	146mm X 146mm
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽			15	Cortar sobre la línea trazada
9	Cambio de herramienta manual	○	⇄	□	■	▽			2	Utilizar lima plana
10	Remover excesos con la lima	●	⇄	□	□	▽			15	Todos los extremos
11	Redondear todas las esquinas	●	⇄	□	□	▽		4	15	Utilizar la lima
12	Cambio de herramienta de medición	○	⇄	□	■	▽			2	Flexómetro
13	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			6	
14	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	□	▽			10	
15	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
16	Graneteado	●	⇄	□	□	▽			5	
17	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	□	▽	20		5	
18	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			5	
19	Sujeción y centrado de platina superior	●	⇄	□	□	▽			3	
20	Taladrado	●	⇄	□	□	▽		4	10	
21	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			4	Soldadora
22	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
23	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			15	
24	Traslado de la placa a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		5	
25	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼				



3.1.4 Proceso de fabricación: Soporte para rodillos

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.4):

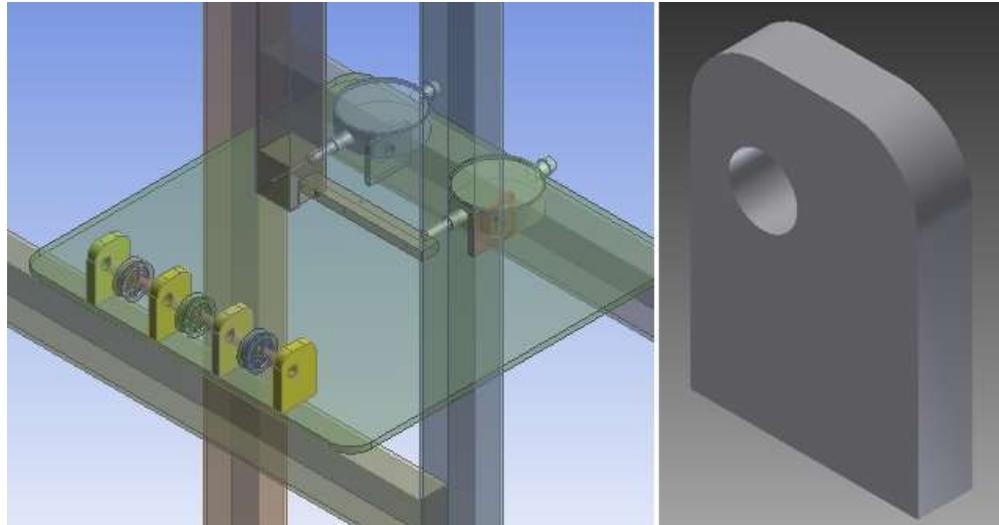


Figure 73: Soporte para rodillos
Fuente: Autor

Tabla 3.4: Proceso de trabajo #4 para construcción del soporte de rodillos

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 04					
					RESUMEN					
Trabajo:	Construcción del soporte para rodillos				ACCIONES		N°	Dist.	Tie.	
Material:	Acero AISI 1006				○	Operación	13		328	
Inicio:	Bodega				⇩	Transporte	6	114	39	
Fin:	Bodega				□	Control	2		50	
Preparado por:	Andrés Rivera				⏸	Demora	5		24	
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
							TOTAL			441
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇩	□	⏸	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➡	□	⏸	▽	30		5	

3	Obtención de herramientas de medición	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario flexómetro
4	Obtención de herramientas de trazado	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	38mm X 27mm X 8mm
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽			15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽		4	20	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
13	Fresado de todas las caras de la pieza	●	⇄	□	□	▽		4	120	35mm X 25mm X 6mm (4 piezas)
14	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽		4	20	
16	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	10		5	
17	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	□	▽		8	40	
18	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
19	Graneteado	●	⇄	□	□	▽		8	20	
20	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	□	▽	10		5	
21	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			10	
22	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇄	□	□	▽		4	15	
23	Taladrado	●	⇄	□	□	▽		4	35	
24	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇄	■	□	▽			30	
25	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			35	
26	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
27	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼				

3.1.5 Proceso de fabricación: Eje para rodillos

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.5):

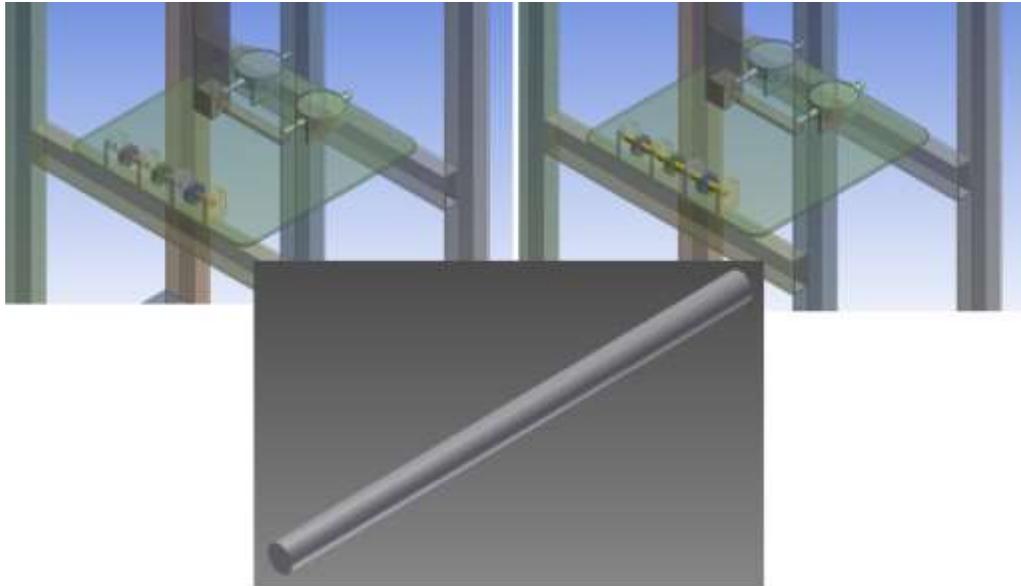


Figure 74: Eje para rodillos
Fuente: Autor

Tabla 3.5: Proceso de trabajo #5 para construcción del eje para rodillos

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 05					
					RESUMEN					
Trabajo:	Construcción del eje para rodillos				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Acero AISI 1006				●	Operación	11		168	
Inicio:	Bodega				↕	Transporte	2	60	20	
Fin:	Bodega				□	Control	1		5	
Preparado por:	Andrés Rivera				D	Demora	2		8	
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL		17	60	201	
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	↕	□	D	▽				

2	Traslado al torno de trabajo	○	➔	□	□	▽	30	10	
3	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	↔	□	□	▽		5	
4	Puesta a punto del torno	●	↔	□	□	▽		10	
5	Sujeción de la broca de centros	●	↔	□	□	▽		5	
6	Taladrado del centro	●	↔	□	□	▽		5	
7	Cambio de herramienta	○	↔	□	■	▽		6	
8	Colocación del centrador	●	↔	□	□	▽		3	
9	Sujeción de la herramienta de corte	●	↔	□	□	▽		5	
10	Torneado del diámetro	●	↔	□	□	▽		60	Ø = 7.56mm
11	Cambio de herramienta	○	↔	□	■	▽		2	Calibrador
12	Verificación del diámetro del cilindro	○	↔	■	□	▽		5	
13	Corte del cilindro	●	↔	□	□	▽	2	20	
14	Refrentado	●	↔	□	□	▽	2	20	
15	Pulido y limpieza	●	↔	□	□	▽		35	
16	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30	10	
17	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	↔	□	□	▽			



3.1.6 Proceso de fabricación: Probeta sección cuadrada

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.6):

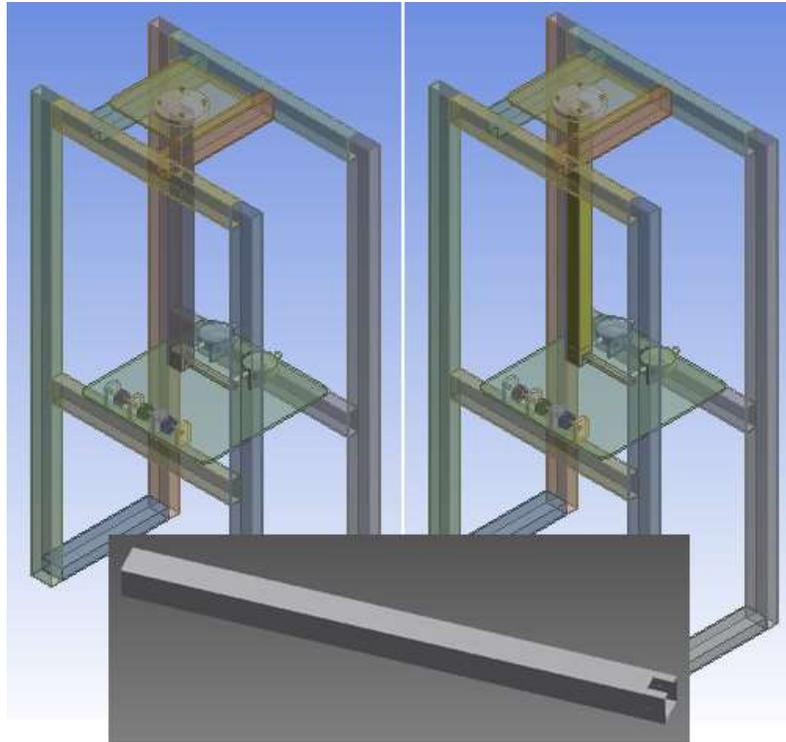


Figure 75: Probeta Sección Cuadrada
Fuente: Autor

Tabla 3.6: Proceso de trabajo #6 para construcción de la probeta cuadrada

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 06		
				RESUMEN		
Trabajo:	Probeta cuadrado (420mm X 25.5mm X 1.2mm)		ACCIONES	N°	Dist.	Tie.
Material:	Aluminio 6063		⊙	Operación	13	158
Inicio:	Bodega		⇩	Transporte	6	94
Fin:	Bodega		□	Control	2	20
Preparado por:	Andrés Rivera		⏸	Demora	5	19
Fecha:	10 de Marzo / 2015		▽	Almacenaje	1	
				TOTAL	27	94
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist	Can	Tie	OBSERVACIONES

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
3	Obtención de herramientas de medición	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario flexómetro
4	Obtención de herramientas de trazado	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽			15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽		4	20	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
13	Fresado de la cara anteriormente seleccionada de la pieza (12mm X 6mm)	●	⇄	□	□	▽		1	30	Para empotrar palanca de torsión
14	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
16	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	10		5	
17	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	□	▽			10	
18	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
19	Graneteado	●	⇄	□	□	▽			5	
20	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	□	▽	10		5	
21	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			5	Ø = 2mm
22	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇄	□	□	▽			5	
23	Taladrado	●	⇄	□	□	▽			10	
24	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇄	■	□	▽			10	
25	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			35	
26	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
27	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼				

3.1.7 Proceso de fabricación: Probeta sección circular

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.7):

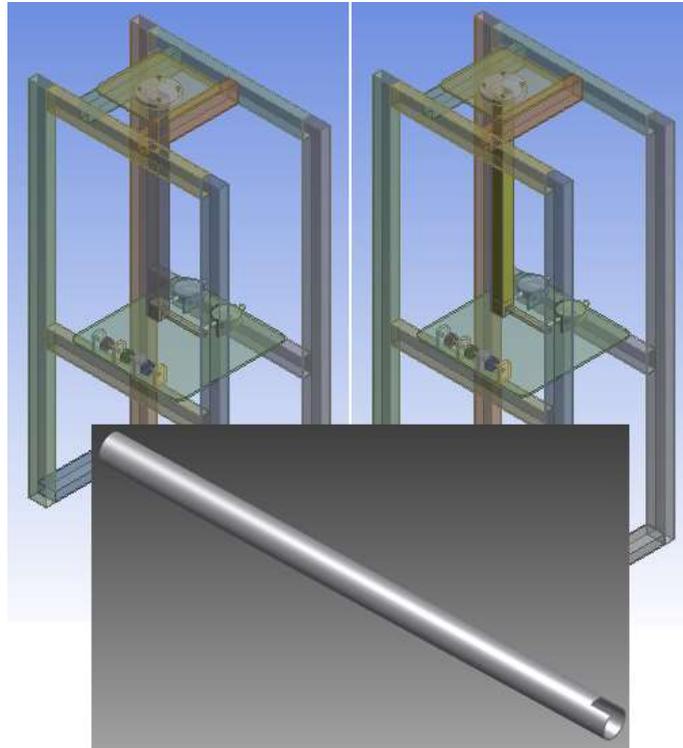


Figure 76: Probeta Circular
Fuente: Autor

Tabla 3.7: Proceso de trabajo #7 para construcción de la probeta circular

PROCESO DE TRABAJO									
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 07					
				RESUMEN					
Trabajo:	Tubo circular (420mm X Ø ext = 23.4mm)			ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Aluminio 6063			⊙	Operación	13	158		
Inicio:	Bodega			⇩	Transporte	6	94	44	
Fin:	Bodega			□	Control	2	20		
Preparado por:	Andrés Rivera			⊔	Demora	5	19		
Fecha:	10 de Marzo / 2015			▽	Almacenaje	1			
				TOTAL			27	94	241
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist	Can	Tie	OBSERVACIONES			

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
3	Obtención de herramientas de medición	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario flexómetro
4	Obtención de herramientas de trazado	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽			15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽		4	20	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
13	Fresado de la pieza (12mm X 6mm)	●	⇄	□	□	▽		1	30	Para empotrar palanca de torsión
14	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
16	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	10		5	
17	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	□	▽			10	
18	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
19	Graneteado	●	⇄	□	□	▽			5	
20	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	□	▽	10		5	
21	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			5	Ø = 2mm
22	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇄	□	□	▽			5	
23	Taladrado	●	⇄	□	□	▽			10	
24	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇄	■	□	▽			10	
25	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			35	
26	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
27	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼				

3.1.8 Proceso de fabricación: Palanca de torsión (cuadrado)

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.8):

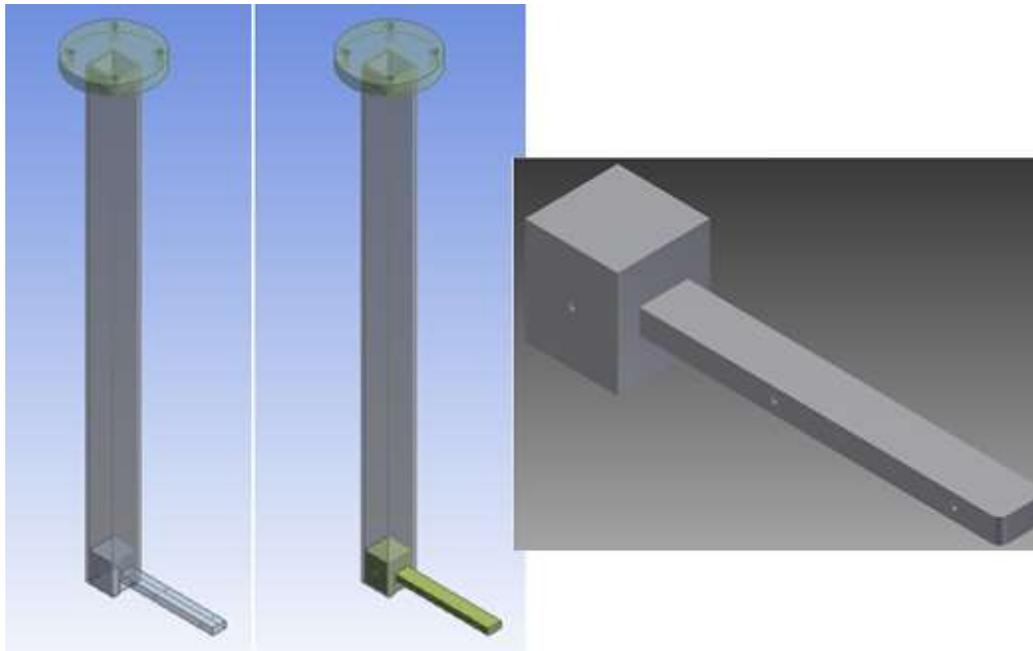


Figure 77: Palanca de torsión (cuadrado)
Fuente: Autor

Tabla 3.8: Proceso de trabajo #8 para construcción de la palanca de torsión

PROCESO DE TRABAJO								
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 08				
				RESUMEN				
Trabajo:	Palanca de torsión (cuadrado)		ACCIONES		N°	Dist.	Tie.	
Material:	Acero AISI 1006		○	Operación	15		468	
Inicio:	Bodega		⇩	Transporte	6	114	44	
Fin:	Bodega		□	Control	4		40	
Preparado por:	Andrés Rivera		⏸	Demora	7		23	
Fecha:	10 de Marzo / 2015		▽	Almacenaje	1			
				TOTAL		33	114	575
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist	Can	Tie	OBSERVACIONES		

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
3	Obtención de herramientas de medición	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario flexómetro y calibrador
4	Obtención de herramientas de trazado	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽		1	15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽		4	20	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
13	Fresado de la pieza (113.1mm X 23.1mm X 26mm)	●	⇄	□	□	▽		6	180	Medidas de la porción más grande de la pieza
14	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
16	Fresado de la palanca de torsión (90mm X 6mm X 23.1mm)	●	⇄	□	□	▽		2	60	Del lado de 26mm rebajar 10mm de cada lado, con una profundidad de 90mm tomados desde un extremo de la pieza
17	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
18	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
19	Fresado de la palanca de torsión (90mm X 6mm X 12mm)	●	⇄	□	□	▽		2	60	Del lado de 23.1mm rebajar 5.55mm de cada lado, con una profundidad de 90mm tomados desde un extremo de la pieza
20	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
21	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
22	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	10		5	
23	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	□	▽		3	20	
24	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
25	Graneteado	●	⇄	□	□	▽		3	15	
26	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	□	▽	10		5	
27	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			5	Ø = 2mm
28	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇄	□	□	▽			5	
29	Taladrado	●	⇄	□	□	▽		3	30	
30	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇄	■	□	▽			10	
31	Pulido y limpieza	●	⇄	□	□	▽			35	
32	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
33	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	□	▼				

3.1.9 Proceso de fabricación: Palanca de torsión (circular)

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.9):

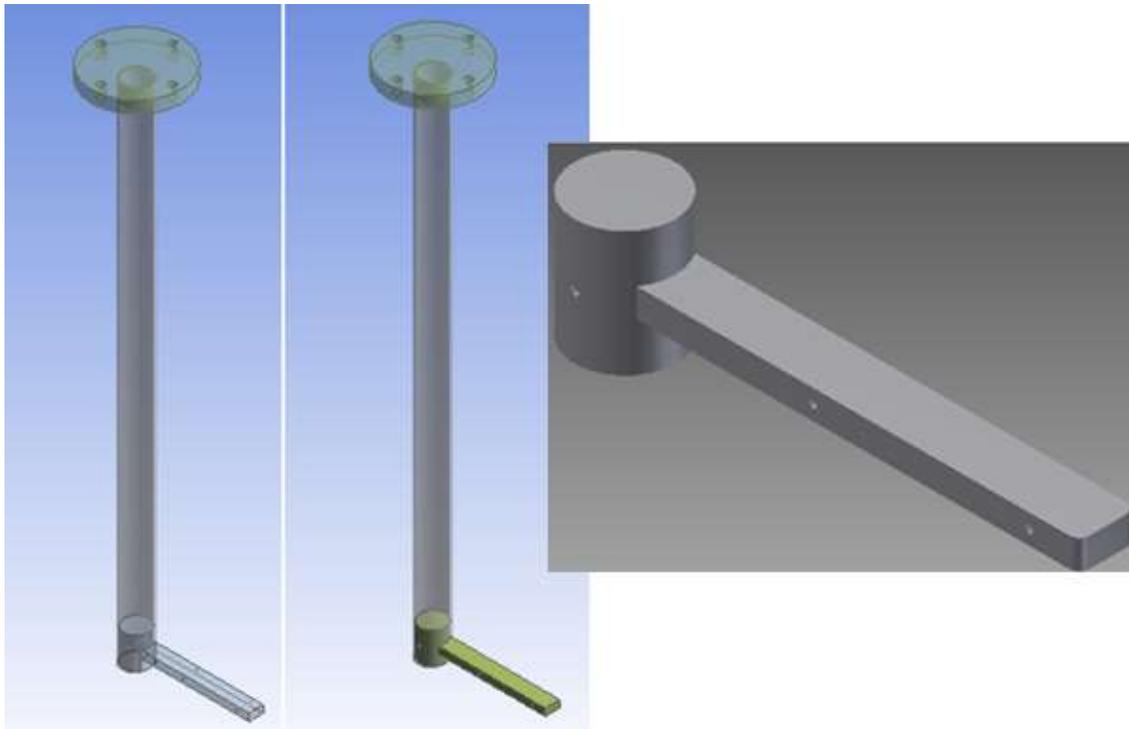


Figure 78: Palanca de torsión (circular)
Fuente: Autor

Tabla 3.9: Proceso de trabajo #9 para construcción de la palanca de torsión (circular)

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 09		
				RESUMEN		
Trabajo:	Palanca de torsión (circular)		ACCIONES	N°	Dist.	Tie.
Material:	Acero AISI 1006		⊗	Operación	28	624
Inicio:	Bodega		⇨	Transporte	9	154
Fin:	Bodega		□	Control	5	50
Preparado por:	Andrés Rivera		⊔	Demora	8	34
Fecha:	10 de Marzo / 2015		▽	Almacenaje	1	
				TOTAL	51	772
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist	Can	Tie	OBSERVACIONES

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇄	□	□	▽				
2	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
3	Obtención de herramientas de medición	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario flexómetro y calibrador
4	Obtención de herramientas de trazado	○	⇄	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	⇄	□	□	▽		1	10	
6	Traslado a la mesa de corte	○	➔	□	□	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	⇄	□	□	▽		1	15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽		4	20	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
13	Fresado de la pieza (105mm X 12mm X 6mm)	●	⇄	□	□	▽		6	180	Esto conforma el primer elemento
14	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	
16	Traslado al torno de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
17	Puesta a punto del torno	●	⇄	□	□	▽			10	
18	Sujeción de la broca de centros	●	⇄	□	□	▽			5	
19	Taladrado del centro	●	⇄	□	□	▽			5	
20	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			6	
21	Colocación del centrador	●	⇄	□	□	▽			3	
22	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			5	
23	Torneado del diámetro de 10.4mm	●	⇄	□	□	▽			60	
24	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
25	Verificación del diámetro del cilindro	○	⇄	■	□	▽			5	
26	Corte del cilindro	●	⇄	□	□	▽			10	Esto conforma el segundo elemento
27	Refrentado	●	⇄	□	□	▽			15	
28	Traslado de la pieza a la fresadora	○	➔	□	□	▽			5	
29	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇄	□	□	▽			5	
30	Puesta a punto de la fresadora	●	⇄	□	□	▽			15	
31	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇄	□	□	▽			10	
32	Fresado de la pieza	●	⇄	□	□	▽			90	Para el posterior empotrado del primer elemento
33	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Calibrador
34	Verificación de medidas	○	⇄	■	□	▽			10	Igual a la sección rectangular del primer elemento
35	Traslado de las piezas a la prensa	○	➔	□	□	▽	10		5	
36	Preparación de las piezas para el empotramiento	●	⇄	□	□	▽			15	Pulido de las partes a empotrar
37	Sujeción de las piezas en la entenalla	●	⇄	□	□	▽			10	

38	Prensado de las partes	●	⇄	□	D	▽			20	
39	Verificación de medidas del voladizo	○	⇄	■	D	▽			10	
40	Traslado de las piezas a la mesa de trabajo	○	→	□	D	▽	10		5	
41	Rayado y trazado de centros	●	⇄	□	D	▽			25	
42	Cambio de herramienta	○	⇄	□	■	▽			2	Granete y martillo
43	Graneteado	●	⇄	□	D	▽		8	10	
44	Traslado al taladro de pedestal	○	→	□	D	▽	10		5	
45	Cambio de broca	○	⇄	□	■	▽			10	Ø = 2mm
46	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇄	□	D	▽			3	
47	Taladrado	●	⇄	□	D	▽		8	40	
48	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇄	■	D	▽			15	
49	Pulido y limpieza	●	⇄	□	D	▽			25	
50	Traslado de las piezas a la bodega	○	→	□	D	▽	30		10	
51	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇄	□	D	▼				



3.1.10 Proceso de fabricación: Empotramiento cuadrado

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.10):

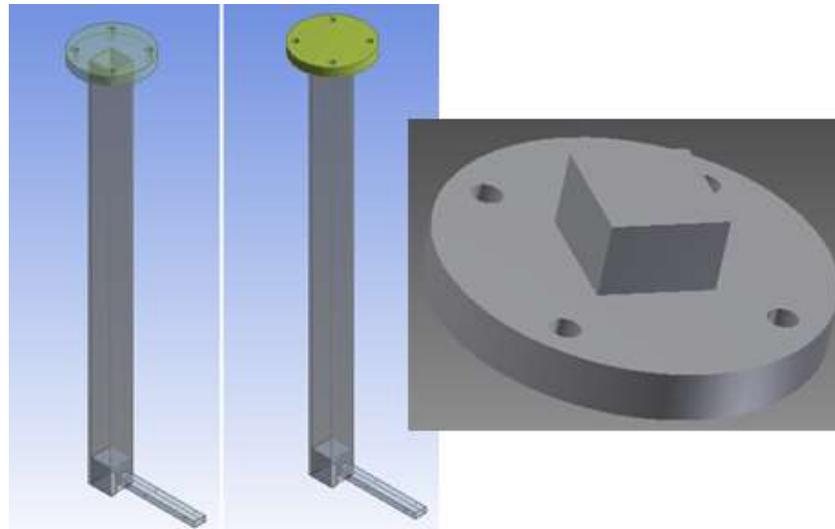


Figure 79: Empotramiento cuadrado
Fuente: Autor

Tabla 3.10: Proceso de trabajo #10 para construcción del empotramiento cuadrado

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 10					
					RESUMEN					
Trabajo:	Empotramiento cuadrado				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Aluminio 6063				○	Operación	20		373	
Inicio:	Bodega				⇩	Transporte	5	90	35	
Fin:	Bodega				□	Control	4		30	
Preparado por:	Andrés Rivera				⏸	Demora	6		24	
Fecha:	26 de Abril / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL		36	90	462	
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇩	□	⏸	▽				
2	Traslado al torno de trabajo	○	➡	□	⏸	▽	30		10	

3	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇨	□	D	▽			5	
4	Puesta a punto del torno	●	⇨	□	D	▽			10	
5	Sujeción de la broca de centros	●	⇨	□	D	▽			5	
6	Taladrado del centro	●	⇨	□	D	▽			5	
7	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			6	
8	Colocación del centrador	●	⇨	□	D	▽			3	
9	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇨	□	D	▽			5	
10	Torneado del diámetro mayor	●	⇨	□	D	▽			60	Ø = 75mm, h = 10mm
11	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Calibrador
12	Verificación del diámetro mayor del cilindro	○	⇨	■	D	▽			5	
13	Torneado del diámetro menor	●	⇨	□	D	▽			60	Ø = 32.7mm, h = 15mm
14	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	
15	Verificación del diámetro menor del cilindro	○	⇨	■	D	▽			5	
16	Corte del cilindro	●	⇨	□	D	▽			15	
17	Refrentado	●	⇨	□	D	▽			60	
18	Traslado de la pieza a la fresadora	○	➔	□	D	▽	10		5	
19	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇨	□	D	▽			5	
20	Puesta a punto de la fresadora	●	⇨	□	D	▽			5	
21	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇨	□	D	▽			10	
22	Fresado del diámetro menor de la pieza para que se forme un cuadrado	●	⇨	□	D	▽	4	40		Lado de 23.1mm
23	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Calibrador
24	Verificación de medidas	○	⇨	■	D	▽			10	Igual a la sección interna de la probeta
25	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	D	▽	10		5	
26	Rayado y trazado de centros	●	⇨	□	D	▽		4	20	Agujeros para tornillos
27	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Granete y martillo
28	Graneteado	●	⇨	□	D	▽		4	15	
29	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	D	▽	10		5	
30	Cambio de broca	○	⇨	□	■	▽			10	Ø = 10mm
31	Sujeción y centrado de la pieza	●	⇨	□	D	▽		4	15	
32	Taladrado	●	⇨	□	D	▽		4	20	Agujeros pasantes
33	Verificación de medidas de los agujeros	○	⇨	■	D	▽			10	
34	Pulido y limpieza	●	⇨	□	D	▽			15	
35	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	D	▽	30		10	
36	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇨	□	D	▼				

3.1.11 Proceso de fabricación: Empotramiento circular

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.11):

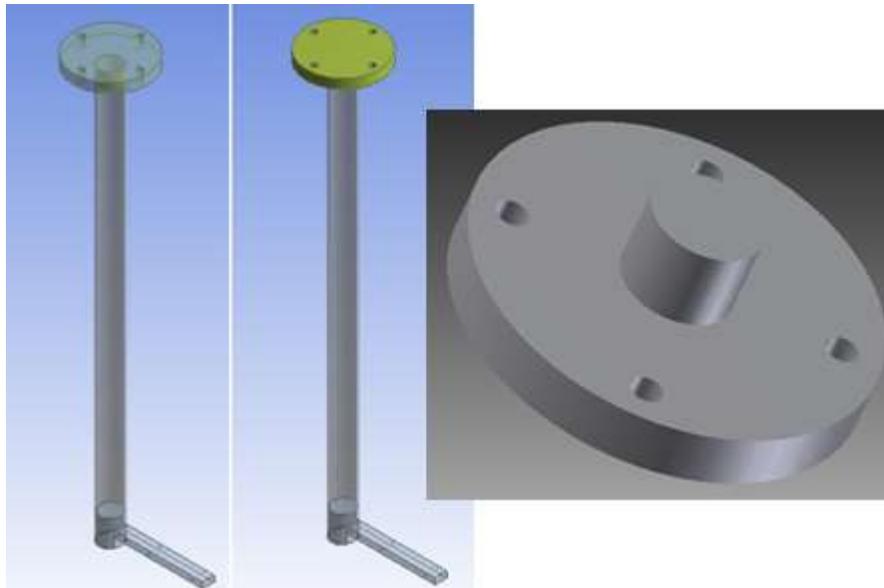


Figure 80: Empotramiento circular
Fuente: Autor

Tabla 11: Proceso de trabajo #11 para construcción del empotramiento circular

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 11					
					RESUMEN					
Trabajo:	Empotramiento circular				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Aluminio 6063				○	Operación	16		313	
Inicio:	Bodega				⇕	Transporte	4	80	30	
Fin:	Bodega				□	Control	3		20	
Preparado por:	Andrés Rivera				⏸	Demora	5		22	
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL		29	80	385	
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇕	□	⏸	▽				

2	Traslado al torno de trabajo	○	➔	□	▷	▽	30	10		
3	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	➔	□	▷	▽		5		
4	Puesta a punto del torno	●	➔	□	▷	▽		10		
5	Sujeción de la broca de centros	●	➔	□	▷	▽		5		
6	Taladrado del centro	●	➔	□	▷	▽		5		
7	Cambio de herramienta	○	➔	□	■	▽		6		
8	Colocación del centrador	●	➔	□	▷	▽		3		
9	Sujeción de la herramienta de corte	●	➔	□	▷	▽		5		
10	Torneado del diámetro mayor	●	➔	□	▷	▽		60	Ø = 75mm, h = 10mm	
11	Cambio de herramienta	○	➔	□	■	▽		2	Calibrador	
12	Verificación del diámetro mayor del cilindro	○	➔	■	▷	▽		5		
13	Torneado del diámetro menor	●	➔	□	▷	▽		60	Ø = 20.6mm, h = 15mm	
14	Cambio de herramienta	○	➔	□	■	▽		2		
15	Verificación del diámetro menor del cilindro	○	➔	■	▷	▽		5		
16	Corte del cilindro	●	➔	□	▷	▽		15		
17	Refrentado	●	➔	□	▷	▽		60		
18	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	➔	□	▷	▽	10	5		
19	Rayado y trazado de centros	●	➔	□	▷	▽		4	20	Agujeros para tornillos
20	Cambio de herramienta	○	➔	□	■	▽		2		Granete y martillo
21	Graneteado	●	➔	□	▷	▽		4	15	
22	Traslado al taladro de pedestal	○	➔	□	▷	▽	10	5		
23	Cambio de broca	○	➔	□	■	▽		10		Ø = 10mm
24	Sujeción y centrado de la pieza	●	➔	□	▷	▽		4	15	
25	Taladrado	●	➔	□	▷	▽		4	20	Agujeros pasantes
26	Verificación de medidas de los agujeros	○	➔	■	▷	▽		10		
27	Pulido y limpieza	●	➔	□	▷	▽		15		
28	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	▷	▽	30	10		
29	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	➔	□	▷	▽				



3.1.12 Proceso de fabricación: Base de palpadores

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.12):

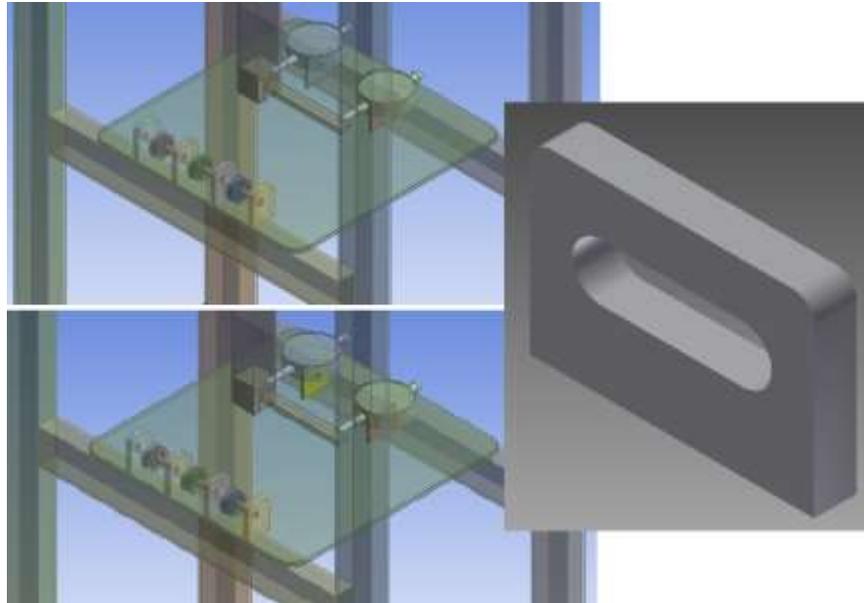


Figure 81: Base de palpadores
Fuente: Autor

Tabla 12: Proceso de trabajo #12 para construcción de la base de palpadores

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 12					
					RESUMEN					
Trabajo:	Base de palpadores				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Acero AISI 1006				○	Operación	17		218	
Inicio:	Bodega				⇩	Transporte	7	104	49	
Fin:	Bodega				□	Control	3		25	
Preparado por:	Andrés Rivera				D	Demora	6		21	
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL		34	104	313	
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇩	□	D	▽				

2	Traslado a la mesa de trabajo	○	→	□	D	▽	30		5	
3	Obtención de herramientas de medición	○	→	□	■	▽			5	Necesario flexómetro
4	Obtención de herramientas de trazado	○	→	□	■	▽			5	Necesario rayador y escuadra
5	Rayado y trazado de medidas	●	→	□	D	▽		1	10	
6	Traslado a la mesa de corte	○	→	□	D	▽	4		4	
7	Sujeción en la entenalla	●	→	□	D	▽			3	
8	Corte de los elementos	●	→	□	D	▽			15	Cortar sobre la línea trazada
9	Traslado a la fresadora de trabajo	○	→	□	D	▽	10		10	
10	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	→	□	D	▽		2	10	
11	Puesta a punto de la fresadora	●	→	□	D	▽			10	
12	Sujeción de la herramienta de corte	●	→	□	D	▽			5	
13	Fresado de todas las caras de la pieza	●	→	□	D	▽		2	60	40mm X 26.5mm X 6mm (2 piezas)
14	Cambio de herramienta	○	→	□	■	▽			2	Calibrador
15	Verificación de medidas	○	→	■	D	▽		2	10	
16	Traslado de la pieza a la mesa de trabajo	○	→	□	D	▽	10		5	
17	Rayado y trazado de centros	●	→	□	D	▽		2	10	
18	Cambio de herramienta	○	→	□	■	▽			2	Granete y martillo
19	Graneteado	●	→	□	D	▽		2	10	
20	Traslado al taladro de pedestal	○	→	□	D	▽	10		5	
21	Cambio de broca	○	→	□	■	▽			5	Ø = 8mm
22	Sujeción y centrado de la pieza	●	→	□	D	▽			15	
23	Taladrado	●	→	□	D	▽		2	20	
24	Verificación de medidas de los agujeros	○	→	■	D	▽			10	
25	Traslado a la fresadora de trabajo	○	→	□	D	▽	10		10	
26	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	→	□	D	▽		2	5	
27	Puesta a punto de la fresadora	●	→	□	D	▽			5	
28	Sujeción de la herramienta de corte	●	→	□	D	▽			5	
29	Fresado de la ranura	●	→	□	D	▽		2	20	Unir los dos agujeros
30	Cambio de herramienta	○	→	□	■	▽			2	Calibrador
31	Verificación de medidas	○	→	■	D	▽			5	
32	Pulido y limpieza	●	→	□	D	▽			15	
33	Traslado de las piezas a la bodega	○	→	□	D	▽	30		10	
34	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	→	□	D	▼				

3.1.13 Proceso de fabricación: Soporte de pesas

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.13):

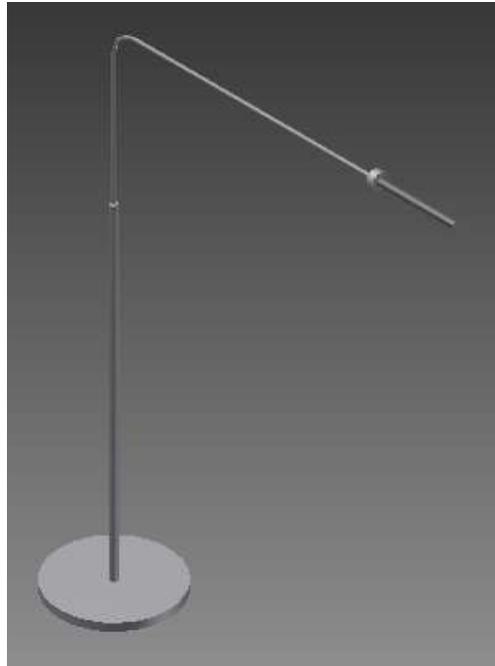


Figure 82: Soporte de pesas
Fuente: Autor

Tabla 13: Proceso de trabajo #13 para construcción del soporte de pesas

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY				N° 13		
				RESUMEN		
Trabajo:	Soporte de pesas		ACCIONES	N°	Dist.	Tie.
Material:	Acero AISI 1006, Cable de acero		○	Operación	18	146
Inicio:	Bodega		↘	Transporte	3	70
Fin:	Bodega		□	Control	2	10
Preparado por:	Andrés Rivera		D	Demora	3	10
Fecha:	10 de Marzo / 2015		▽	Almacenaje	1	
				TOTAL	27	70
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist	Can	Tie	mand
						OBSERVACIONES

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇨	□	□	▽				
2	Traslado al torno de trabajo	○	➔	□	□	▽	30		10	
3	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇨	□	□	▽			5	
4	Puesta a punto del torno	●	⇨	□	□	▽			10	
5	Sujeción de la broca de centros	●	⇨	□	□	▽			5	
6	Taladrado del centro	●	⇨	□	□	▽			5	
7	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			6	
8	Colocación del centrador	●	⇨	□	□	▽			3	
9	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇨	□	□	▽			5	
10	Torneado del diámetro del soporte inferior	●	⇨	□	□	▽			20	Ø = 50mm
11	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Calibrador
12	Verificación del diámetro del cilindro	○	⇨	■	□	▽			5	
13	Refrentado	●	⇨	□	□	▽			10	
14	Torneado del diámetro del eje	●	⇨	□	□	▽			20	Ø = 3.5mm
15	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Calibrador
16	Verificación del diámetro del cilindro	○	⇨	■	□	▽			5	
17	Refrentado	●	⇨	□	□	▽			10	
18	Taladrado del cilindro eje para inserción del cable	●	⇨	□	□	▽			15	Broca Ø = 1.5mm
19	Taladrado del perno para inserción del cable	●	⇨	□	□	▽			15	Broca Ø = 1.5mm
20	Prensado del cilindro eje con el cable de acero	●	⇨	□	□	▽			5	
21	Prensado del perno con el cable de acero	●	⇨	□	□	▽			5	
22	Traslado del conjunto a la mesa de soldado	○	➔	□	□	▽	10		2	
23	Preparación y calibración de soldadora	●	⇨	□	□	▽			3	
24	Colocar el cilindro eje perpendicular al soporte inferior y soldar en la base	●	⇨	□	□	▽			5	
25	Pulido y limpieza	●	⇨	□	□	▽			5	
26	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
27	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇨	□	□	▼				

3.1.14 Proceso de fabricación: Pesas

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.14):

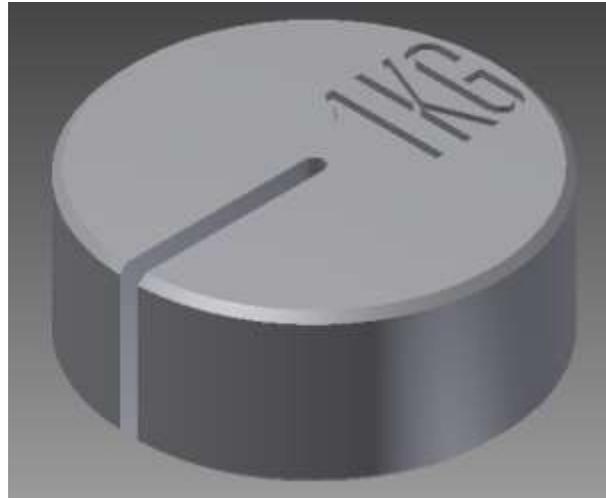


Figure 83: Pesas
Fuente: Autor

Tabla 14: Proceso de trabajo #14 para construcción de las pesas

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 14					
					RESUMEN					
Trabajo:	Pesas				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:	Acero AISI 1006				○	Operación	11		93	
Inicio:	Bodega				⇩	Transporte	3	70	25	
Fin:	Bodega				□	Control	1		5	
Preparado por:	Andrés Rivera				⏸	Demora	2		8	
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL		18	60	131	
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del material	●	⇩	□	⏸	▽				
2	Traslado al torno de trabajo	○	⇩	□	⏸	▽	30	10		
3	Sujeción de la pieza en la mordaza	●	⇩	□	⏸	▽		5		
4	Puesta a punto del torno	●	⇩	□	⏸	▽		10		

5	Sujeción de la broca de centros	●	⇨	□	D	▽			5	
6	Taladrado del centro	●	⇨	□	D	▽			5	
7	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			6	
8	Colocación del centrador	●	⇨	□	D	▽			3	
9	Sujeción de la herramienta de corte	●	⇨	□	D	▽			5	
10	Torneado del diámetro	●	⇨	□	D	▽			20	∅ = 120mm
11	Cambio de herramienta	○	⇨	□	■	▽			2	Calibrador
12	Verificación del diámetro del cilindro	○	⇨	■	D	▽			5	
13	Refrentado	●	⇨	□	D	▽			10	
14	Traslado a la mesa de trabajo	○	➔	□	D	▽	10		5	
15	Realizar canal transversal hasta el centro	●	⇨	□	D	▽		5	25	
16	Pulido y limpieza	●	⇨	□	D	▽			5	
17	Traslado de las piezas a la bodega	○	➔	□	D	▽	30		10	
18	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇨	□	D	▼				

3.1.15 Proceso de fabricación: Eje, Soporte, Rodillos

La configuración de este elemento se puede observar en la siguiente imagen (figura 3.15):

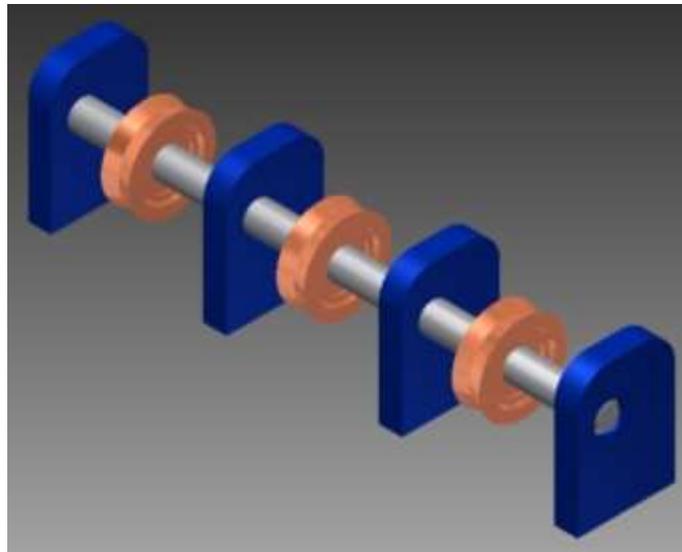


Figure 84: Conjunto Eje, Soporte, Rodillos
Fuente: Autor

Tabla 15: Proceso de trabajo #15 para construcción del conjunto eje, soporte y rodillos

PROCESO DE TRABAJO										
UNIVERSIDAD DEL AZUAY					N° 15					
					RESUMEN					
Trabajo:	Conjunto Eje, Soporte y Rodillos				ACCIONES	N°	Dist.	Tie.		
Material:					○	Operación	4		55	
Inicio:	Bodega				⇓	Transporte	3	70	30	
Fin:	Bodega				□	Control	1		5	
Preparado por:	Andrés Rivera				⏸	Demora				
Fecha:	10 de Marzo / 2015				▽	Almacenaje	1			
					TOTAL					
PASO N°	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS					Distancia (metros)	Cantidad	Tiempo (minutos)	OBSERVACIONES
		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención de las piezas anteriormente fabricadas	●	⇓	□	⏸	▽				Eje, Soportes y Rodillos

2	Traslado de las piezas a la prensa	○	→	□	D	▽	30	10	
3	Colocar los rodillos en el eje con un espacio de 45mm entre ellos	●	→	□	D	▽		30	
4	Trasladar las piezas y la platina inferior a la mesa de soldar		→	□	D	▽	10	10	
5	Soldar los soportes a la platina inferior	●	→	□	D	▽		20	Según las medidas establecidas en la lámina 14
6	Pulido y limpieza	●	→	□	D	▽		5	
7	Verificación de soldadura y medidas	○	→	■	D	▽		5	
8	Traslado de las piezas a la bodega	○	→	□	D	▽	30	10	
9	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	→	□	D	▼			



3.1.16 Proceso de fabricación: Máquina completa

La conformación de la máquina se muestra en la siguiente imagen (figura 3.16):

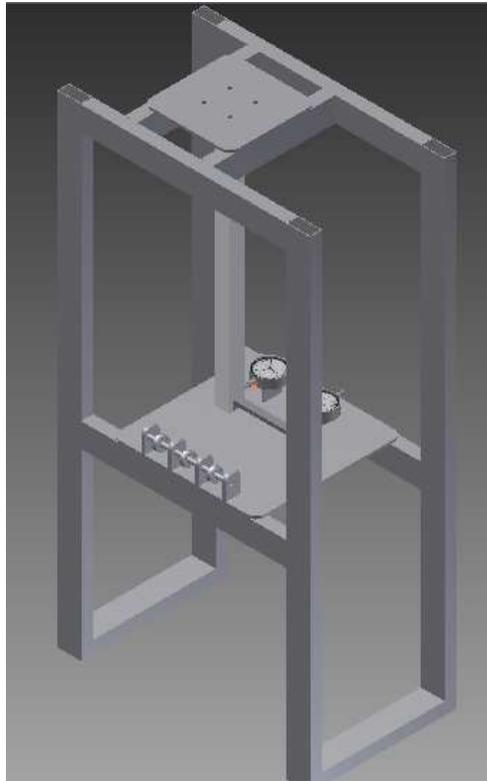


Figure 85: Maquina completa
Fuente: Autor

Tabla 16: Proceso de trabajo #16 para armado completo de la máquina

PROCESO DE TRABAJO						
UNIVERSIDAD DEL AZUAY			N° 16			
			RESUMEN			
Trabajo:	Ensamblaje de la máquina		ACCIONES	N°	Dist.	Tie.
Material:			○	Operación	11	205
Inicio:	Bodega		⇓	Transporte	3	70
Fin:	Bodega		□	Control	2	10
Preparado por:	Andrés Rivera		D	Demora	-	-
Fecha:	10 de Marzo / 2015		▽	Almacenaje	1	-
			TOTAL		17	245
PAS	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	SÍMBOLOS	Dist.	Can.	Tie.	OBSERVACIONES

		Operación	Transporte	Control	Demora	Almacenaje				
1	Obtención del Bastidor, Base palpadores, Platina superior, Platina inferior, conjunto eje, soporte y rodillos	●	⇒	□	□	▽				
2	Trasladar las piezas a la mesa de soldar		➔	□	□	▽	10		10	
3	Soldar la platina inferior	●	⇒	□	□	▽			20	Según las medidas establecidas en la lámina 15
4	Soldar las bases de los palpadores a platina inferior	●	⇒	□	□	▽			20	Según las medidas establecidas en la lámina 15
5	Soldar la platina superior	●	⇒	□	□	▽			20	Según las medidas establecidas en la lámina 15
6	Pulido y limpieza	●	⇒	□	□	▽			5	
7	Verificación de soldadura y medidas	○	⇒	■	□	▽			5	
8	Trasladar la maquina a la mesa de pintura	○	➔	□	□	▽	30		10	
9	Limpiar toda la maquina con disolvente	●	⇒	□	□	▽			10	
10	Preparar el fondo catalizado y colocar en la pistola de pintura	●	⇒	□	□	▽			10	
11	Rosear dos veces de forma pareja evitando que se formen gotas	●	⇒	□	□	▽			30	Esperar 1 hora para rosear la segunda vez
12	Lijar toda la estructura	●	⇒	□	□	▽			50	Realizar este proceso luego de 6 horas de secado del fondo
13	Preparar la pintura anticorrosiva y colocar en la pistola de pintura	●	⇒	□	□	▽			10	
14	Rosear dos veces de forma pareja evitando que se formen gotas	●	⇒	□	□	▽			30	Esperar 1 hora para rosear la segunda vez
15	Verificar homogeneidad de la pintura	○	⇒	■	□	▽			5	
16	Traslado de la estructura a la bodega	○	➔	□	□	▽	30		10	
17	Almacenaje en espera de otras operaciones	○	⇒	□	□	▽				



CAPITULO 4

PRUEBAS EN LA MÁQUINA DE ENSAYOS

Se realiza pruebas prácticas en la máquina de ensayos la cual refleja, por medio de dos relojes comparadores la deformación al aplicar una carga externa en una probeta de aluminio, luego se realiza cálculos en forma analítica y utilizando un software de elementos finitos para validar los datos obtenidos durante las pruebas; de esta manera se garantiza la fiabilidad de los resultados.

4.1 Máquina de ensayos

4.1.1 Partes del equipo

La máquina de ensayos está dividida por cuatro secciones importantes:

- Placa superior de sujeción, en esta se fijará la probeta de ensayos mediante 4 pernos M8 de acero clase 4.6.
- Dos probeta de ensayos, fabricadas de aleación de aluminio 6063 T5, una de sección tubular ($\text{Ø}_{\text{ext}}=23\text{mm}$, espesor= 1.4mm) y cuadrada tubular (25.4mm, espesor= 1.2mm). Las dos probetas tienen en uno de sus extremos una palanca de 90 milímetros de largo en la cual se podrá aplicar carga para generar torsión y en el otro extremo una base circular para fijarla a la placa superior. La palanca de torsión en la probeta esta provista de 3 agujeros para aplicar la carga, estos serán denominados como se muestra en el gráfico 4.1.

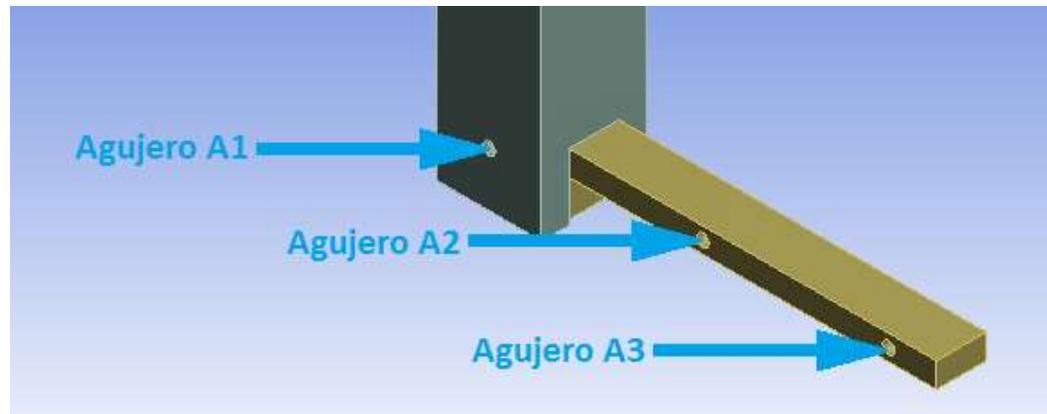


Figure 86: Denominación de agujeros de carga
Fuente: Autor

- Sistema de medición, en este sistema se encuentran dos relojes comparadores con una precisión de 0.01mm los cuales permiten medir la deflexión de las probetas dependiendo de la carga que se aplique en el ensayo. Estos relojes se encuentran dispuestos de forma que uno de los palpadores toque el centro de la probeta y a una distancia vertical de 407 milímetros desde su empotramiento; el otro palpador se encuentra a 90 milímetros de distancia horizontal del primero.
- Conjunto de carga (pesas), se compone de un cable de acero que transmite la carga vertical producida por las pesas calibradas (1Kg cada una) hacia la probeta de ensayos, pasando por un rodillo, para así transmitir una carga de forma horizontal.

En la figura 4.2 se puede observar la disposición espacial de la conformación de la máquina.

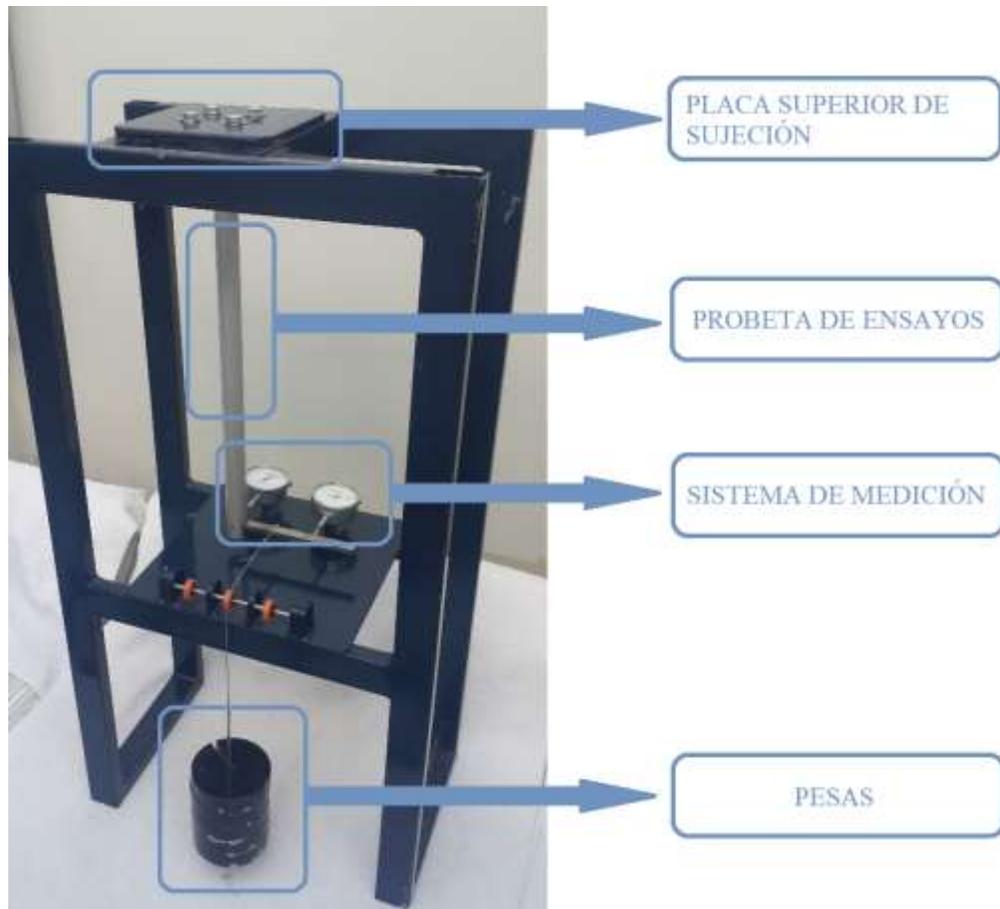


Figure 87: Distribución espacial de la máquina
Fuente: Autor

4.1.2 Métodos de uso del equipo

La máquina de ensayos está diseñada y construida para obtener una aceptable precisión durante las prácticas, por lo tanto, se deben seguir los siguientes pasos para su correcto uso y funcionamiento:

- Colocar la máquina en una superficie totalmente plana.

- Tomar la probeta con la sección a utilizar y empernarla a la placa superior de forma que se mantenga totalmente fija con la máquina de ensayos.



Figure 4.3: Fijación de la probeta de ensayos
Fuente: Autor

- Ubicar la punta roscada del cable de acero en el agujero de la probeta en el cual se desea hacer la prueba y darle una pequeña precarga a la tuerca para evitar movimientos del cable.

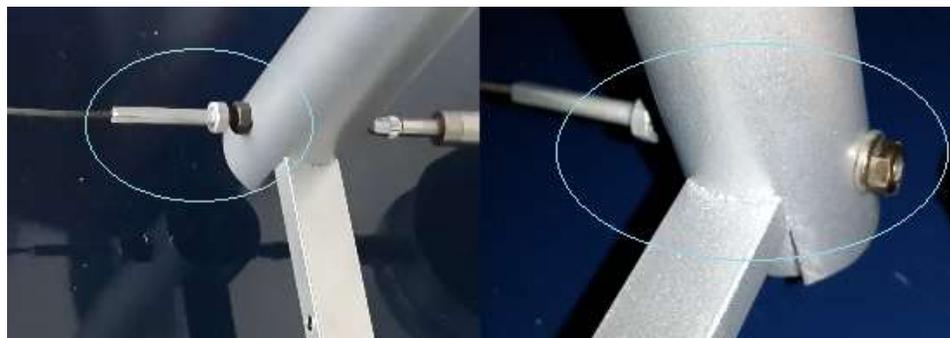


Figure 4.4: Fijación del cable de acero
Fuente: Autor

- Situar el cable de acero sobre el rodillo correspondiente.
- Instalar los dos relojes comparadores sobre sus soportes y fijarlos, de forma que los palpadores toquen la probeta y no tengan ningún movimiento.
- Calibrar los dos relojes comparadores para iniciar la prueba.



Figure 4.5: Encerar relojes comparadores
Fuente: Autor

- Colocar las pesas en el extremo libre del cable para transmitir la carga a la probeta.

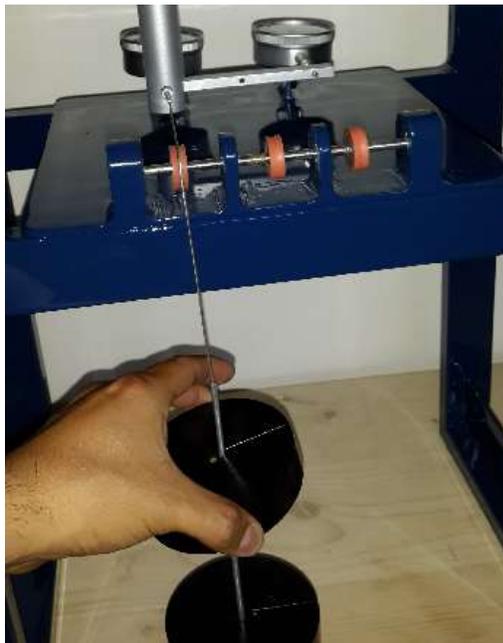


Figure 4.6: Colocar pesas
Fuente: Autor

- Por cada pesa colocada tomar los datos de ambos relojes comparadores, para luego trabajar con esos valores.
- Luego de realizada la prueba, retirar las pesas de una en una sin tocar la máquina ni el lugar en el cual está asentada para comprobar que los relojes comparadores regresen a cero (puede existir una variación de 0.05mm).
- Al finalizar el uso de la máquina retirar y guardar en sus respectivos estuches los relojes comparadores.
- Retirar la probeta evitando cualquier golpe.

4.1.3 Recomendaciones de uso del equipo

Se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos para un mejor funcionamiento del equipo:

- Previo al uso de la máquina revisar visualmente el estado de la misma y comprobar que los rodillos giren con facilidad.
- Colocar las pesas calibradas de 1kg una a la vez hasta su peso máximo de 5kg, evitando tocar la máquina y el lugar en el cual está asentada. Las pesas deben ser colocadas por la abertura hasta llegar a su centro.
- Al colocar las pesas soltarlas suavemente para que la carga y la deformación en la probeta sea progresiva.
- Debido a que los relojes comparadores son elementos de precisión, se debe evitar golpes en ellos y que el recorrido de sus palpadores no sea brusco (para que no se produzcan daños o descalibraciones)
- No colocar cargas (fuerzas o pesos) a la máquina en ninguna circunstancia.
- Al colocar cualquiera de las probetas evitar golpearlas.
- Durante las pruebas no aplicar cargas variables en el cable, únicamente las pesas ya que pueden alterar los datos.
- Al momento de tomar los valores en los relojes comparadores y estos no estén en un valor exacto, tomar el inmediato superior o inferior.
- Según la norma ASTM E111 – 04 para determinar el módulo de elasticidad en pruebas a tracción, se recomienda un mínimo de 3 pruebas por cada punto de carga

en las probetas de ensayos, además durante la prueba no puede existir una diferencia de temperaturas mayor a $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, ya que pueden causar errores significativos en la deformación por la expansión térmica de la probeta.

- Al retirar los relojes comparadores de la máquina proteger los palpadores con sus cubiertas plásticas.
- Los pernos de sujeción de la probeta deben ser apretados en cruz.
- No asentar las pesas en la misma mesa en la que se encuentra la máquina, ya que esta puede deformarse y así producir errores en las pruebas.
- No dejar colocadas las pesas en el cable una vez terminado el ensayo.
- No exceder el peso que se encuentra especificado (5Kg).
- Al final de cada práctica realizar una limpieza del equipo.

4.1.4 Normas de seguridad

- Determinar un espacio fijo y seguro para el uso del equipo.
- Comprobar la fijación de la probeta antes del inicio de las prácticas.
- Mantener las pesas en un lugar seguro para evitar las caídas de las mismas o cualquier tipo de accidente.
- Al colocar las pesas en el cable de acero asegurarse de que queden enganchadas al mismo.
- El área para realizar los ensayos debe estar limpia y seca.
- Evitar colocar elementos sobre los relojes comparadores.

4.2 Prácticas en la máquina

Tomando en cuenta todos los puntos anteriormente descritos se realizaron las pruebas de laboratorio con la finalidad de encontrar las deflexiones que se producen en las probetas y con estos datos calcular el módulo de elasticidad del aluminio utilizado.

En el anexo 1 se presentan las tablas con los datos obtenidos durante las prácticas; A1 y A3 representan los puntos en los cuales están ubicados los relojes comparadores. Se realizan 30 pruebas por cada posición en la que se aplica la carga.

El anexo 2 tiene las tablas y gráficos estadísticos con la media de la deflexión resultante de las prácticas realizadas en el banco de pruebas tanto para la viga circular como para la rectangular.

4.2.1 Determinación del módulo de elasticidad de las probetas

Luego de realizadas las prácticas se procede a encontrar el módulo de elasticidad del aluminio utilizado en las probetas mediante cálculos numéricos, luego con el software de elementos finitos (ANSYS) se realizan comprobaciones de los resultados.

Se utiliza los datos de la media de la deformación provenientes de las prácticas de laboratorio que producen únicamente flexión en las probetas, es decir cuando se aplica la carga horizontal en el agujero 1 (A1) de cada uno de ellas.

Para calcular el módulo de elasticidad se utiliza la siguiente fórmula:

$$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$$

E → *Módulo de elasticidad (Pa)*

F → *Fuerza, Carga (N)*

L → *Longitud de la probeta (m)*

δ → *Deflexión (m)*

I → *Momento de inercia (m⁴)*

4.2.1.1 Probeta circular

El momento de inercia de una sección circular tubular es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{\pi}{4} (r \text{ ext.}^4 - r \text{ int.}^4)$$

$r \text{ ext.}$ → *Radio externo*

$r \text{ int.}$ → *Radio interno*

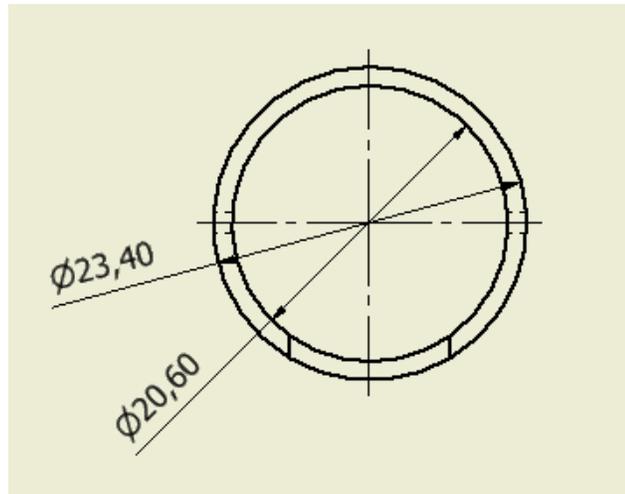


Figure 88: Sección probeta circular
 Fuente: Autor

$$I = \frac{\pi}{4} (11.7^4 - 10.3^4)$$

$$I = 5877.75 \text{ mm}^4$$

$$I = 5.878 * 10^{-9} \text{ m}^4$$

En la tabla 4.1 se encuentran los datos con los cuales se determina el módulo de elasticidad en la probeta de sección circular, al igual que el valor obtenido (el proceso se encuentra demostrado en el anexo 3):

Tabla 4.1: Datos para el cálculo del módulo de elasticidad del perfil circular con carga en A1

<i>F</i>	<i>L (m)</i>	δ (mm)	<i>I (m⁴)</i>	<i>E (GPa)</i>
1kg (9,81N)	0.407	0,545	5.878 * 10 ⁻⁹	68.9
2kg (19,62N)		1,118		67.1
3kg (29,43N)		1,697		66.3
4kg (39,24N)		2,274		65.97
5kg (49,05N)		2,841		66.01

Debido a que es un proceso experimental los valores del módulo de elasticidad no son iguales en todos los casos, por lo cual se procede a sacar un promedio de todos ellos y este será tomado como el valor final del módulo de elasticidad en el proyecto, con este se realizarán las comprobaciones tanto para cálculos numéricos como para el software de elementos finitos (ANSYS).

$$E = \frac{E1 + E2 + E3 + E4 + E5}{5}$$

$$E = \frac{68.9 + 67.1 + 66.3 + 65.97 + 66.01}{5}$$

$$E = 66.838 \text{ GPa}$$

4.2.1.2 Probeta cuadrada

El momento de inercia de una sección circular tubular es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$I = \frac{b \text{ ext.}^4}{12} - \frac{b \text{ int}^4}{12}$$

$b \text{ ext.} \rightarrow$ Base externa (Lado)

$b \text{ int.} \rightarrow$ Base interno (Lado)

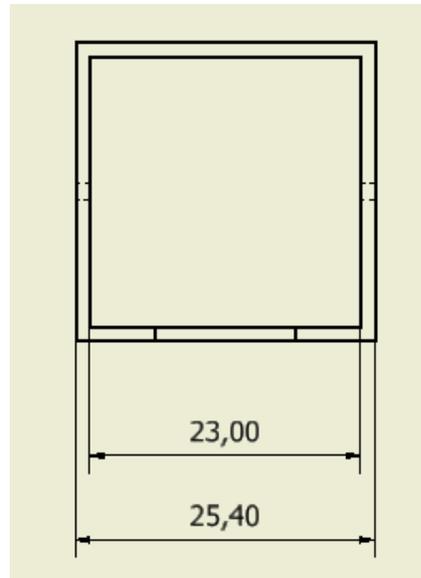


Figure 89: Sección probeta cuadrada
Fuente: Autor

$$I = \frac{25.4^4}{12} - \frac{23^4}{12}$$

$$I = 11366 \text{ mm}^4$$

$$I = 1.1366 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

En la tabla 4.2 se encuentran los datos con los cuales se determina el módulo de elasticidad en la probeta de sección cuadrada, al igual que el valor obtenido (el proceso se encuentra demostrado en el anexo 3):

Tabla 4.2: Datos para el cálculo del módulo de elasticidad del perfil cuadrado con carga en A1

F	L (m)	δ (mm)	I (m ⁴)	E (GPa)
1kg (9,81N)	0.407	0.287	1.1366×10^{-8}	67.58
2kg (19,62N)		0.596		65.09
3kg (29,43N)		0.905		64.3
4kg (39,24N)		1.216		63.8
5kg (49,05N)		1.519		63.85

Debido a que es un proceso experimental los valores del módulo de elasticidad no son iguales, por lo cual se procede a sacar un promedio de todos ellos y este será tomado como el valor final del módulo de elasticidad en el proyecto, con este se realizarán las comprobaciones tanto para cálculos matemáticos como para el software de elementos finitos (ANSYS).

$$E = \frac{E1 + E2 + E3 + E4 + E5}{5}$$

$$E = \frac{67.58 + 65.09 + 64.3 + 63.8 + 63.85}{5}$$

$$E = 64.924 \text{ GPa}$$

4.3 Comprobación

Una vez determinado el módulo de elasticidad de la probeta se determina el valor de deflexión que se debería producir debido a las cargas. Se utilizará tanto el valor del módulo de elasticidad obtenido como el provisto por las tablas de los fabricantes.

4.3.1 Comprobación mediante cálculos numéricos

Las fórmulas con las que se calcularán las deflexiones, dependiendo del punto en el que se apliquen las cargas, serán iguales tanto para la probeta circular como para la cuadrada. Los datos obtenidos en el punto A1 serán los mismos en todos los casos, es decir que se podrá aplicar cargas en cualquiera de los puntos y la deflexión será idéntica en ese punto. La demostración de la utilización de las formulas se encuentran en el anexo 4.

4.3.1.1 Carga en A1

$$\delta = \frac{F * L^3}{3 * E * I}$$

E → Módulo de elasticidad (Pa)

F → Fuerza, Carga (N)

L → Longitud (m)

δ → Deflexión (m)

I → Momento de inercia (m⁴)

4.3.1.2 Carga en A2

A continuación se desarrolla una fórmula para calcular la deflexión existente en el punto A3, cuando la carga se presenta en A2:

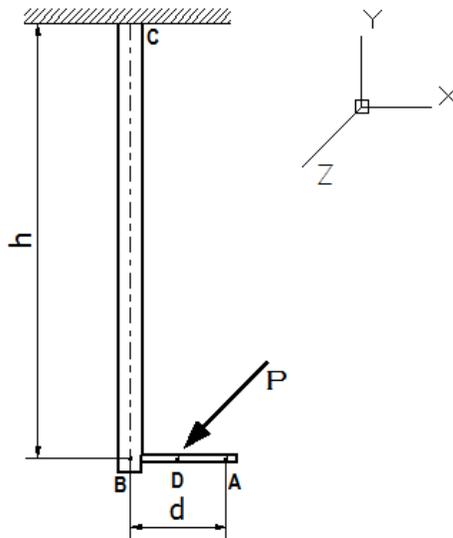


Figure 90: Carga en A2
Fuente: Autor

- Segmento AB

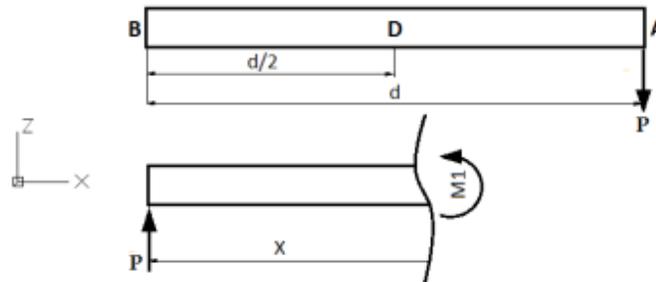


Figure 91: Carga en A2, segmento AB
Fuente: Autor

Flexión

$$\sum M_1^{\circ} = 0$$

$$M_1 = -P * x$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial P} = -x$$

- Segmento BC

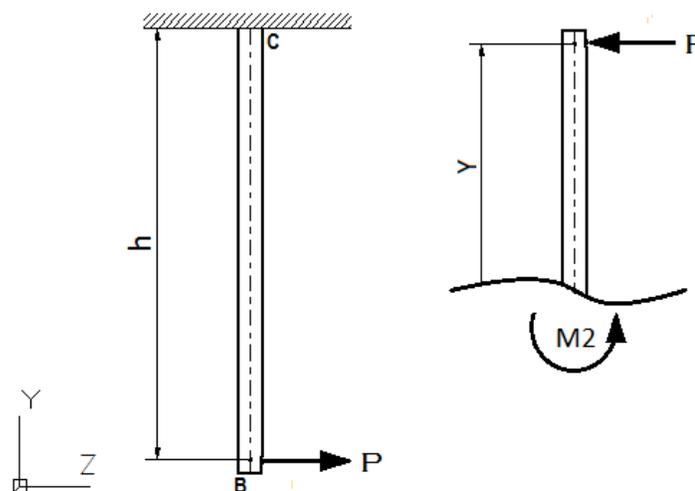


Figure 92: Carga en A2, segmento BC
Fuente: Autor

Flexión

Torsión

$$\sum M_2^c = 0$$

$$T = P * (d/2)$$

$$M_2 = -P * y$$

$$\frac{\partial T}{\partial P} = \left(\frac{d}{2}\right)$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial P} = -y$$

$$\delta_{A_2} = \int_0^d \left(\frac{M_1}{E_b * I_b}\right) \left(\frac{\partial M_1}{\partial P}\right) dx + \int_0^h \left(\frac{M_2}{E_t * I_t}\right) \left(\frac{\partial M_2}{\partial P}\right) dy + \int_0^h \left(\frac{T}{J * G}\right) \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right) dy$$

$$\delta_{A_2} = \int_0^d \left(\frac{-P * x}{E_b * I_b}\right) (-x) dx + \int_0^h \left(\frac{-P * y}{E_t * I_t}\right) (-y) dy + \int_0^h \left(\frac{P * (d/2)}{J * G}\right) \left(\frac{d}{2}\right) dy$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P}{E_b * I_b}\right) \int_0^d (x^2) dx + \left(\frac{P}{E_t * I_t}\right) \int_0^h (y^2) dy + \left(\frac{P * d^2}{4 * J * G}\right) \int_0^h dy$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P}{3 * E_b * I_b}\right) x^3 \Big|_0^d + \left(\frac{P}{3 * E_t * I_t}\right) y^3 \Big|_0^h + \left(\frac{P * d^2}{4 * J * G}\right) y \Big|_0^h$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b}\right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t}\right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G}\right)$$

$\delta_{A_2} \rightarrow$ Deflexión en A_3 con carga en A_2 (m)

$E_b \rightarrow$ Módulo de elasticidad de la barra de torsión (Pa)

$E_t \rightarrow$ Módulo de elasticidad del tubo de aluminio (Pa)

$I_b \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$I_t \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$P \rightarrow$ Fuerza, Carga (N)

$h \rightarrow$ Longitud probeta (m)

$d \rightarrow$ Longitud brazo de torsión (m)

$T \rightarrow$ Torque (N * m)

$G \rightarrow$ Módulo de rigidez del tubo de aluminio (Pa)

$J \rightarrow$ Momento polar de inercia del tubo de aluminio (m^4)

4.3.1.3 Carga en A3

A continuación se desarrolla una fórmula para calcular la deflexión existente en el punto A3, cuando la carga se presenta en A3:

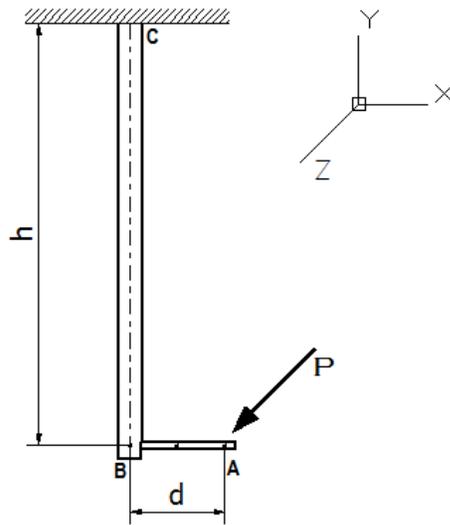


Figure 93: Carga en A3, segmento AB
Fuente: Autor

- Segmento AB

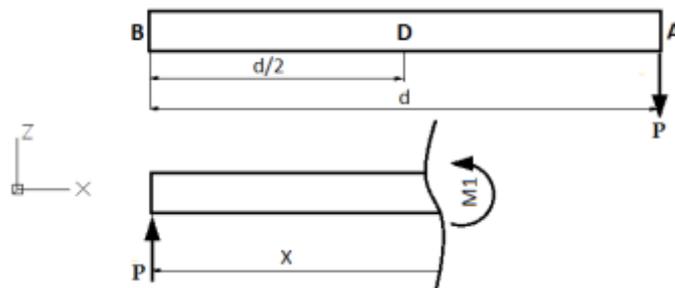


Figure 94: Carga en A3, segmento AB
Fuente: Autor

Flexión

$$\sum M_1^{\circ} = 0$$

$$M_1 = -P * x$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial P} = -x$$

- Segmento BC

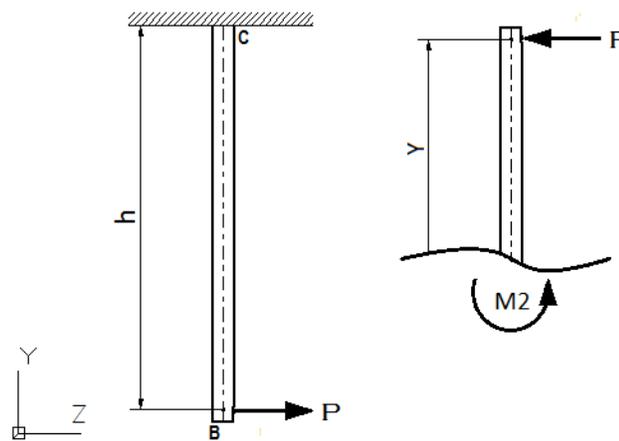


Figure 95: Carga en A3, segmento BC
Fuente: Autor

Flexión

$$\sum M_2^{\circ} = 0$$

$$M_2 = -P * y$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial P} = -y$$

Torsión

$$T = P * d$$

$$\frac{\partial T}{\partial P} = d$$

$$\delta_{A_3} = \int_0^d \left(\frac{M_1}{E_b * I_b} \right) \left(\frac{\partial M_1}{\partial P} \right) dx + \int_0^h \left(\frac{M_2}{E_t * I_t} \right) \left(\frac{\partial M_2}{\partial P} \right) dy + \int_0^h \left(\frac{T}{J * G} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right) dy$$

$$\delta_{A_3} = \int_0^d \left(\frac{-P * x}{E_b * I_b} \right) (-x) dx + \int_0^h \left(\frac{-P * y}{E_t * I_t} \right) (-y) dy + \int_0^h \left(\frac{P * d}{J * G} \right) (d) dy$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P}{E_b * I_b} \right) \int_0^d (x^2) dx + \left(\frac{P}{E_t * I_t} \right) \int_0^h (y^2) dy + \left(\frac{P * d^2}{J * G} \right) \int_0^h dy$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P}{3 * E_b * I_b} \right) x^3 \Big|_0^d + \left(\frac{P}{3 * E_t * I_t} \right) y^3 \Big|_0^h + \left(\frac{P * d^2}{J * G} \right) y \Big|_0^h$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$\delta_{A_2} \rightarrow$ Deflexión en A_3 con carga en A_2 (m)

$E_b \rightarrow$ Módulo de elasticidad de la barra de torsión (Pa)

$E_t \rightarrow$ Módulo de elasticidad del tubo de aluminio (Pa)

$I_b \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$I_t \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$P \rightarrow$ Fuerza, Carga (N)

$h \rightarrow$ Longitud probeta (m)

$d \rightarrow$ Longitud brazo de torsión (m)

$T \rightarrow$ Torque (N * m)

$G \rightarrow$ Módulo de rigidez del tubo de aluminio (Pa)

$J \rightarrow$ Momento polar de inercia del tubo de aluminio (m^4)

4.3.2 Comprobación mediante software de elementos finitos

Para el cálculo estático realizado en el software de elementos finitos (ANSYS), se deben seguir pasos similares a los descritos en el punto 1.3 del capítulo 2, con la diferencia que este momento se tomará el gráfico correspondiente a cada probeta previamente realizada en la plataforma INVENTOR.

Para iniciar el análisis se tiene **engineering data**, el cual permitirá seleccionar los materiales de fabricación de la probeta de ensayos, como en este caso el aluminio cargado

dentro de la biblioteca de materiales no tiene las mismas propiedades que el aluminio que se utiliza, se crea un nuevo material de esta manera:

- Se hace doble clic en **engineering data** con lo cual presenta una pantalla como la que se muestra en la figura 4.15; en el lugar que exhibe la flecha se coloca el nombre al nuevo material que se desea crear para que tenga las propiedades que se necesita para el cálculo requerido. El nombre que se le da al nuevo material es “ALUMINIO PROBETA”

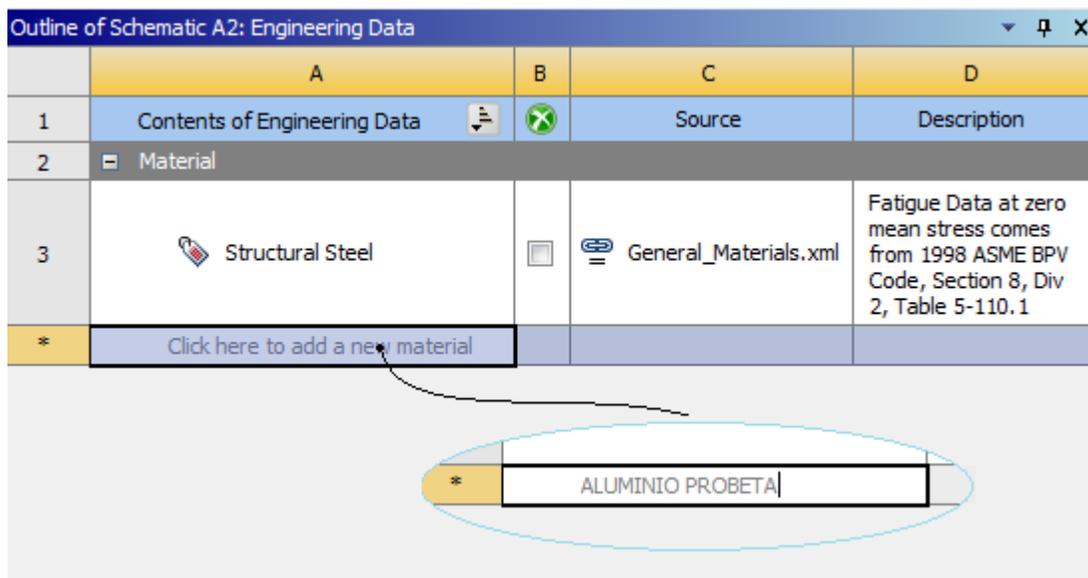


Figure 96: Biblioteca de materiales
Fuente: Autor

Ahora se le deben dar las propiedades al material creado, estas pueden ser térmicas, físicas, lineares, elásticas, visco elásticas, plásticas y más, se las escoge en la columna izquierda denominada **toolbox**, para el caso requerido se determinan las propiedades isotrópicas elásticas (**isotropic elasticity**), resistencia a la tracción (**tensile yield strength**) y resistencia ultima a la tracción (**tensile ultimate strength**), se rellena los datos requeridos dentro de estas propiedades como el módulo de Young, coeficiente de Poisson y otros datos requeridos (se muestran en amarillo como en la figura 4.16).

NOTA: Los valores son tomados de la ficha de datos del aluminio 6063 T5, excepto el módulo de Young, para este utilizamos el anteriormente calculado.

Properties of Outline Row 4: Aluminio Probeta				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	 
2	  Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
3	Derive from	Young's M... 		
4	Young's Modulus		Pa 	<input type="checkbox"/>
5	Poisson's Ratio			<input type="checkbox"/>
6	Bulk Modulus		Pa	<input type="checkbox"/>
7	Shear Modulus		Pa	<input type="checkbox"/>
8	 Tensile Yield Strength		Pa 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
9	 Tensile Ultimate Strength		Pa 	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Figure 97: Propiedades nuevo material
Fuente: Autor

Luego de haber asignado las propiedades al material se importa el gráfico de la probeta, previamente dibujado en la plataforma INVENTOR, al mismo se le deben determinar para cada pieza que lo conforma un material con el cual fueron fabricados.

A continuación se determinan las cargas (con sus valores) y el soporte. Por último se determina qué tipo de análisis se desea realizar. Se deben tomar los datos de la deformación en el punto A1 y A3 para posteriormente analizarlos.

4.4 Comparación de datos y porcentaje de error

El anexo E contiene una comparación de los datos obtenidos durante las prácticas, los obtenidos en forma numérica, los obtenidos con el software de elementos finitos (ANSYS), para posteriormente sacar el porcentaje de error con respecto a la práctica mediante la siguiente fórmula:

$$\%Error = \left(\frac{Valor\ práctico - Valor\ teórico}{Valor\ teórico} \right) (100)$$

El error que se presenta en el módulo de elasticidad es el siguiente para cada probeta:

<u>Probeta circular</u>	<u>Probeta cuadrada</u>
$\%Error = \left(\frac{66.838 - 68.9}{68.9} \right) (100)$	$\%Error = \left(\frac{64.924 - 68.9}{68.9} \right) (100)$
$\%Error = 2.99\%$	$\%Error = 5.77\%$

Esto quiere decir que durante las practicas la máquina presentó un error de funcionamiento máximo de 5.77% con respecto a los valores proporcionados por el fabricante.

4.4.1 Análisis gráfico de resultados

En las gráficas 4.17, 4.18 se observan los puntos de la media obtenidos durante las prácticas de laboratorio, al igual que los analíticos y numéricos. Se los ha correlacionado entre ellos para crear una línea de regresión que representa la flexión o torsión generada por las cargas.

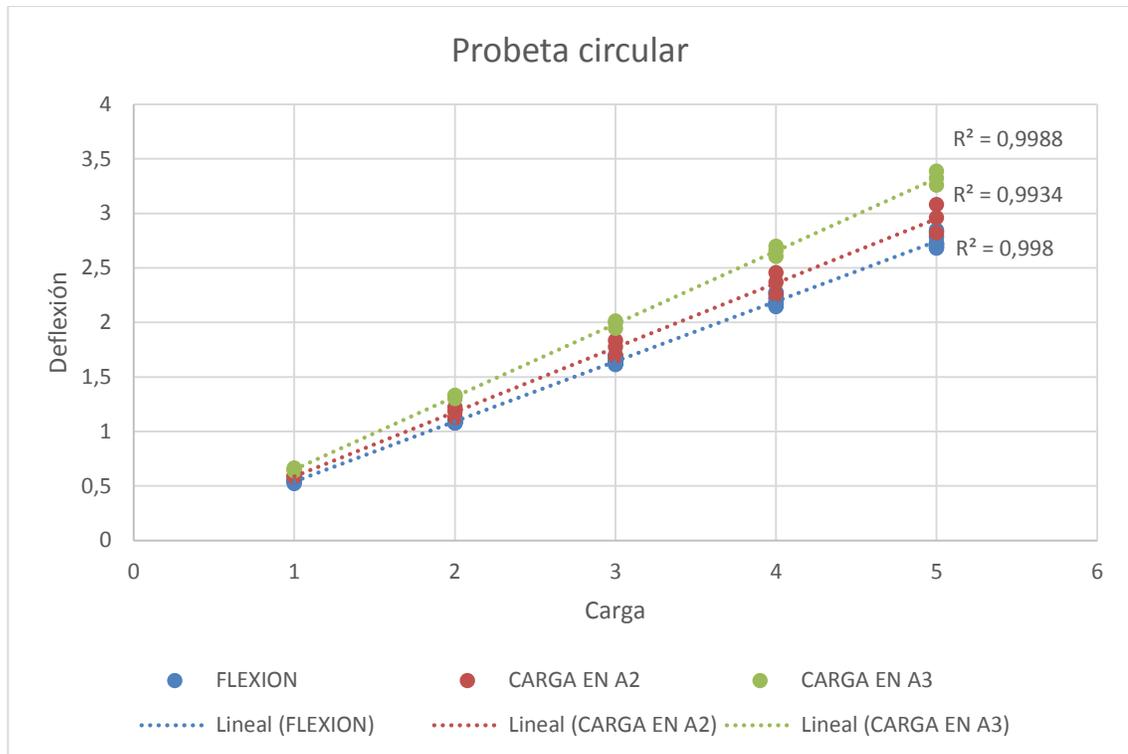


Figure 987: Grafico estadístico de resultados en probeta circular.
Fuente: Autor

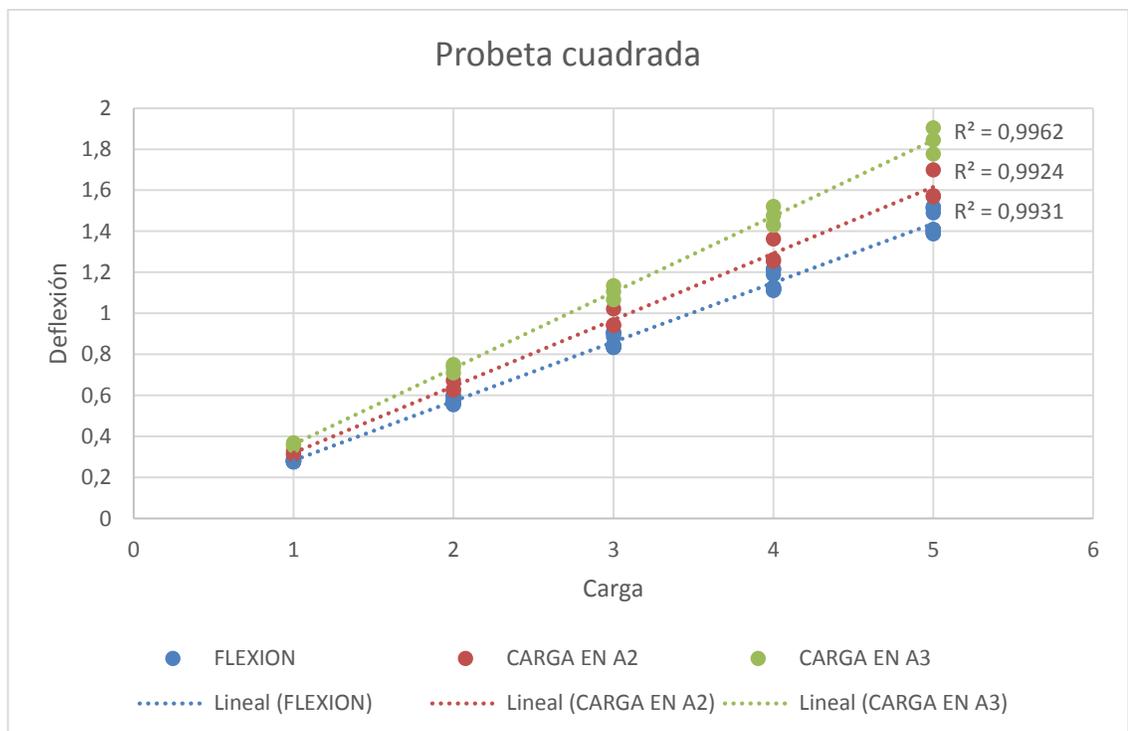


Figure 99: Grafico estadístico de resultados en probeta cuadrada
Fuente: Autor

4.5 Evaluación de la máquina

Tabla 4.3: Evaluación de la máquina de ensayos

Descripción	Calificación
Confiabilidad	Excelente
Precisión	Muy buena
Durabilidad	Excelente
Facilidad de manejo del equipo	Muy buena
Análisis de resultados	Muy buena
Aplicabilidad	Excelente

- Confiabilidad: para evaluar este aspecto se toma en consideración los valores obtenidos durante el proceso de diseño del equipo en el capítulo 2.
- Precisión: se analiza el porcentaje de error obtenido en el análisis de datos.
- Durabilidad: según los materiales y procesos de protección (anticorrosivos) utilizados durante la construcción del equipo se evalúa este punto.
- Facilidad de manejo del equipo: se valora la dificultad que se presenta durante el uso de la máquina y sus elementos.
- Análisis de resultados: se toma en cuenta la facilidad para asociar los resultados experimentales con los impartidos en clases.
- Aplicabilidad: se refiere al uso que se le pueden dar al equipo dentro del ámbito didáctico.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La máquina de ensayos construida es un equipo didáctico que permitirá a los estudiantes y docentes realizar pruebas para determinar el módulo de elasticidad del aluminio u otro tipo de metal del cual este construida la probeta de ensayos.
- Se detalló el correcto procedimiento para realizar las prácticas en la máquina de ensayos, tomando en cuenta las normas de seguridad y recomendaciones de uso del equipo y así evitar que se generen errores que afecten en la toma e interpretación de datos.
- El módulo de elasticidad se determinó en dos probetas de aluminio de distintas secciones transversales mediante esta máquina de ensayos. Comparando los valores dados por el fabricante y el obtenido, se determinó un error del 2.99% para la probeta de sección circular y del 5.77% para la probeta de sección cuadrada, lo cual revela una precisión aceptable y también indica que se puede incentivar para futuros estudios en materiales que se utilicen en nuestro medio.
- El aluminio 6063 T5 suministrado por la fábrica CEDAL S.A. en Ecuador cumple con valor del módulo de elasticidad según la norma ANSI/ASTM.
- Para la fabricación de la base de fijación de las probetas, inicialmente se utilizó una aleación de aluminio sin normas de calidad, el cual produjo errores durante las pruebas experimentales, por lo tanto, se debió sustituir esta pieza por otra fabricada en acero estructural; debido a esta experiencia y en caso de producir una nueva probeta de ensayos, se recomienda utilizar materiales con normas de calidad y propiedades mecánicas conocidas.

- En las pruebas experimentales se realizaron 30 ensayos por cada punto de carga para encontrar un valor medio que determine la muestra de comportamiento de la probeta; para las posteriores prácticas académicas es recomendable realizar un mínimo de 3 pruebas para minimizar errores de uso del equipo.
- Es importante también tomar en cuenta que la temperatura del ambiente sea de 20°C y que no exista una variación durante las pruebas experimentales mayor a $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$, ya que pueden causar errores significativos en la deformación por la expansión térmica de la probeta.

BIBLIOGRAFÍA

- Ashby, M., & Jones , D. (2008). *Materiales para Ingeniería 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño* (Vol. I). España: Reverté.
- Beer, F., Johnston, E., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales*. México: The McGraw-Hill.
- Callister, D. (2012). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Mexico: Limusa Willey.
- Celigüeta, J. (2011, Junio). *Método de elementos finitos para análisis estructural*. Retrieved from [http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000002130/Elementos%20Finitos\(2\).pdf](http://www.unav.es/adi/UserFiles/File/4000002130/Elementos%20Finitos(2).pdf)
- Cubillos, A. (2007). *Introducción al método de los elementos finitos*. Retrieved from <http://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf>
- Fajardo, J. (2013). *Análisis Estructural*. Retrieved from <http://portales.puj.edu.co/wjfajardo/AN%C3%81LISIS%20DE%20ESTRUCTURAS%20I/NOTAS%20AN%C3%81LISIS%20ESTRUCTURAS%20I/ANALISIS%20ESTRUCTURAL%20PARTE%20III.pdf>
- Hibbeler, R. (2012). *Análisis Estructural* (Vol. 8). Mexico: Pearson Education.
- Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales* (Vol. V). Mexico: Pearson Educación.
- Sanchez, M., & Campos , I. (2010). *Tecnología de materiales* (Vol. IV). México: Trillas.
- Shigley, J., & Mischke, C. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (Vol. 7). Mexico: The McGraw-Hill. Retrieved 2014
- Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales* (Vol. IV). México: McGraw-Hill.

Universidad Tecnológica de Pereira. (2012). *Propiedades mecánicas de los materiales*. Retrieved from <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2012/07/31/2-propiedades-mecánicas-de-los-materiales/>

ANEXOS

Anexo A: Tablas de datos de pruebas experimentales

En este anexo se presentan las tablas con los datos obtenidos durante las prácticas; A1 (Agujero 1) y A3 (Agujero 3) representan los puntos en los cuales están ubicados los relojes comparadores. Se realizan 30 pruebas por cada posición en la que se aplica la carga.

- Probeta circular

CARGA EN A1										
	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4		PRUEBA 5	
	A1	A3								
1kg	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56	0,57	0,57	0,57	0,56
2kg	1,14	1,13	1,14	1,13	1,14	1,13	1,14	1,13	1,14	1,14
3kg	1,72	1,71	1,72	1,72	1,72	1,71	1,74	1,73	1,72	1,72
4kg	2,31	2,3	2,31	2,3	2,31	2,29	2,31	2,29	2,3	2,29
5kg	2,88	2,87	2,89	2,88	2,89	2,87	2,88	2,87	2,88	2,87

	PRUEBA 6		PRUEBA 7		PRUEBA 8		PRUEBA 9		PRUEBA 10	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,57	0,57	0,55	0,55	0,55	0,56	0,55	0,55	0,56	0,56
2kg	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
3kg	1,71	1,71	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,71
4kg	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,29	2,31	2,3	2,3	2,29
5kg	2,88	2,87	2,88	2,87	2,88	2,87	2,88	2,88	2,88	2,87

	PRUEBA 11		PRUEBA 12		PRUEBA 13		PRUEBA 14		PRUEBA 15	
	A1	A3								
1kg	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,53	0,53
2kg	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
3kg	1,67	1,66	1,66	1,65	1,66	1,65	1,66	1,65	1,66	1,65
4kg	2,25	2,24	2,23	2,22	2,23	2,22	2,24	2,23	2,24	2,23
5kg	2,81	2,8	2,8	2,79	2,8	2,79	2,8	2,78	2,79	2,78

	PRUEBA 16		PRUEBA 17		PRUEBA 18		PRUEBA 19		PRUEBA 20	
	A1	A3								
1kg	0,53	0,53	0,52	0,52	0,56	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54
2kg	1,09	1,09	1,09	1,09	1,12	1,12	1,11	1,11	1,12	1,12
3kg	1,66	1,65	1,66	1,65	1,7	1,7	1,7	1,7	1,71	1,7
4kg	2,24	2,23	2,22	2,2	2,29	2,28	2,29	2,28	2,3	2,29
5kg	2,8	2,78	2,79	2,78	2,86	2,85	2,85	2,85	2,86	2,85

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
2kg	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,12	1,12
3kg	1,71	1,71	1,7	1,7	1,71	1,71	1,7	1,69	1,7	1,69
4kg	2,28	2,27	2,28	2,27	2,28	2,27	2,28	2,27	2,28	2,27
5kg	2,85	2,85	2,85	2,84	2,84	2,83	2,84	2,83	2,84	2,83

	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,55	0,55	0,54	0,54	0,55	0,55	0,54	0,54	0,55	0,55
2kg	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13
3kg	1,72	1,71	1,7	1,69	1,7	1,69	1,7	1,7	1,7	1,7
4kg	2,28	2,27	2,26	2,26	2,28	2,28	2,28	2,27	2,27	2,26
5kg	2,84	2,83	2,83	2,83	2,84	2,83	2,83	2,82	2,84	2,83

CARGA EN A2										
	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4		PRUEBA 5	
	A1	A3								
1kg	0,57	0,63	0,56	0,63	0,56	0,63	0,56	0,63	0,56	0,63
2kg	1,15	1,26	1,13	1,25	1,14	1,26	1,14	1,26	1,14	1,26
3kg	1,7	1,87	1,69	1,86	1,69	1,87	1,71	1,88	1,7	1,87
4kg	2,27	2,49	2,26	2,5	2,27	2,49	2,27	2,49	2,26	2,49
5kg	2,85	3,13	2,83	3,12	2,83	3,11	2,83	3,1	2,83	3,1

	PRUEBA 6		PRUEBA 7		PRUEBA 8		PRUEBA 9		PRUEBA 10	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,56	0,63	0,55	0,62	0,56	0,63	0,56	0,61	0,57	0,64
2kg	1,13	1,25	1,14	1,26	1,13	1,25	1,13	1,25	1,15	1,26
3kg	1,69	1,86	1,69	1,86	1,69	1,87	1,71	1,87	1,71	1,88
4kg	2,26	2,48	2,26	2,48	2,26	2,49	2,27	2,5	2,29	2,51
5kg	2,84	3,11	2,83	3,1	2,83	3,11	2,84	3,13	2,86	3,14

	PRUEBA 11		PRUEBA 12		PRUEBA 13		PRUEBA 14		PRUEBA 15	
	A1	A3								
1kg	0,55	0,6	0,54	0,59	0,56	0,61	0,55	0,59	0,55	0,59
2kg	1,11	1,21	1,1	1,21	1,11	1,22	1,11	1,22	1,11	1,22
3kg	1,66	1,82	1,65	1,82	1,66	1,82	1,66	1,83	1,66	1,83
4kg	2,21	2,4	2,21	2,44	2,21	2,43	2,22	2,44	2,22	2,45
5kg	2,77	3,05	2,78	3,06	2,77	3,05	2,78	3,06	2,78	3,06

	PRUEBA 16		PRUEBA 17		PRUEBA 18		PRUEBA 19		PRUEBA 20	
	A1	A3								
1kg	0,5	0,56	0,51	0,56	0,51	0,56	0,51	0,57	0,51	0,56
2kg	1,06	1,18	1,06	1,19	1,06	1,19	1,06	1,19	1,07	1,19
3kg	1,62	1,8	1,62	1,8	1,63	1,8	1,63	1,8	1,63	1,81
4kg	2,18	2,42	2,18	2,42	2,19	2,43	2,18	2,42	2,19	2,43
5kg	2,75	3,05	2,74	3,04	2,75	3,05	2,75	3,04	2,76	3,06

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,51	0,56	0,51	0,56	0,51	0,57	0,51	0,57	0,51	0,57
2kg	1,08	1,19	1,07	1,2	1,06	1,19	1,07	1,2	1,07	1,2
3kg	1,63	1,8	1,62	1,8	1,62	1,8	1,63	1,81	1,63	1,81
4kg	2,19	2,43	2,18	2,42	2,18	2,42	2,18	2,43	2,18	2,42
5kg	2,75	3,05	2,75	3,05	2,74	3,04	2,75	3,05	2,75	3,05

	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,52	0,58	0,53	0,59	0,51	0,57	0,52	0,58	0,52	0,57
2kg	1,1	1,22	1,1	1,21	1,09	1,21	1,1	1,21	1,09	1,21
3kg	1,69	1,85	1,69	1,85	1,68	1,84	1,68	1,84	1,68	1,84
4kg	2,26	2,48	2,25	2,47	2,26	2,48	2,26	2,48	2,25	2,47
5kg	2,83	3,11	2,83	3,1	2,82	3,1	2,83	3,1	2,83	3,1

CARGA EN A3										
	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4		PRUEBA 5	
	A1	A3								
1kg	0,55	0,68	0,56	0,68	0,55	0,68	0,55	0,68	0,56	0,69
2kg	1,13	1,38	1,13	1,38	1,12	1,38	1,13	1,39	1,13	1,39
3kg	1,69	2,07	1,69	2,06	1,68	2,06	1,69	2,06	1,69	2,07
4kg	2,25	2,75	2,26	2,75	2,25	2,74	2,25	2,74	2,26	2,75
5kg	2,83	3,44	2,82	3,44	2,82	3,44	2,82	3,44	2,82	3,44

	PRUEBA 6		PRUEBA 7		PRUEBA 8		PRUEBA 9		PRUEBA 10	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,55	0,68	0,55	0,68	0,55	0,68	0,56	0,68	0,51	0,62
2kg	1,13	1,39	1,13	1,39	1,13	1,39	1,13	1,38	1,07	1,31
3kg	1,68	2,06	1,69	2,06	1,69	2,07	1,69	2,07	1,63	1,98
4kg	2,25	2,74	2,24	2,74	2,26	2,75	2,25	2,75	2,19	2,67
5kg	2,82	3,43	2,82	3,44	2,82	3,44	2,83	3,44	2,74	3,34

	PRUEBA 11		PRUEBA 12		PRUEBA 13		PRUEBA 14		PRUEBA 15	
	A1	A3								
1kg	0,51	0,62	0,51	0,62	0,52	0,62	0,51	0,62	0,51	0,62
2kg	1,07	1,31	1,06	1,3	1,07	1,32	1,07	1,32	1,06	1,3
3kg	1,62	1,98	1,62	1,97	1,63	1,98	1,62	1,98	1,62	1,97
4kg	2,19	2,67	2,17	2,66	2,18	2,67	2,18	2,67	2,17	2,66
5kg	2,75	3,35	2,74	3,34	2,75	3,35	2,75	3,34	2,74	3,34

	PRUEBA 16		PRUEBA 17		PRUEBA 18		PRUEBA 19		PRUEBA 20	
	A1	A3								
1kg	0,5	0,61	0,5	0,62	0,51	0,62	0,51	0,62	0,5	0,61
2kg	1,06	1,3	1,07	1,3	1,06	1,3	1,06	1,3	1,07	1,31
3kg	1,64	1,99	1,64	2	1,63	1,99	1,63	1,99	1,63	1,99
4kg	2,2	2,69	2,2	2,68	2,2	2,68	2,19	2,68	2,19	2,68
5kg	2,77	3,38	2,75	3,36	2,76	3,37	2,76	3,36	2,75	3,36

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,51	0,62	0,5	0,61	0,5	0,61	0,5	0,61	0,5	0,61
2kg	1,07	1,31	1,07	1,3	1,07	1,3	1,08	1,32	1,07	1,31
3kg	1,64	1,99	1,63	1,99	1,64	2	1,64	2	1,64	2
4kg	2,19	2,68	2,19	2,68	2,2	2,68	2,2	2,68	2,2	2,68
5kg	2,76	3,37	2,76	3,36	2,76	3,37	2,77	3,37	2,76	3,37

	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,5	0,62	0,51	0,62	0,51	0,63	0,51	0,63	0,52	0,63
2kg	1,07	1,3	1,07	1,3	1,07	1,3	1,08	1,31	1,08	1,31
3kg	1,64	1,99	1,64	1,99	1,65	1,99	1,65	2	1,65	2
4kg	2,21	2,69	2,22	2,69	2,21	2,69	2,22	2,69	2,22	2,69
5kg	2,78	3,38	2,79	3,38	2,79	3,38	2,79	3,38	2,79	3,38

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,3	0,3
2kg	0,6	0,59	0,59	0,59	0,6	0,59	0,6	0,6	0,6	0,59
3kg	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,91	0,91
4kg	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,21	1,22	1,22
5kg	1,52	1,51	1,52	1,51	1,52	1,51	1,52	1,51	1,52	1,51

	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
2kg	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
3kg	0,91	0,91	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,92
4kg	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
5kg	1,53	1,53	1,54	1,54	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53

CARGA EN A2										
	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4		PRUEBA 5	
	A1	A3								
1kg	0,3	0,34	0,3	0,34	0,3	0,34	0,31	0,34	0,31	0,35
2kg	0,61	0,68	0,62	0,69	0,61	0,69	0,61	0,69	0,62	0,69
3kg	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03
4kg	1,22	1,38	1,23	1,37	1,22	1,37	1,22	1,37	1,22	1,37
5kg	1,53	1,71	1,53	1,71	1,53	1,71	1,53	1,71	1,53	1,71

	PRUEBA 6		PRUEBA 7		PRUEBA 8		PRUEBA 9		PRUEBA 10	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,3	0,34	0,31	0,34	0,3	0,33	0,3	0,34	0,3	0,34
2kg	0,62	0,69	0,61	0,68	0,61	0,68	0,61	0,68	0,62	0,69
3kg	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03	0,92	1,03
4kg	1,22	1,37	1,22	1,37	1,22	1,37	1,22	1,37	1,23	1,37
5kg	1,52	1,71	1,52	1,71	1,52	1,7	1,52	1,7	1,52	1,7

	PRUEBA 11		PRUEBA 12		PRUEBA 13		PRUEBA 14		PRUEBA 15	
	A1	A3								
1kg	0,3	0,33	0,29	0,32	0,29	0,32	0,29	0,32	0,29	0,32
2kg	0,61	0,67	0,6	0,67	0,59	0,66	0,59	0,66	0,59	0,66
3kg	0,91	1,02	0,91	1,02	0,9	1,01	0,9	1,01	0,9	1,01
4kg	1,22	1,37	1,22	1,37	1,2	1,35	1,2	1,35	1,2	1,35
5kg	1,52	1,7	1,52	1,71	1,49	1,68	1,5	1,68	1,5	1,68

	PRUEBA 16		PRUEBA 17		PRUEBA 18		PRUEBA 19		PRUEBA 20	
	A1	A3								
1kg	0,3	0,33	0,3	0,33	0,29	0,32	0,3	0,33	0,29	0,32
2kg	0,59	0,66	0,6	0,67	0,6	0,67	0,59	0,66	0,59	0,66
3kg	0,9	1,01	0,9	1,01	0,9	1,01	0,9	1,01	0,9	1,02
4kg	1,21	1,35	1,21	1,35	1,2	1,35	1,21	1,36	1,2	1,35
5kg	1,5	1,69	1,5	1,69	1,5	1,69	1,5	1,69	1,5	1,69

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,29	0,32	0,29	0,33	0,29	0,33	0,29	0,32	0,29	0,33
2kg	0,6	0,67	0,6	0,67	0,6	0,67	0,6	0,67	0,6	0,67
3kg	0,9	1,02	0,91	1,02	0,9	1,02	0,9	1,02	0,91	1,03
4kg	1,21	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36	1,22	1,37	1,22	1,37
5kg	1,51	1,7	1,51	1,7	1,52	1,71	1,52	1,71	1,52	1,71

	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,29	0,32	0,29	0,33	0,29	0,33	0,29	0,32	0,29	0,33
2kg	0,59	0,67	0,6	0,67	0,6	0,67	0,6	0,68	0,6	0,68
3kg	0,91	1,03	0,91	1,02	0,91	1,02	0,91	1,02	0,91	1,03
4kg	1,21	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36	1,21	1,36
5kg	1,51	1,7	1,51	1,7	1,51	1,7	1,5	1,7	1,51	1,7

CARGA EN A3										
	PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4		PRUEBA 5	
	A1	A3								
1kg	0,28	0,35	0,27	0,34	0,27	0,35	0,27	0,35	0,27	0,34
2kg	0,59	0,75	0,58	0,74	0,58	0,74	0,6	0,76	0,59	0,75
3kg	0,89	1,13	0,88	1,12	0,88	1,12	0,89	1,12	0,89	1,13
4kg	1,19	1,51	1,19	1,51	1,18	1,51	1,19	1,51	1,19	1,51
5kg	1,49	1,9	1,48	1,89	1,48	1,89	1,49	1,89	1,49	1,9

	PRUEBA 6		PRUEBA 7		PRUEBA 8		PRUEBA 9		PRUEBA 10	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,28	0,35	0,28	0,35	0,28	0,35	0,28	0,35	0,28	0,35
2kg	0,59	0,75	0,6	0,76	0,59	0,75	0,59	0,75	0,59	0,75
3kg	0,89	1,13	0,9	1,13	0,89	1,13	0,89	1,13	0,89	1,13
4kg	1,19	1,52	1,2	1,52	1,19	1,51	1,2	1,52	1,19	1,52
5kg	1,5	1,9	1,49	1,9	1,49	1,9	1,5	1,9	1,5	1,9

	PRUEBA 11		PRUEBA 12		PRUEBA 13		PRUEBA 14		PRUEBA 15	
	A1	A3								
1kg	0,27	0,36	0,28	0,37	0,28	0,37	0,28	0,37	0,28	0,37
2kg	0,58	0,76	0,58	0,76	0,58	0,76	0,59	0,77	0,59	0,76
3kg	0,89	1,15	0,89	1,15	0,89	1,15	0,89	1,16	0,89	1,15
4kg	1,19	1,53	1,19	1,54	1,2	1,54	1,2	1,54	1,2	1,54
5kg	1,49	1,92	1,49	1,92	1,5	1,92	1,5	1,92	1,51	1,93

	PRUEBA 16		PRUEBA 17		PRUEBA 18		PRUEBA 19		PRUEBA 20	
	A1	A3								
1kg	0,28	0,37	0,28	0,37	0,28	0,37	0,28	0,37	0,28	0,37
2kg	0,58	0,76	0,59	0,76	0,59	0,76	0,59	0,77	0,6	0,77
3kg	0,89	1,15	0,9	1,16	0,89	1,15	0,9	1,16	0,9	1,16
4kg	1,2	1,54	1,2	1,54	1,2	1,54	1,2	1,54	1,2	1,56
5kg	1,5	1,92	1,51	1,93	1,5	1,93	1,5	1,92	1,5	1,93

	PRUEBA 21		PRUEBA 22		PRUEBA 23		PRUEBA 24		PRUEBA 25	
	A1	A3								
1kg	0,27	0,36	0,27	0,36	0,27	0,36	0,28	0,36	0,28	0,37
2kg	0,58	0,74	0,57	0,74	0,57	0,74	0,58	0,74	0,57	0,74
3kg	0,87	1,12	0,87	1,12	0,88	1,13	0,88	1,13	0,87	1,12
4kg	1,17	1,51	1,18	1,51	1,17	1,51	1,18	1,51	1,18	1,51
5kg	1,48	1,89	1,48	1,89	1,48	1,89	1,48	1,89	1,48	1,89

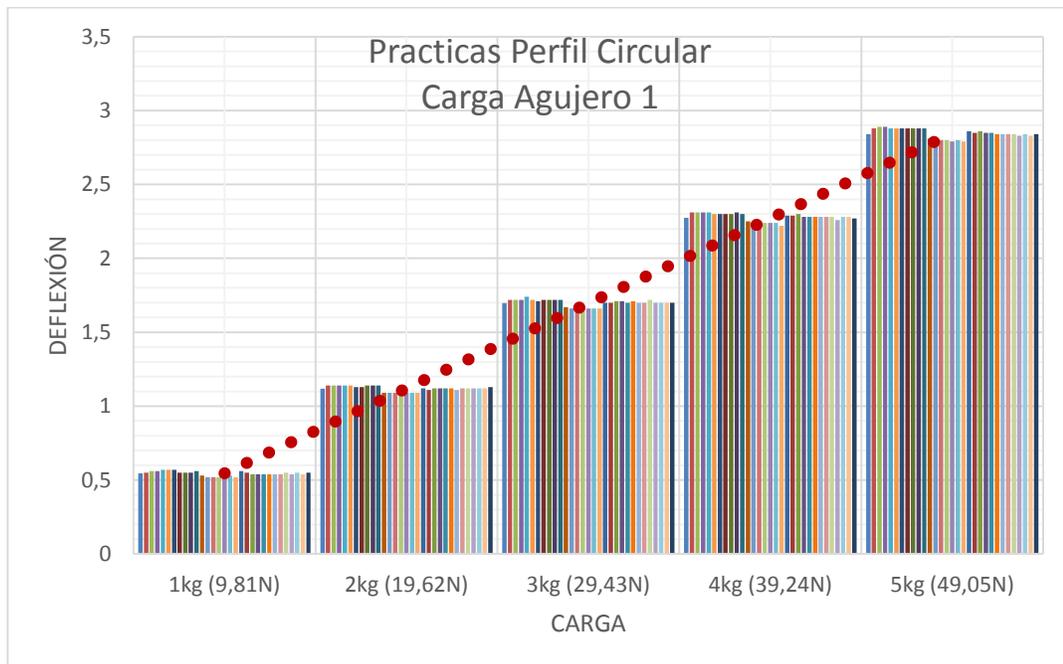
	PRUEBA 26		PRUEBA 27		PRUEBA 28		PRUEBA 29		PRUEBA 30	
	A1	A3								
1kg	0,27	0,36	0,27	0,36	0,27	0,36	0,28	0,36	0,28	0,36
2kg	0,58	0,74	0,58	0,74	0,57	0,74	0,59	0,75	0,58	0,74
3kg	0,88	1,13	0,88	1,12	0,89	1,13	0,88	1,12	0,88	1,13
4kg	1,18	1,51	1,18	1,51	1,18	1,51	1,18	1,51	1,19	1,51
5kg	1,48	1,9	1,48	1,89	1,48	1,89	1,48	1,89	1,48	1,89

Anexo B: Tablas y gráficos estadísticos de resultados de pruebas experimentales

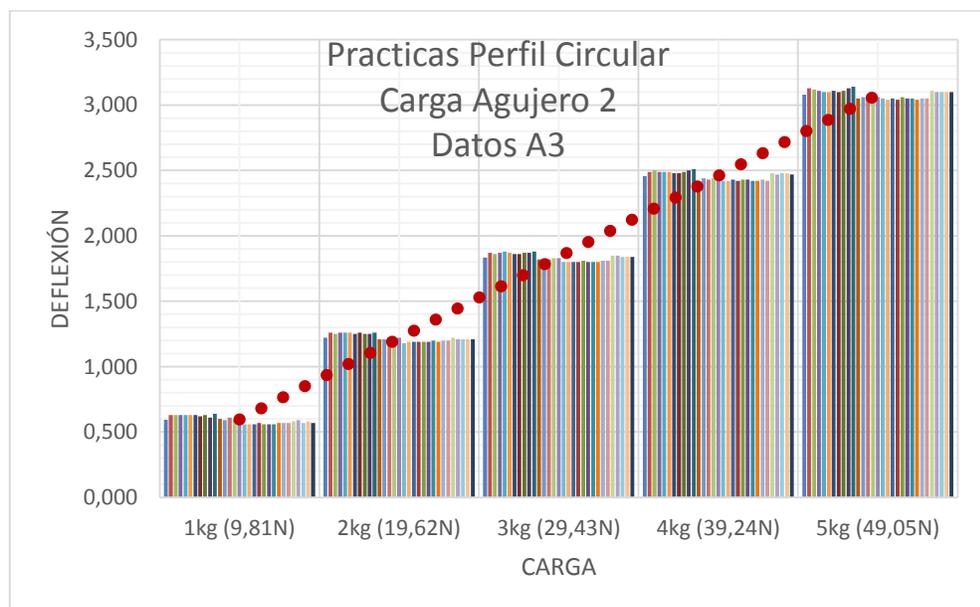
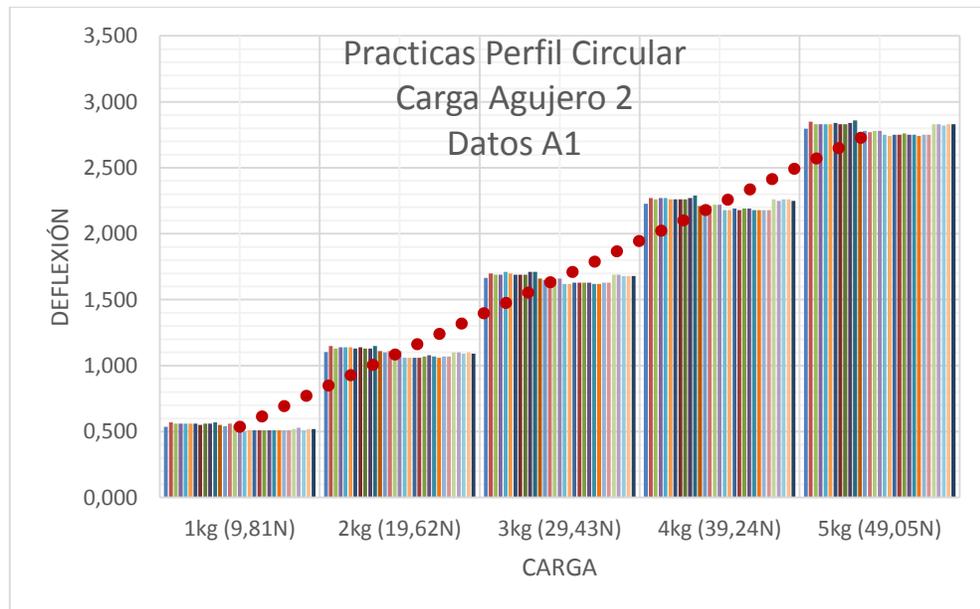
El anexo A contiene las tablas con los datos obtenidos durante las prácticas de laboratorio los cuales se encuentran resumidos en las siguientes tablas y gráficos estadísticos. Se debe tomar en cuenta que A1 y A3 representan los puntos en los cuales están ubicados los relojes comparadores:

- Probeta circular

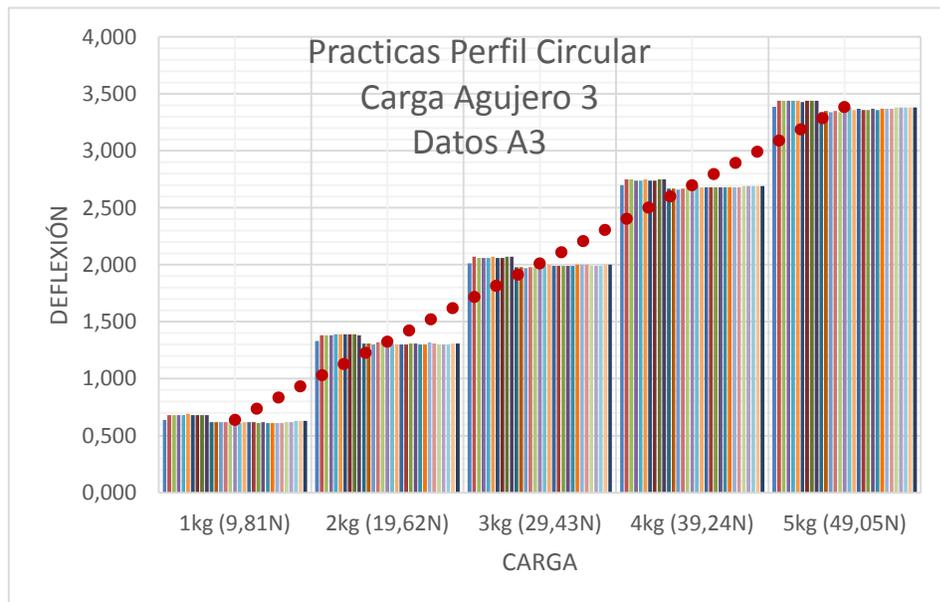
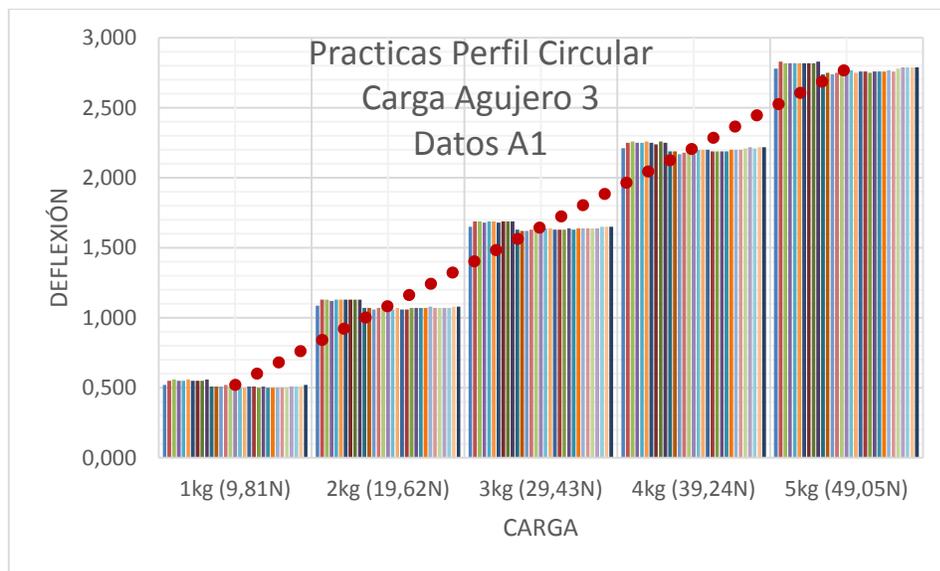
CARGA EN A1 Perfil circular	
CARGA	Media de la deformación (mm)
1kg (9,81N)	0,545
2kg (19,62N)	1,118
3kg (29,43N)	1,697
4kg (39,24N)	2,274
5kg (49,05N)	2,841



CARGA EN A2 Perfil circular		
CARGA	Media de la deformación en A1 (mm)	Media de la deformación en A3 (mm)
1kg (9,81N)	0,535	0,593
2kg (19,62N)	1,102	1,221
3kg (29,43N)	1,665	1,835
4kg (39,24N)	2,228	2,457
5kg (49,05N)	2,796	3,081

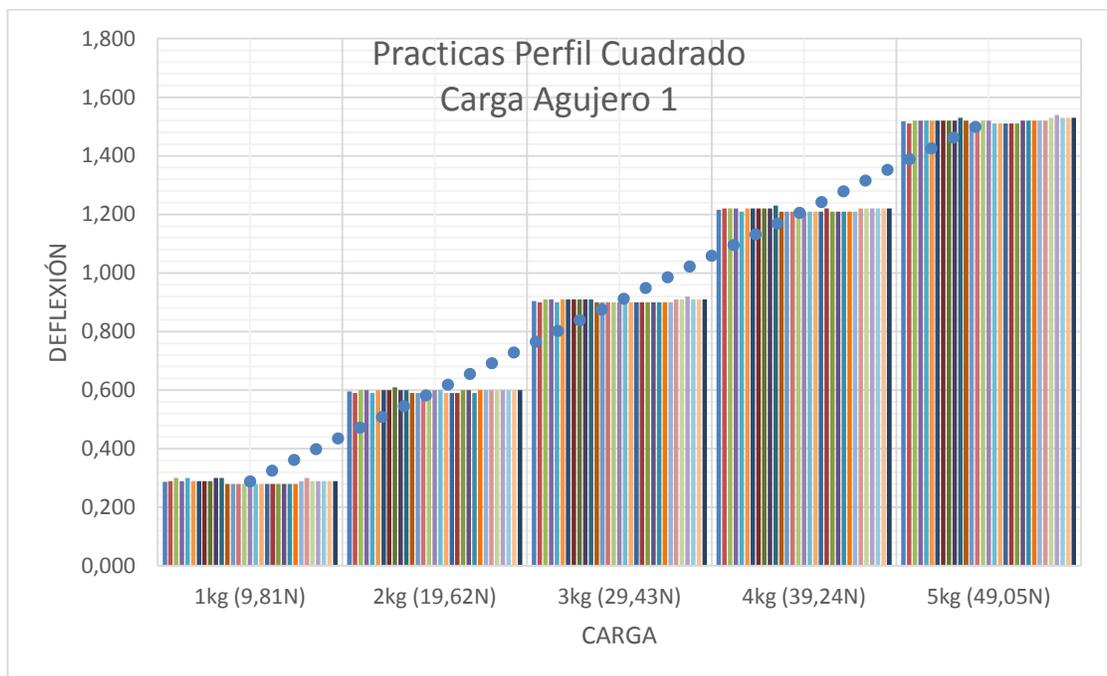


CARGA EN A3 Perfil circular		
CARGA	Media de la deformación en A1 (mm)	Media de la deformación en A3 (mm)
1kg (9,81N)	0.521	0.637
2kg (19,62N)	1.087	1.330
3kg (29,43N)	1.651	2.012
4kg (39,24N)	2.213	2.699
5kg (49,05N)	2.780	3.386

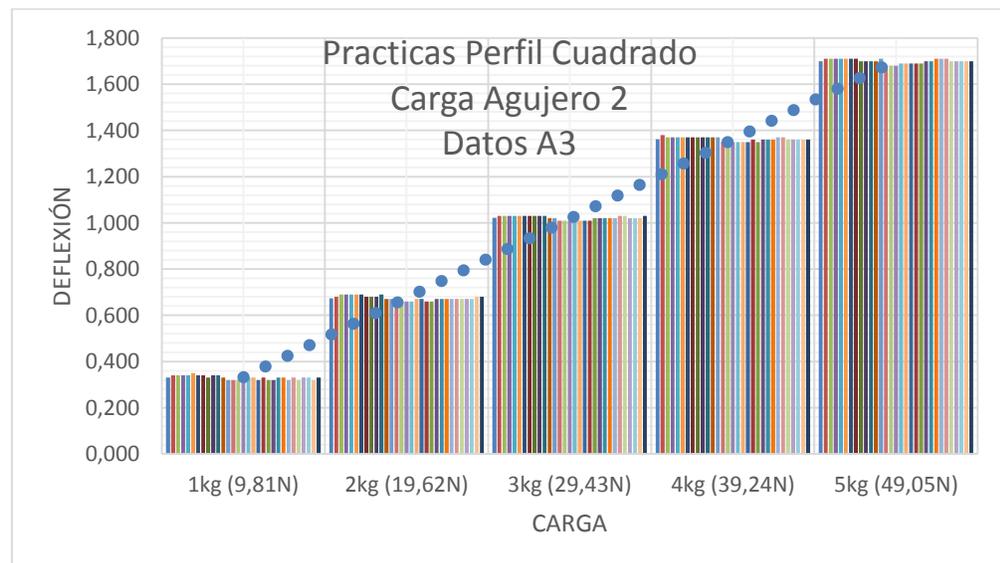
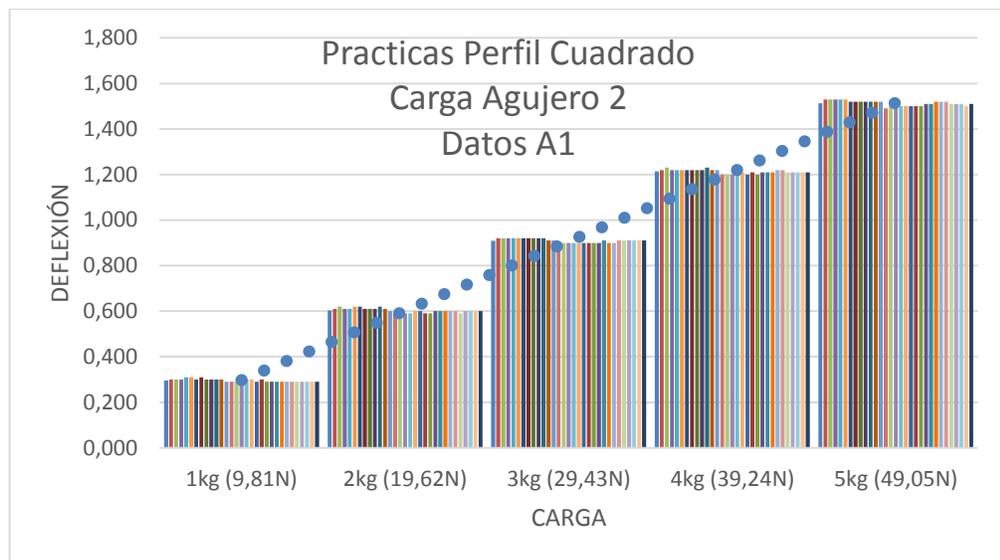


1.1.1. Perfil cuadrado

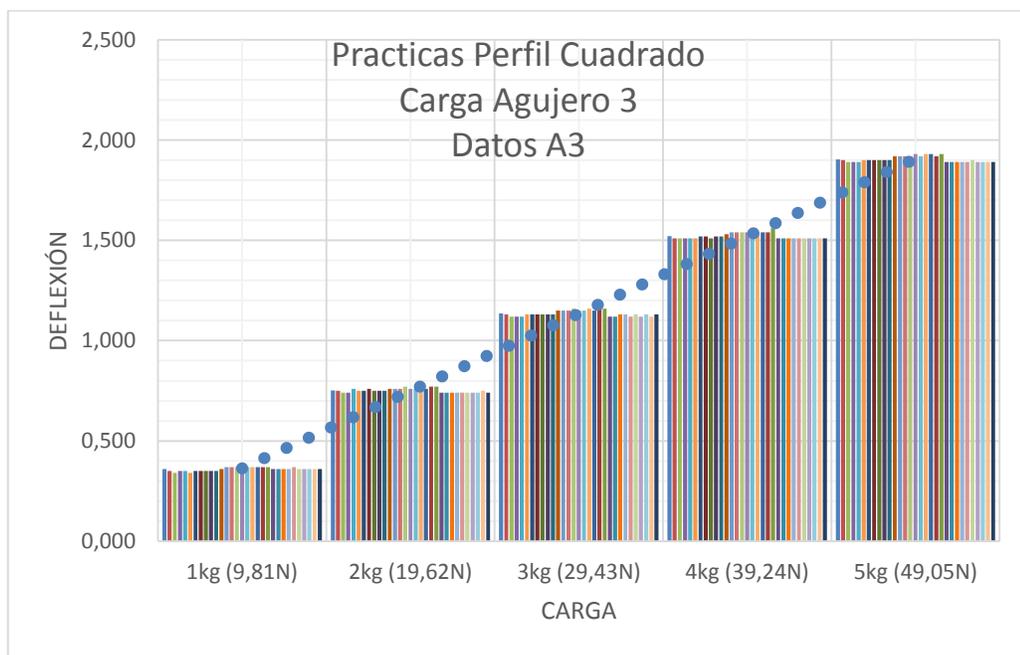
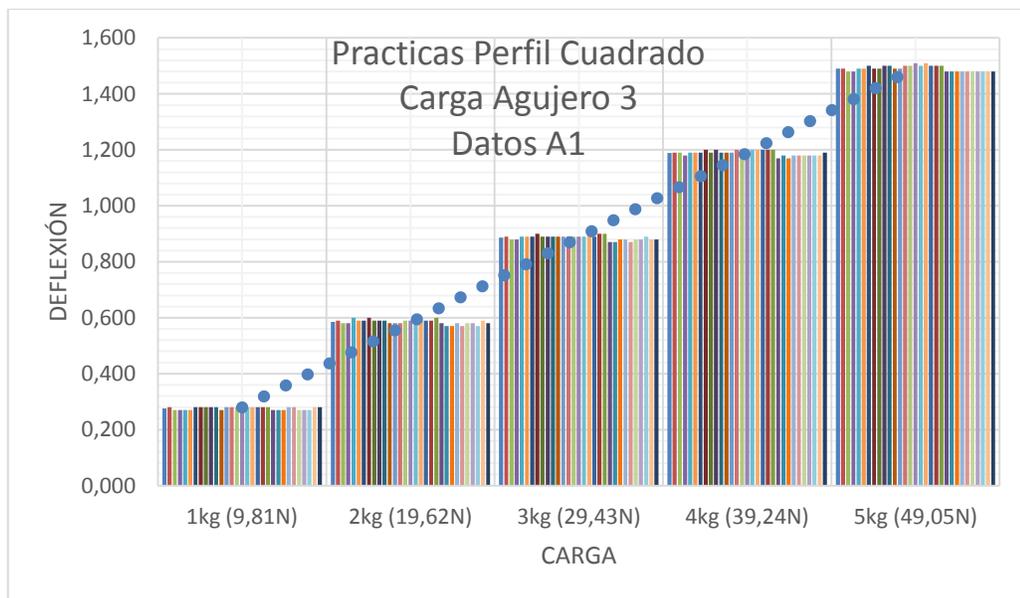
CARGA EN A1 Perfil Cuadrado	
CARGA	Media de la deformación (mm)
1kg (9,81N)	0.287
2kg (19,62N)	0.596
3kg (29,43N)	0.905
4kg (39,24N)	1.216
5kg (49,05N)	1.519



CARGA EN A2 Perfil Cuadrado		
CARGA	Media de la deformación en A1 (mm)	Media de la deformación en A3 (mm)
1kg (9,81N)	0.296	0.330
2kg (19,62N)	0.603	0.674
3kg (29,43N)	0.910	1.022
4kg (39,24N)	1.214	1.363
5kg (49,05N)	1.513	1.7



CARGA EN A3 Perfil Cuadrado		
CARGA	Media de la deformación en A1 (mm)	Media de la deformación en A3 (mm)
1kg (9,81N)	0,276	0,359
2kg (19,62N)	0,585	0,751
3kg (29,43N)	0,887	1,135
4kg (39,24N)	1,189	1,522
5kg (49,05N)	1,490	1,904



Anexo C: Cálculos analíticos del módulo de elasticidad

Para encontrar el módulo de elasticidad se realiza el siguiente proceso de cálculo, utilizando la formula determinada en el capítulo 4 de la sección 5.4.

- Perfil circular

Gracias a los siguientes datos obtenidos y deducidos que se presentan en la siguiente tabla:

CARGA EN A1 Perfil circular			
<i>F</i>	<i>L (m)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>I (m⁴)</i>
1kg (9,81N)	0.407	0,545	5.878 * 10 ⁻⁹
2kg (19,62N)		1,118	
3kg (29,43N)		1,697	
4kg (39,24N)		2,274	
5kg (49,05N)		2,841	

Ahora que se tiene como única incógnita al módulo de elasticidad en la ecuación, se calcula para cada valor de la tabla.

<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1kg (9,81N)</td> <td>0,545</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	1kg (9,81N)	0,545	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (5.45 * 10^{-4}) * (5.878 * 10^{-9})}$ $E = 6.882 * 10^{10} Pa$ $E1 = 68.9 GPa$
CARGA	RESULTADO				
1kg (9,81N)	0,545				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2kg (19,62N)</td> <td>1,118</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	2kg (19,62N)	1,118	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$
CARGA	RESULTADO				
2kg (19,62N)	1,118				

		$E = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (1.118 * 10^{-3}) * (5.878 * 10^{-9})}$ $E = 6.71 * 10^{10} Pa$ $E2 = 67.1 GPa$				
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3kg (29,43N)</td> <td>1,697</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	3kg (29,43N)	1,697		$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (1.697 * 10^{-3}) * (5.878 * 10^{-9})}$ $E = 6.63 * 10^{10} Pa$ $E3 = 66.3 GPa$
CARGA	RESULTADO					
3kg (29,43N)	1,697					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4kg (39,24N)</td> <td>2,274</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	4kg (39,24N)	2,274		$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (2.274 * 10^{-3}) * (5.878 * 10^{-9})}$ $E = 6.597 * 10^{10} Pa$ $E4 = 65.97 GPa$
CARGA	RESULTADO					
4kg (39,24N)	2,274					

CARGA	RESULTADO	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (2.841 * 10^{-3}) * (5.878 * 10^{-9})}$ $E = 6.601 * 10^{10} Pa$ $E5 = 66.01 GPa$
5kg (49,05N)	2,841	

- Perfil circular

Gracias a los siguientes datos obtenidos y deducidos que se presentan en la siguiente tabla:

CARGA EN A1 Perfil circular			
<i>F</i>	<i>L (m)</i>	<i>δ (mm)</i>	<i>I (m⁴)</i>
1kg (9,81N)	0.407	0,545	5.878 * 10 ⁻⁹
2kg (19,62N)		1,118	
3kg (29,43N)		1,697	
4kg (39,24N)		2,274	
5kg (49,05N)		2,841	

Ahora que se tiene como única incógnita al módulo de elasticidad en la ecuación, se calcula para cada valor de la tabla.

CARGA	RESULTADO	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (2.87 * 10^{-4}) * (1.1366 * 10^{-8})}$ $E = 6.758 * 10^{10} Pa$ $E1 = 67.58 GPa$
1kg (9,81N)	0.287	

<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2kg (19,62N)</td> <td>0.596</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	2kg (19,62N)	0.596	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2kg (19,62N)</td> <td>0.596</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	2kg (19,62N)	0.596	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (5.96 * 10^{-4}) * (1.1366 * 10^{-8})}$ $E = 6.509 * 10^{10} Pa$ $E2 = 65.09 GPa$
CARGA	RESULTADO									
2kg (19,62N)	0.596									
CARGA	RESULTADO									
2kg (19,62N)	0.596									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3kg (29,43N)</td> <td>0.905</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	3kg (29,43N)	0.905	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3kg (29,43N)</td> <td>0.905</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	3kg (29,43N)	0.905	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (9.05 * 10^{-4}) * (1.1366 * 10^{-8})}$ $E = 6.43 * 10^{10} Pa$ $E3 = 64.3 GPa$
CARGA	RESULTADO									
3kg (29,43N)	0.905									
CARGA	RESULTADO									
3kg (29,43N)	0.905									
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4kg (39,24N)</td> <td>1.216</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	4kg (39,24N)	1.216	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CARGA</th> <th>RESULTADO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4kg (39,24N)</td> <td>1.216</td> </tr> </tbody> </table>	CARGA	RESULTADO	4kg (39,24N)	1.216	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$ $E = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (1.216 * 10^{-3}) * (1.1366 * 10^{-8})}$ $E = 6.38 * 10^{10} Pa$ $E4 = 63.8 GPa$
CARGA	RESULTADO									
4kg (39,24N)	1.216									
CARGA	RESULTADO									
4kg (39,24N)	1.216									

CARGA	RESULTADO	
5kg (49,05N)	1.519	$E = \frac{F * L^3}{3 * \delta * I}$
		$E = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (1.519 * 10^{-3}) * (1.1366 * 10^{-8})}$ $E = 6.385 * 10^{10} Pa$ $E5 = 63.85 GPa$

Anexo D: Comprobación mediante cálculos analíticos de la deflexión

Para encontrar el módulo de elasticidad se realiza el siguiente proceso de cálculo, utilizando la formula determinada en el capitula 4 de la sección 4.4.

- Perfil circular
 - Carga en A1

$$\delta = \frac{F * L^3}{3 * E * I}$$

E → Modulo de elasticidad (Pa)

F → Fuerza, Carga (N)

L → Longitud (m)

δ → Deflexion (m)

I → Momento de inercia (m⁴)

Todos los datos son conocidos, ya que fueron encontrados anteriormente, a continuación se escriben los valores de los mismos:

$$L = 0.407m$$

$$I = 5.878 * 10^{-9} m^4$$

- Para 1Kg o (F = 9.81N) de carga:

$E = 6.6838 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$	$\delta = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$
$\delta = 5.61 \times 10^{-4} m$	$\delta = 5.44 \times 10^{-4} m$
$\delta_1 = 0.561 mm$	$\delta_1 = 0.544 mm$

- Para 2Kg (F = 19.62N) de carga:

$E = 6.6838 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$	$\delta = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$
$\delta = 1.121 \times 10^{-3} m$	$\delta = 1.089 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 1.121 mm$	$\delta 1 = 1.089 mm$

- Para 3Kg (F = 29.43N) de carga:

$E = 6.6838 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$	$\delta = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$
$\delta = 1.682 \times 10^{-3} m$	$\delta = 1.633 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 1.682 mm$	$\delta 1 = 1.633 mm$

- Para 4Kg (F = 39.24N) de carga:

$E = 6.6838 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$	$\delta = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$
$\delta = 2.245 \times 10^{-3} m$	$\delta = 2.177 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 2.245 mm$	$\delta 1 = 2.177 mm$

- Para 5Kg (F = 49.05N) de carga:

$E = 6.6838 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$	$\delta = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})}$
$\delta = 2.805 \times 10^{-3} m$	$\delta = 2.722 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 2.805 mm$	$\delta 1 = 2.722 mm$

○ Carga en A2

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

δ_{A_2} → Deflexion en A₃ con carga en A₂ (m)

E_b → Modulo de elasticidad de la barra de torsión (Pa)

E_t → Modulo de elasticidad del tubo de aluminio (Pa)

I_b → Momento de inercia de la barra de torsión(m⁴)

I_t → Momento de inercia de la barra de torsión(m⁴)

P → Fuerza, Carga (N)

h → Longitud probeta (m)

d → Longitud brazo de torsión (m)

T → Torque (N * m)

G → Modulo de rigidez del tubo de aluminio (Pa)

J → Momento polar de inercia del tubo de aluminio (m⁴)

Datos:

$$E_b = 200GPa$$

$$I_b = 8.64 * 10^{-10} m^4$$

$$I_t = 5.878 * 10^{-9} m^4$$

$$h = 0.407m$$

$$d = 0.09m$$

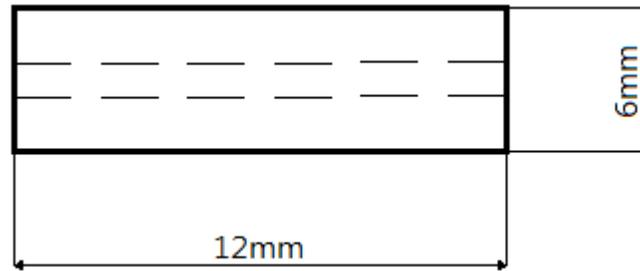
$$G = 25.8GPa$$

$$J = 1.176 * 10^{-8} m^4$$

$$J = \left(\frac{\pi}{32} \right) (D_{ext}^4 - D_{int}^4)$$

$$J = \left(\frac{\pi}{32} \right) (0.0234^4 - 0.0206^4)$$

$$J = 1.176 * 10^{-8} m^4$$



$$I_b = \frac{h * b^3}{12}$$

$$I_b = \frac{(0.006) * (0.012)^3}{12}$$

$$I_b = 8.64 * 10^{-10} m^4$$

- Para 1Kg o ($P = 9.81N$) de carga:

$$E_t = 6.6838 * 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.6838 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (1.38 * 10^{-5}) + (5.61 * 10^{-4}) + (2.665 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 6.015 * 10^{-4} m \rightarrow 0.601 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (1.38 * 10^{-5}) + (5.44 * 10^{-4}) + (2.665 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 5.848 * 10^{-4} m \rightarrow 0.585 mm$$

- Para 2Kg (P = 19.62N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.6838 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (2.76 * 10^{-5}) + (1.12 * 10^{-3}) + (1.178 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.159 * 10^{-3} m \rightarrow 1.159 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (2.76 * 10^{-5}) + (1.089 * 10^{-3}) + (1.178 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.128 * 10^{-3} m \rightarrow 1.128 mm$$

- Para 3Kg (P = 29.43N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (4.139 * 10^{-5}) + (1.683 * 10^{-3}) + (1.768 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.742 * 10^{-3} m \rightarrow 1.742 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (4.138 * 10^{-5}) + (1.633 * 10^{-3}) + (1.768 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.692 * 10^{-3} m \rightarrow 1.692 mm$$

- Para 4Kg (P = 39.24N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (5.518 * 10^{-5}) + (2.245 * 10^{-3}) + (2.357 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 2.324 * 10^{-3} m \rightarrow 2.324 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (5.518 * 10^{-5}) + (2.177 * 10^{-3}) + (2.357 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 2.256 * 10^{-3} m \rightarrow 2.256 mm$$

- Para 5Kg (P = 49.05N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.6838 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (6.898 * 10^{-5}) + (2.806 * 10^{-3}) + (2.946 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 2.904 * 10^{-3} m \rightarrow 2.904 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (6.898 * 10^{-5}) + (2.722 * 10^{-3}) + (2.946 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 2.82 * 10^{-3} \text{ m} \rightarrow 2.82 \text{ mm}$$

○ Carga en A3

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$\delta_{A_2} \rightarrow$ Deflexion en A_3 con carga en A_2 (m)

$E_b \rightarrow$ Modulo de elasticidad de la barra de torsión (Pa)

$E_t \rightarrow$ Modulo de elasticidad del tubo de aluminio (Pa)

$I_b \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$I_t \rightarrow$ Momento de inercia de la barra de torsión (m^4)

$P \rightarrow$ Fuerza, Carga (N)

$h \rightarrow$ Longitud probeta (m)

$d \rightarrow$ Longitud brazo de torsión (m)

$T \rightarrow$ Torque (N * m)

$G \rightarrow$ Modulo de rigidez del tubo de aluminio (Pa)

$J \rightarrow$ Momento polar de inercia del tubo de aluminio (m^4)

Datos:

$$E_b = 200GPa$$

$$I_b = 8.64 * 10^{-10} m^4$$

$$I_t = 5.878 * 10^{-9} m^4$$

$$h = 0.407m$$

$$d = 0.09m$$

$$G = 25.8GPa$$

$$J = 1.176 * 10^{-8} m^4$$

- Para 1Kg o (P = 9.81N) de carga:

$$E_t = 6.6838 * 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.6838 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (1.38 * 10^{-5}) + (5.61 * 10^{-4}) + (1.066 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 6.814 * 10^{-4} m \rightarrow 0.681mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (1.38 * 10^{-5}) + (5.44 * 10^{-4}) + (1.066 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 6.644 * 10^{-4} m \rightarrow 0.664 mm$$

- Para 2Kg (P = 19.62N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (2.76 * 10^{-5}) + (1.12 * 10^{-3}) + (2.132 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.361 * 10^{-3} m \rightarrow 1.361 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (2.76 * 10^{-5}) + (1.089 * 10^{-3}) + (2.132 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.33 * 10^{-3} m \rightarrow 1.33 mm$$

- Para 3Kg (P = 29.43N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.6838 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (4.139 * 10^{-5}) + (1.683 * 10^{-3}) + (3.198 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 2.044 * 10^{-3} m \rightarrow 2.044 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (4.138 * 10^{-5}) + (1.633 * 10^{-3}) + (3.198 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.994 * 10^{-3} m \rightarrow 1.994 mm$$

- Para 4Kg (P = 39.24N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (5.518 * 10^{-5}) + (2.245 * 10^{-3}) + (4.264 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 2.727 * 10^{-3} m \rightarrow 2.727 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (5.518 * 10^{-5}) + (2.177 * 10^{-3}) + (4.264 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 2.659 * 10^{-3} m \rightarrow 2.659 mm$$

- Para 5Kg (P = 49.05N) de carga:

$$E_t = 6.6838 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.6838 \times 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (6.898 * 10^{-5}) + (2.806 * 10^{-3}) + (5.329 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 3.408 * 10^{-3} m \rightarrow 3.408 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 * 10^{10}) * (5.878 * 10^{-9})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{(1.176 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (6.898 * 10^{-5}) + (2.722 * 10^{-3}) + (5.329 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 3.324 * 10^{-3} m \rightarrow 3.324 mm$$

- Perfil cuadrado
 - Carga en A1

De la misma forma que en la otra probeta los datos son conocidos, ya que fueron encontrados anteriormente, a continuación se escriben los valores de los mismos:

$$l = 0.407 m$$

$$I = 1.1366 \times 10^{-8} m^4$$

- Para 1Kg o (F = 9.81N) de carga:

$E = 6.4924 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$	$\delta = \frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$
$\delta = 2.988 \times 10^{-4} m$	$\delta = 2.815 \times 10^{-4} m$
$\delta 1 = 0.298 mm$	$\delta 1 = 0.2815 mm$

- Para 2Kg (F = 19.62N) de carga:

$E = 6.4924 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$	$\delta = \frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$
$\delta = 5.975 \times 10^{-4} m$	$\delta = 5.63 \times 10^{-4} m$
$\delta 1 = 0.597 mm$	$\delta 1 = 0.563 mm$

- Para 3Kg (F = 29.43N) de carga:

$E = 6.4924 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$	$\delta = \frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$
$\delta = 8.963 \times 10^{-4} m$	$\delta = 8.445 \times 10^{-4} m$
$\delta 1 = 0.896 mm$	$\delta 1 = 0.844 mm$

- Para 4Kg (F = 39.24N) de carga:

$E = 6.4924 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$	$\delta = \frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$
$\delta = 1.195 \times 10^{-3} m$	$\delta = 1.126 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 1.195 mm$	$\delta 1 = 1.126 mm$

- Para 5Kg (F = 49.05N) de carga:

$E = 6.4924 \times 10^{10} Pa$	$E = 6.89 \times 10^{10} Pa$
$\delta = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$	$\delta = \frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})}$
$\delta = 1.494 \times 10^{-3} m$	$\delta = 1.408 \times 10^{-3} m$
$\delta 1 = 1.494 mm$	$\delta 1 = 1.408 mm$

○ Carga en A2

Con la formula ya conocida, se encuentra el valor de la deflexión en el punto A3, cuando la carga se presenta en A2, para ello se utilizan los siguientes valores:

$$E_b = 200GPa$$

$$I_b = 8.64 * 10^{-10} m^4$$

$$E_b = 200 * 10^9 Pa$$

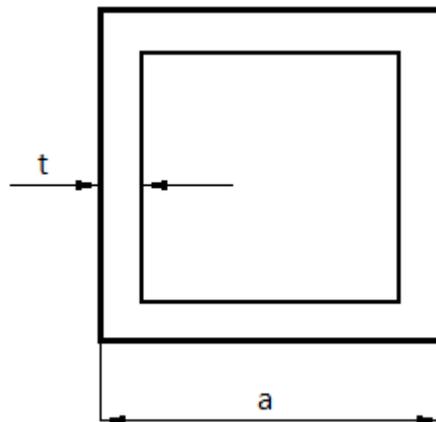
$$I_t = 1.1366 * 10^{-8} m^4$$

$$h = 0.407m$$

$$d = 0.09m$$

$$G = 25.8GPa$$

$$J = 1.7 * 10^{-8} m^4$$



$$J = \frac{2t(a - t)^4}{2a - 2t}$$

$$J = \frac{2(0.0012)(0.0254 - 0.0012)^4}{2(0.0254) - 2(0.0012)}$$

$$J = 1.7 * 10^{-8} m^4$$

- Para 1Kg o ($P = 9.81\text{N}$) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right)$$

$$+ \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 \times 10^{-8})} \right)$$

$$+ \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (1.38 * 10^{-5}) + (2.988 * 10^{-4}) + (1.843 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 3.31 * 10^{-4} \text{m} \rightarrow 0.331 \text{mm}$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right)$$

$$+ \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (1.38 * 10^{-5}) + (2.815 * 10^{-4}) + (1.843 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 3.137 * 10^{-4} \text{m} \rightarrow 0.314 \text{mm}$$

- Para 2Kg ($P = 19.62\text{N}$) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right) \\ \delta_{A_2} &= \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) \\ &+ \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \\ \delta_{A_2} &= (2.76 * 10^{-5}) + (5.975 * 10^{-4}) + (3.687 * 10^{-5}) \\ \delta_{A_2} &= 6.62 * 10^{-4} \text{ m} \rightarrow 0.662 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right) \\ \delta_{A_2} &= \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \\ \delta_{A_2} &= (2.76 * 10^{-5}) + (5.63 * 10^{-4}) + (3.687 * 10^{-5}) \\ \delta_{A_2} &= 6.275 * 10^{-4} \text{ m} \rightarrow 0.627 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Para 3Kg ($P = 29.43\text{N}$) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right)$$

$$+ \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right)$$

$$+ \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (4.139 * 10^{-5}) + (8.963 * 10^{-4}) + (5.53 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 9.93 * 10^{-4} \text{m} \rightarrow 0.993 \text{mm}$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right)$$

$$+ \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_2} = (4.138 * 10^{-5}) + (8.445 * 10^{-4}) + (5.53 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 9.412 * 10^{-4} \text{m} \rightarrow 0.941 \text{mm}$$

- Para 4Kg ($P = 39.24\text{N}$) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) \\ &+ \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \end{aligned}$$

$$\delta_{A_2} = (5.518 * 10^{-5}) + (1.195 * 10^{-3}) + (7.373 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.324 * 10^{-3} \text{m} \rightarrow 1.324 \text{mm}$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \end{aligned}$$

$$\delta_{A_2} = (5.518 * 10^{-5}) + (1.126 * 10^{-3}) + (7.373 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.255 * 10^{-3} \text{m} \rightarrow 1.255 \text{mm}$$

- Para 5Kg ($P = 49.05\text{N}$) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) \\ &+ \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \end{aligned}$$

$$\delta_{A_2} = (6.898 * 10^{-5}) + (1.494 * 10^{-3}) + (9.217 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.655 * 10^{-3} \text{m} \rightarrow 1.655 \text{mm}$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} \text{Pa}$$

$$\delta_{A_2} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{4 * J * G} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_2} &= \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{4 * (1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \end{aligned}$$

$$\delta_{A_2} = (6.898 * 10^{-5}) + (1.408 * 10^{-3}) + (9.217 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_2} = 1.569 * 10^{-3} \text{m} \rightarrow 1.569 \text{mm}$$

○ Carga en A3

Con la formula ya conocida, se encuentra el valor de la deflexión en el punto A3, para ello se utilizan los siguientes valores:

$$E_b = 200GPa$$

$$I_b = 8.64 * 10^{-10} m^4$$

$$E_t = 200 * 10^9 Pa$$

$$I_t = 1.1366 * 10^{-8} m^4$$

$$h = 0.407m$$

$$d = 0.09m$$

$$G = 25.8GPa$$

$$J = 1.7 * 10^{-8} m^4$$

- Para 1Kg o (P = 9.81N) de carga:

$$E_t = 6.4924 * 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\begin{aligned} \delta_{A_3} &= \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) \\ &+ \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.4924 * 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) \\ &+ \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right) \end{aligned}$$

$$\delta_{A_3} = (1.38 * 10^{-5}) + (2.988 * 10^{-4}) + (7.372 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_3} = 3.86 * 10^{-4} m \rightarrow 0.386mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{9.81 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{9.81 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (1.38 * 10^{-5}) + (2.815 * 10^{-4}) + (7.372 * 10^{-5})$$

$$\delta_{A_3} = 3.69 * 10^{-4} m \rightarrow 0.369 mm$$

- Para 2Kg (P = 19.62N) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (2.76 * 10^{-5}) + (5.975 * 10^{-4}) + (1.475 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 7.726 * 10^{-4} m \rightarrow 0.773 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{19.62 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{19.62 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (2.76 * 10^{-5}) + (5.63 * 10^{-4}) + (1.475 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 7.381 * 10^{-4} m \rightarrow 0.738 mm$$

- Para 3Kg (P = 29.43N) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (4.139 * 10^{-5}) + (8.963 * 10^{-4}) + (2.212 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.159 * 10^{-3} m \rightarrow 1.159 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{29.43 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{29.43 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (4.138 * 10^{-5}) + (8.445 * 10^{-4}) + (2.212 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.107 * 10^{-3} m \rightarrow 1.107 mm$$

- Para 4Kg (P = 39.24N) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (5.518 * 10^{-5}) + (1.195 * 10^{-3}) + (2.949 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.545 * 10^{-3} m \rightarrow 1.545 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{39.24 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{39.24 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (5.518 * 10^{-5}) + (1.126 * 10^{-3}) + (2.949 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.476 * 10^{-3} m \rightarrow 1.476 mm$$

- Para 5Kg (P = 49.05N) de carga:

$$E_t = 6.4924 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.4924 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (6.898 * 10^{-5}) + (1.494 * 10^{-3}) + (3.687 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.932 * 10^{-3} m \rightarrow 1.932 mm$$

$$E_t = 6.89 \times 10^{10} Pa$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{P * d^3}{3 * E_b * I_b} \right) + \left(\frac{P * h^3}{3 * E_t * I_t} \right) + \left(\frac{P * d^2 * h}{J * G} \right)$$

$$\delta_{A_3} = \left(\frac{49.05 * 0.09^3}{3 * (200 * 10^9) * (8.64 * 10^{-10})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.407^3}{3 * (6.89 \times 10^{10}) * (1.1366 * 10^{-8})} \right) + \left(\frac{49.05 * 0.09^2 * 0.407}{(1.7 * 10^{-8}) * (25.8 * 10^9)} \right)$$

$$\delta_{A_3} = (6.898 * 10^{-5}) + (1.408 * 10^{-3}) + (3.687 * 10^{-4})$$

$$\delta_{A_3} = 1.846 * 10^{-3} m \rightarrow 1.846 mm$$

Anexo E: Tablas del porcentaje de error comparativo con las pruebas experimentales

- Probeta circular

E=66,838GPa	CARGA AGUJERO 1									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,55	0,55	0,56	0,56	3%	3%	0,55	0,55	2%	2%
2kg	1,12	1,12	1,12	1,12	0%	0%	1,11	1,11	1%	0%
3kg	1,70	1,69	1,68	1,68	1%	1%	1,67	1,67	2%	1%
4kg	2,28	2,27	2,25	2,25	1%	1%	2,23	2,23	2%	2%
5kg	2,85	2,84	2,81	2,81	1%	1%	2,79	2,79	2%	2%

E=66,838GPa	CARGA AGUJERO 2									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,54	0,59	0,56	0,60	5%	1%	0,56	0,61	4%	2%
2kg	1,10	1,22	1,12	1,16	2%	5%	1,11	1,22	1%	0%
3kg	1,67	1,84	1,68	1,74	1%	5%	1,66	1,83	0%	0%
4kg	2,23	2,46	2,25	2,32	1%	6%	2,22	2,44	0%	1%
5kg	2,80	3,08	2,81	2,90	0%	6%	2,77	3,05	1%	1%

E=66,838GPa	CARGA AGUJERO 3									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,52	0,64	0,56	0,68	7%	7%	0,55	0,67	6%	4%
2kg	1,09	1,33	1,12	1,36	3%	2%	1,11	1,34	2%	1%
3kg	1,65	2,01	1,68	2,04	2%	2%	1,65	2,01	0%	0%
4kg	2,21	2,70	2,25	2,73	1%	1%	2,21	2,68	0%	1%
5kg	2,78	3,39	2,81	3,41	1%	1%	2,77	3,35	0%	1%

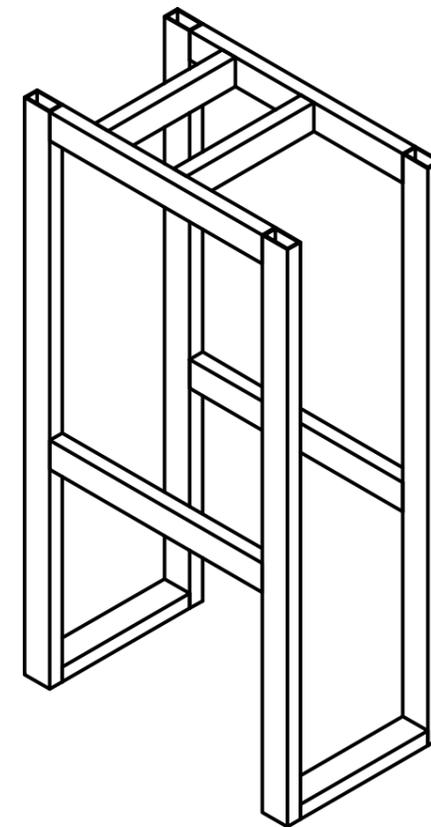
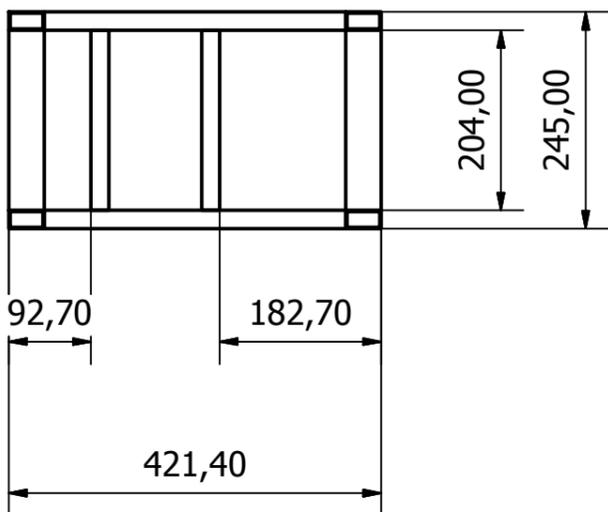
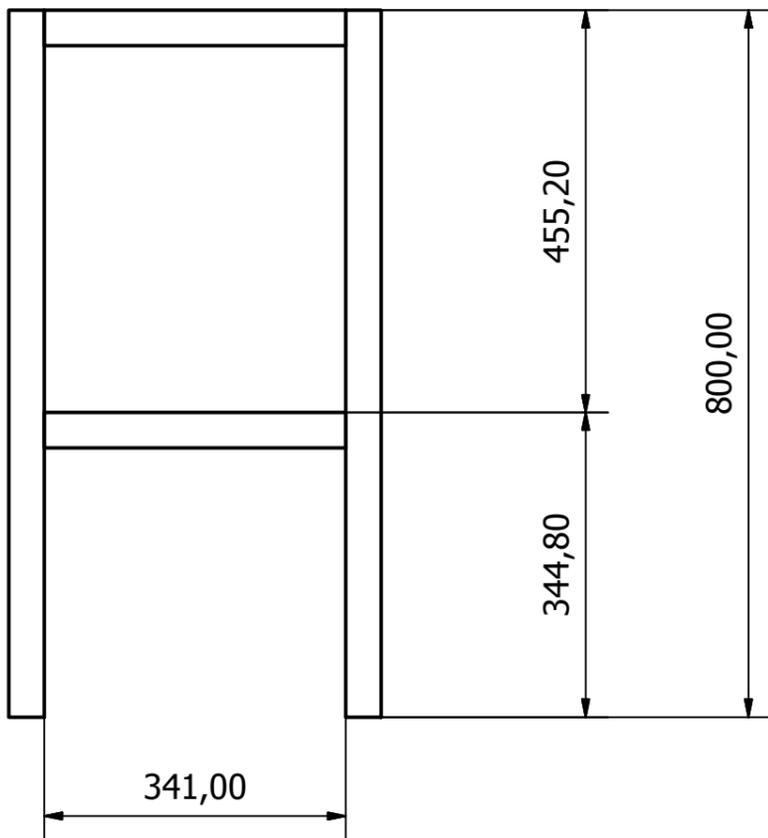
E=68,9GPa	CARGA AGUJERO 1									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,55	0,55	0,54	0,54	0%	0%	0,54	0,54	1%	1%
2kg	1,12	1,12	1,09	1,09	3%	3%	1,08	1,08	4%	4%
3kg	1,70	1,69	1,63	1,63	4%	4%	1,62	1,62	5%	4%
4kg	2,28	2,27	2,18	2,18	5%	4%	2,16	2,16	6%	5%
5kg	2,85	2,84	2,72	2,72	5%	4%	2,70	2,70	6%	5%

E=68,9GPa	CARGA AGUJERO 2									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,54	0,59	0,54	0,59	2%	1%	0,54	0,59	1%	0%
2kg	1,10	1,22	1,09	1,13	1%	8%	1,08	1,19	2%	3%
3kg	1,67	1,84	1,63	1,69	2%	8%	1,62	1,78	3%	3%
4kg	2,23	2,46	2,18	2,26	2%	9%	2,15	2,37	4%	4%
5kg	2,80	3,08	2,72	2,82	3%	9%	2,69	2,96	4%	4%

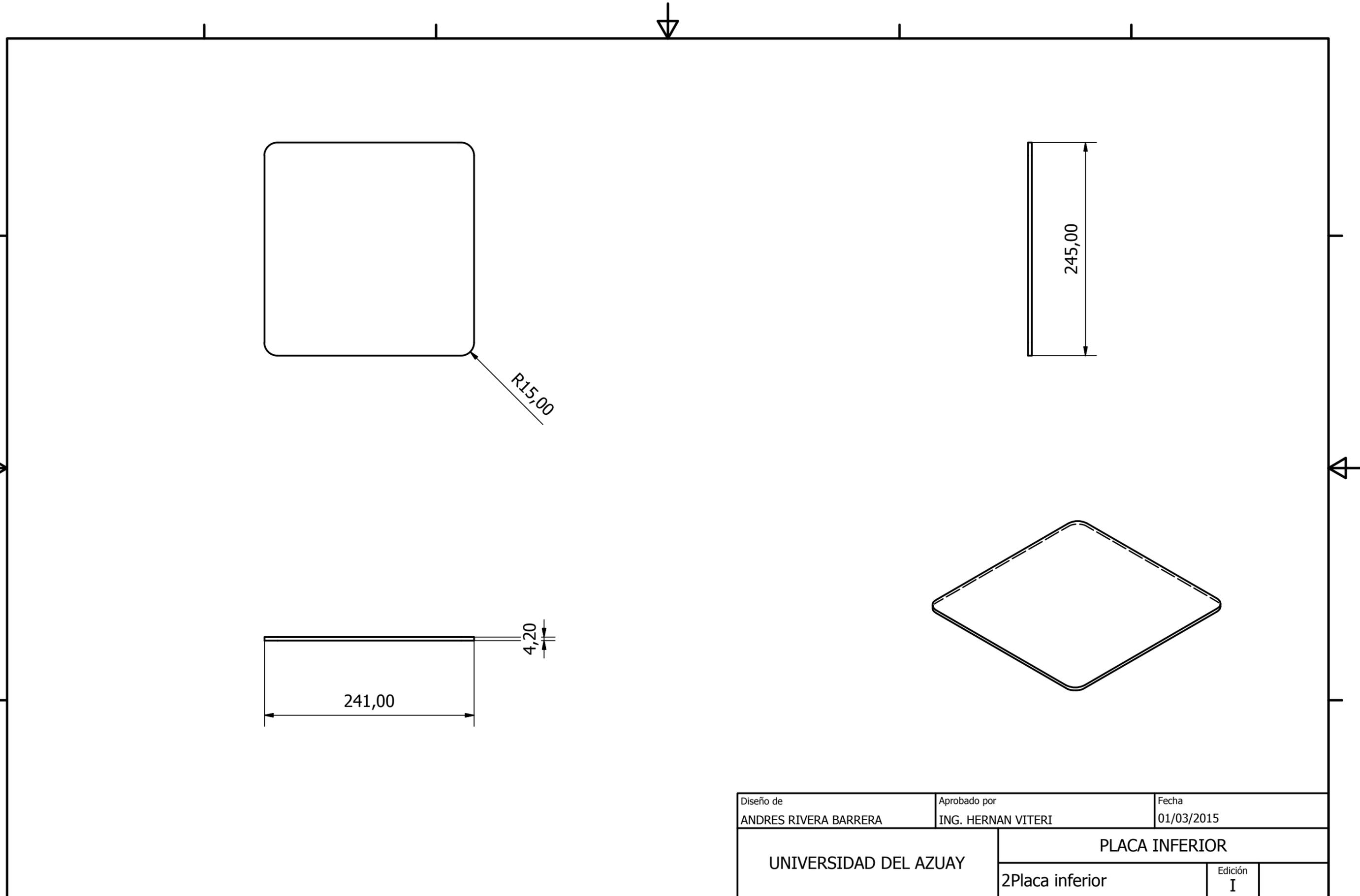
E=68,9GPa	CARGA AGUJERO 3									
	EXPERIMENTAL		ANALÍTICO		ERROR %		NUMÉRICO		ERROR %	
	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3	A1	A3
1kg	0,52	0,64	0,54	0,66	4%	4%	0,54	0,65	3%	2%
2kg	1,09	1,33	1,09	1,33	0%	0%	1,08	1,30	1%	2%
3kg	1,65	2,01	1,63	1,99	1%	1%	1,61	1,95	2%	3%
4kg	2,21	2,70	2,18	2,66	2%	2%	2,15	2,61	3%	4%
5kg	2,78	3,39	2,72	3,32	2%	2%	2,68	3,26	4%	4%

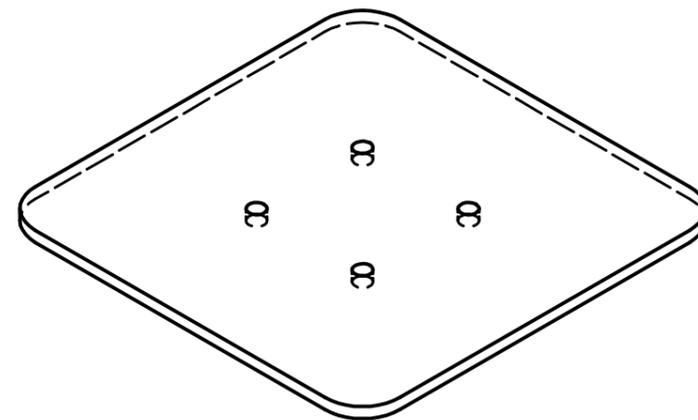
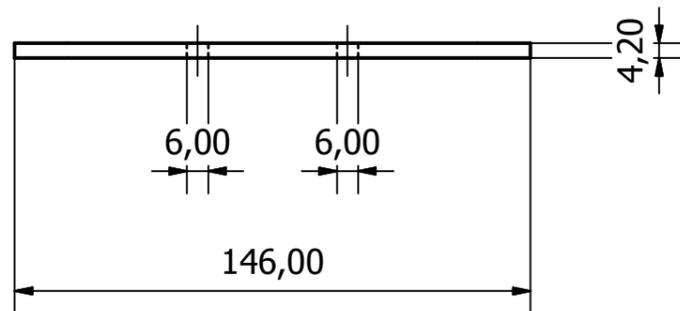
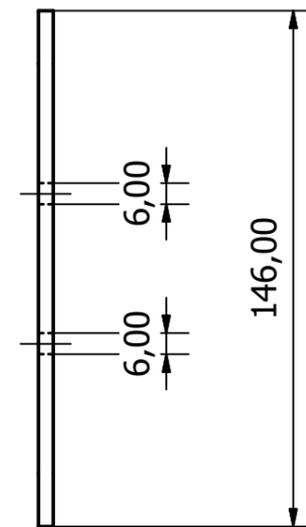
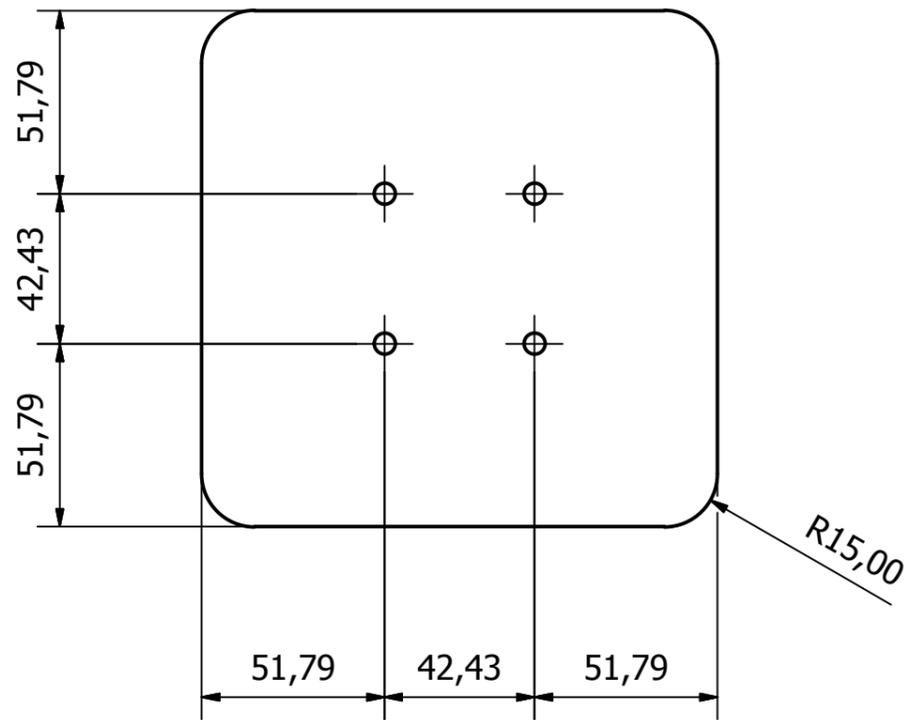
Anexo F: Láminas de construcción de piezas de la máquina de ensayos

Este anexo contiene todas las láminas con las cotas necesarias para la construcción de la máquina de ensayos.

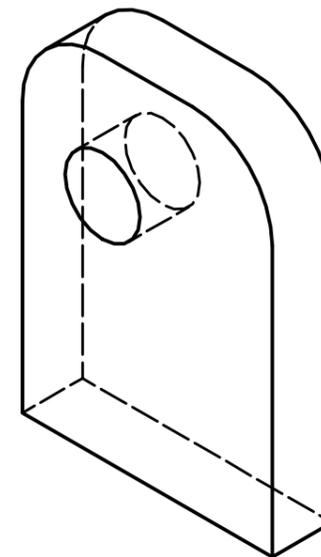
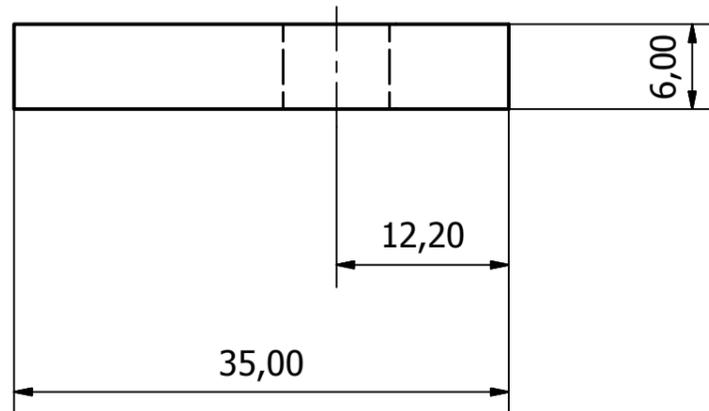
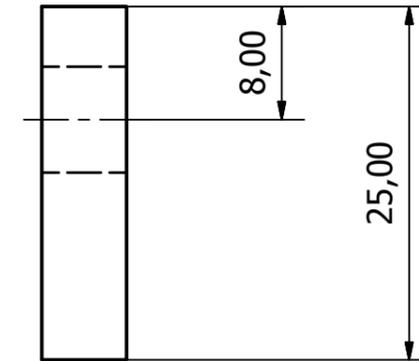
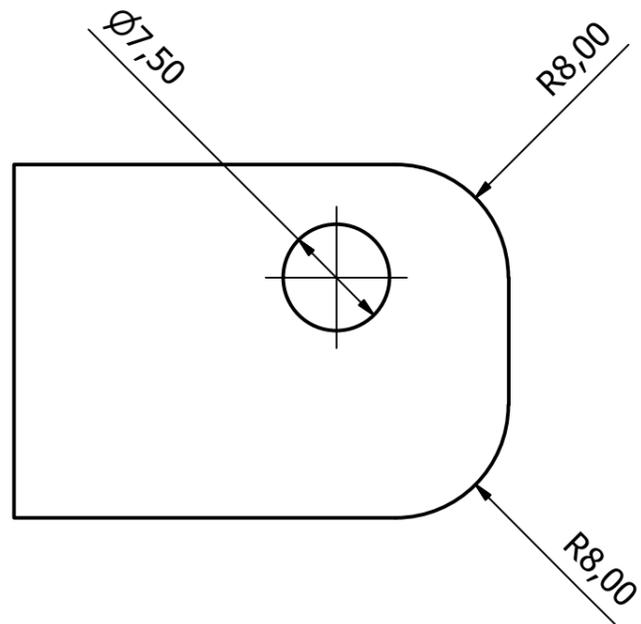


Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 01/03/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	BASTIDOR	
	1Bastidor	Edición I

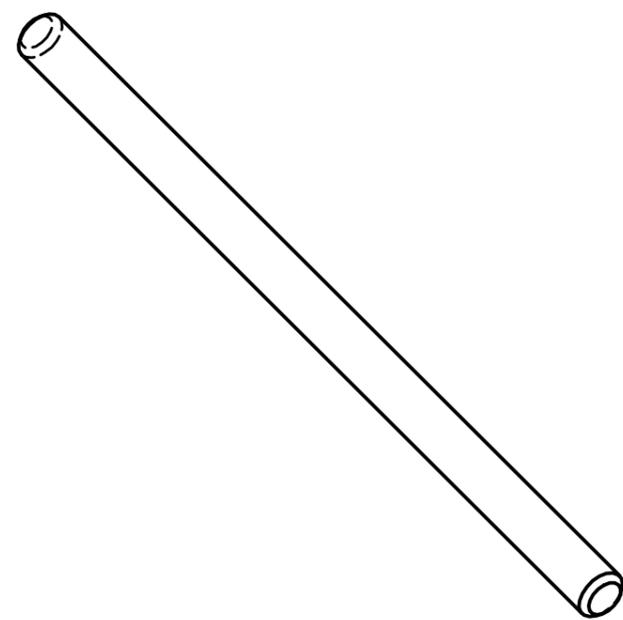
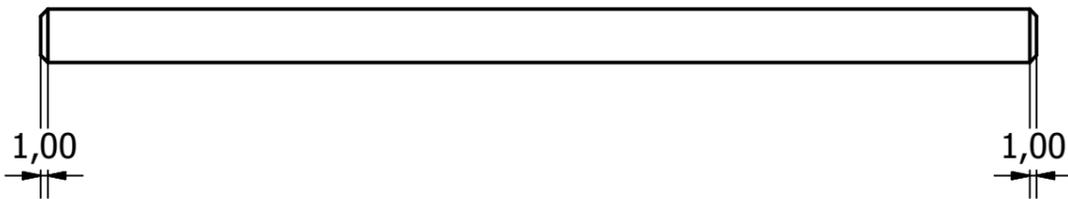
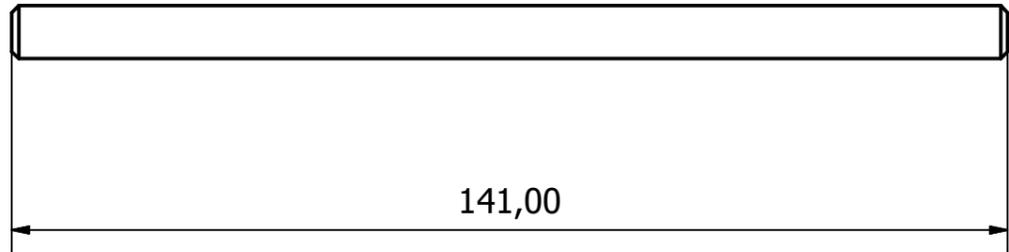




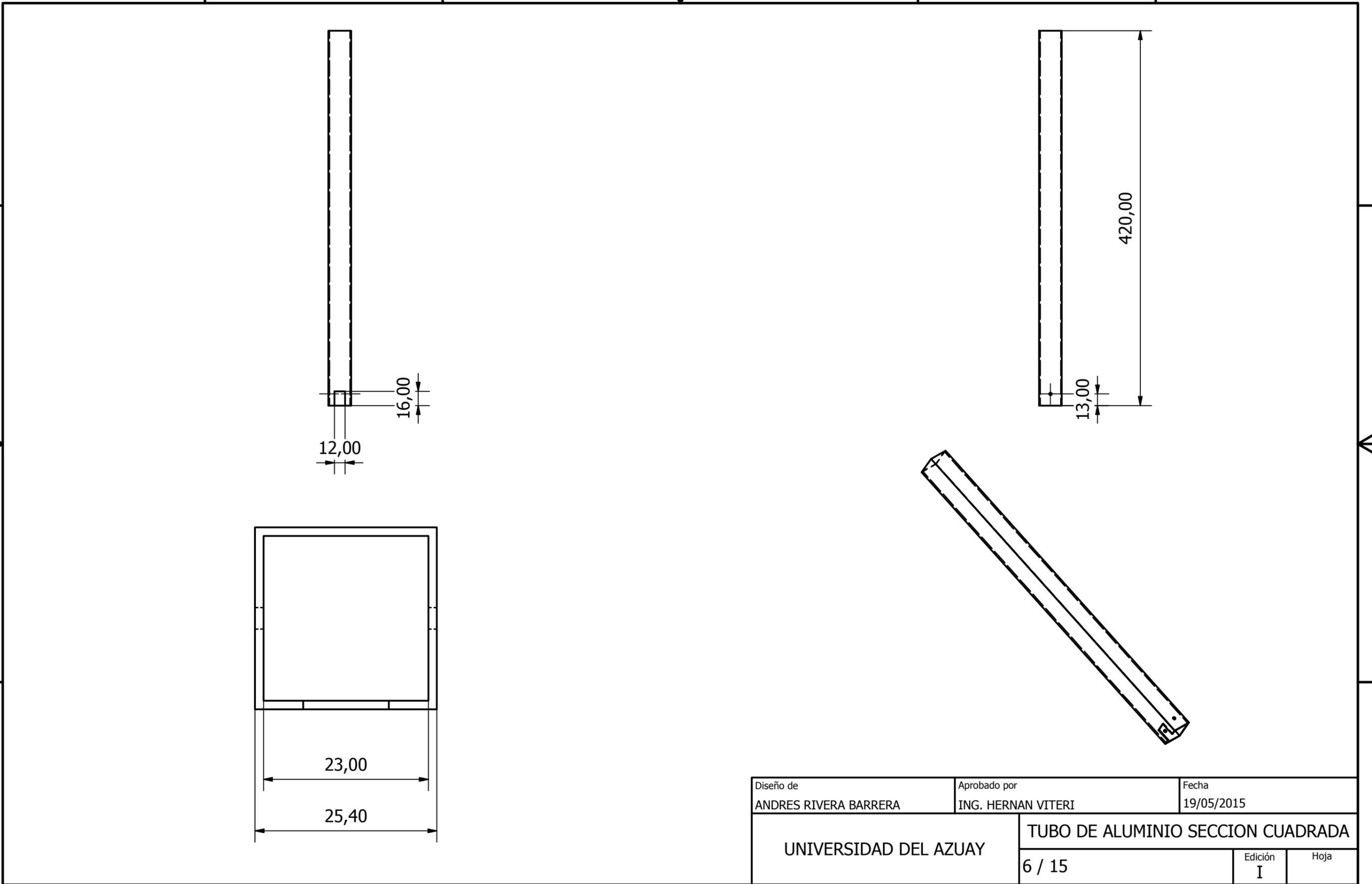
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PLACA SUPERIOR	
	Placa superior	Edición I



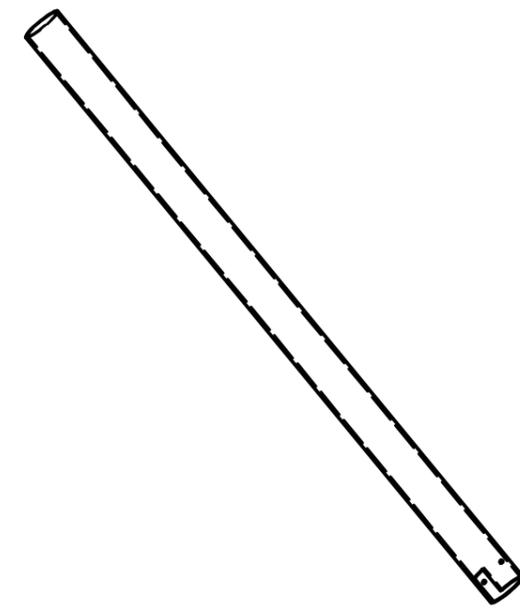
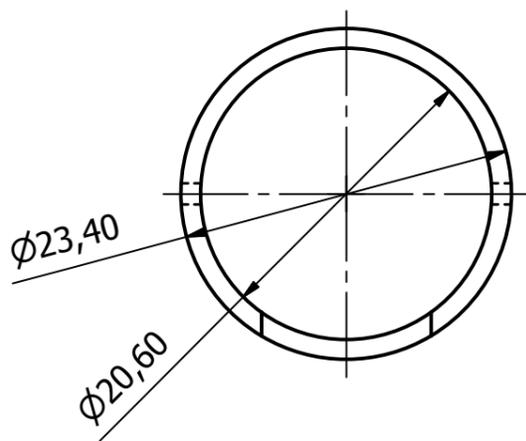
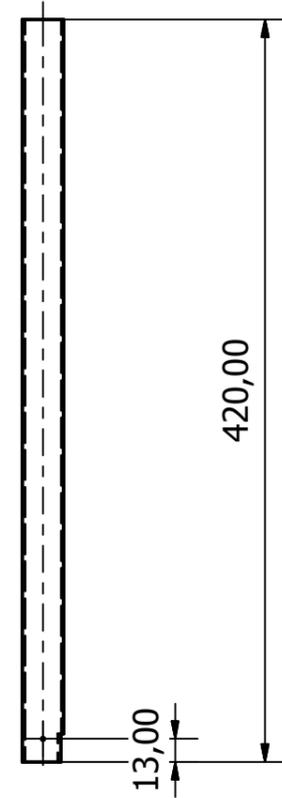
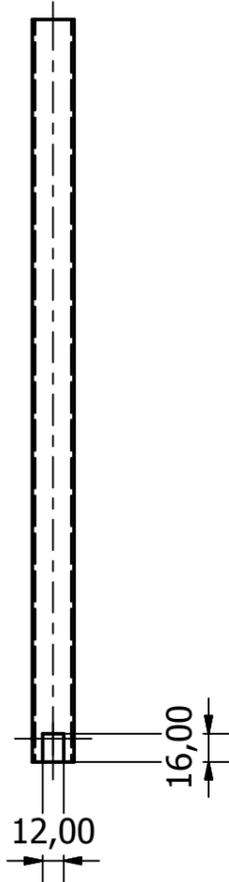
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	SOPORTE PARA EJE DE RODILLOS	
	4 / 15	Edición I



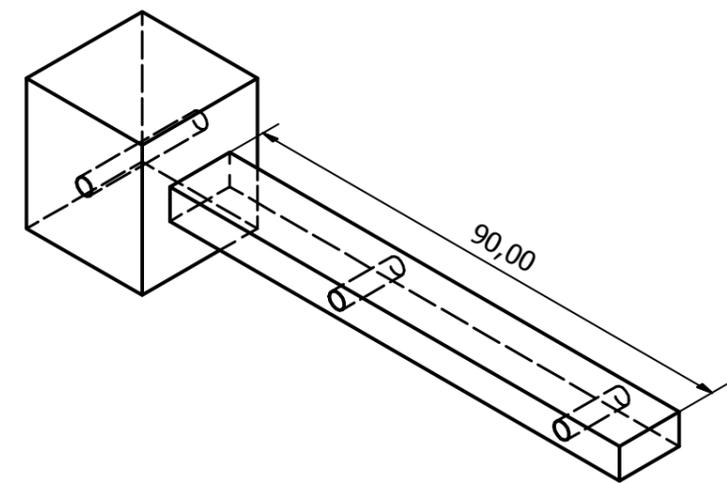
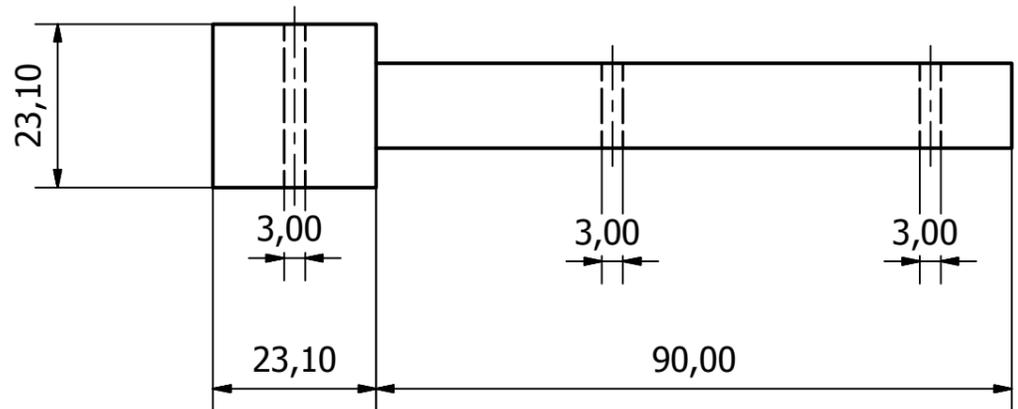
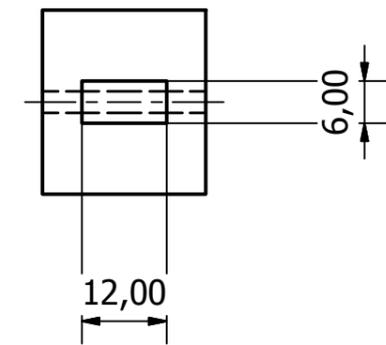
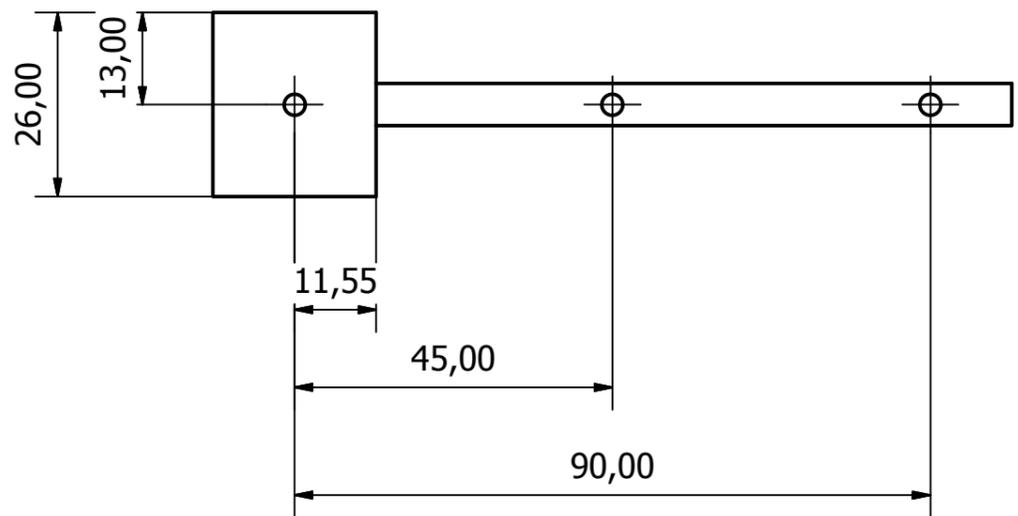
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	EJE PARA RODILLOS	
	5Eje para Rodillos	Edición I



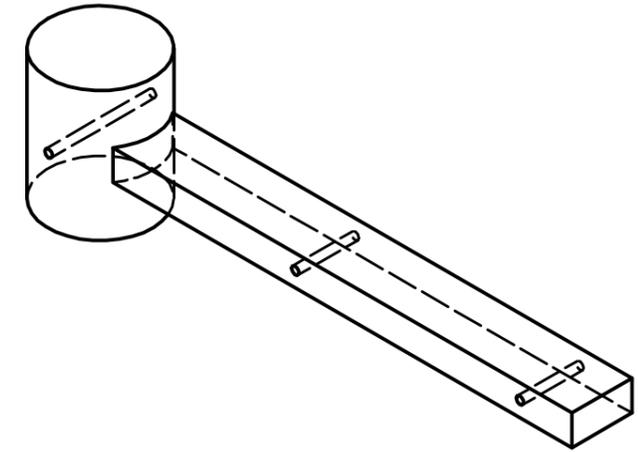
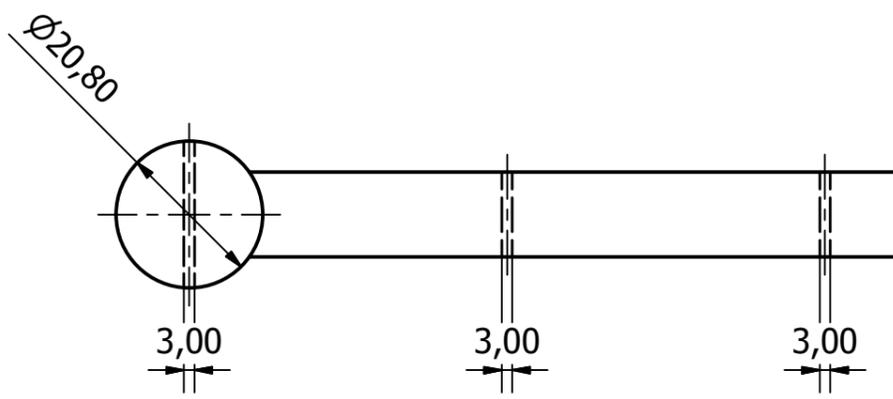
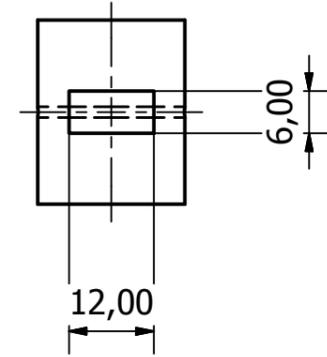
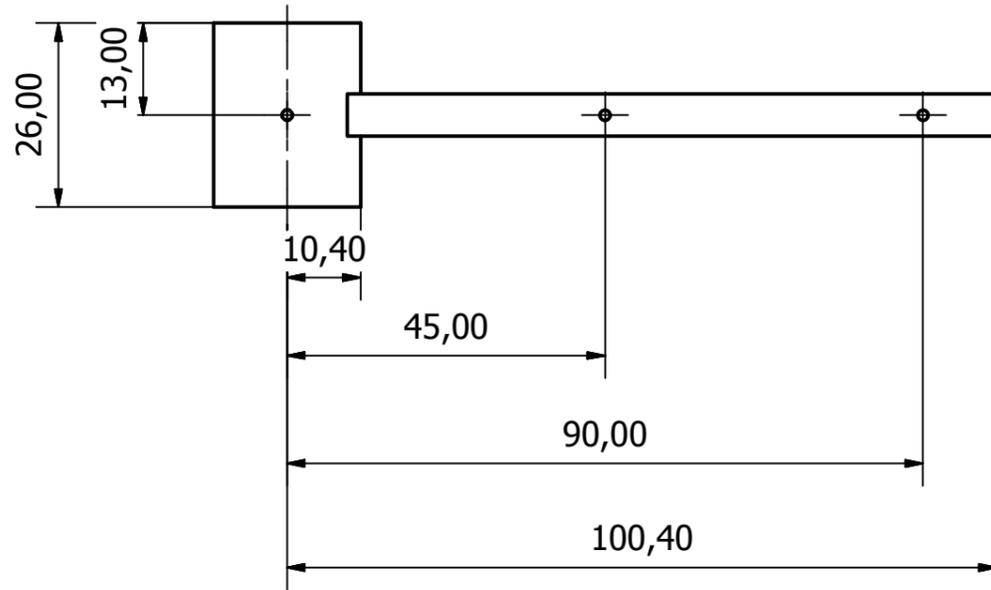
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	TUBO DE ALUMINIO SECCION CUADRADA	
	6 / 15	Edición I
		Hoja



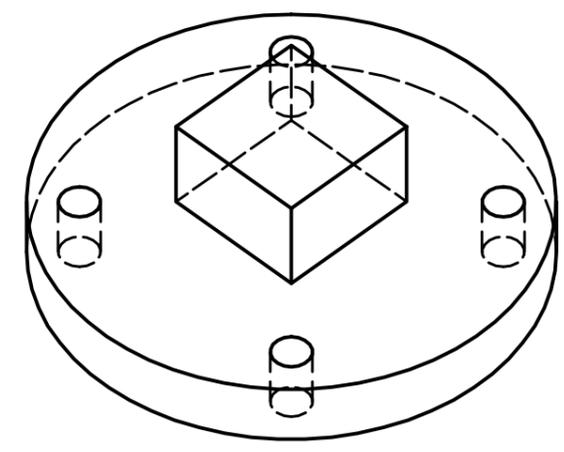
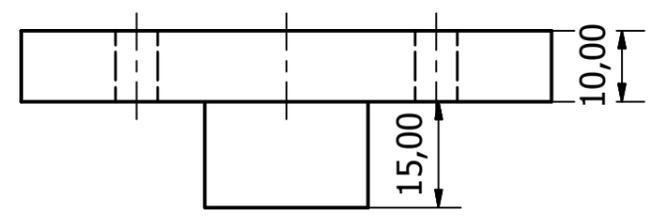
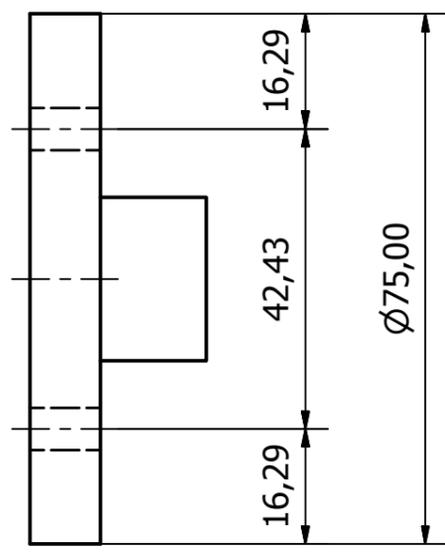
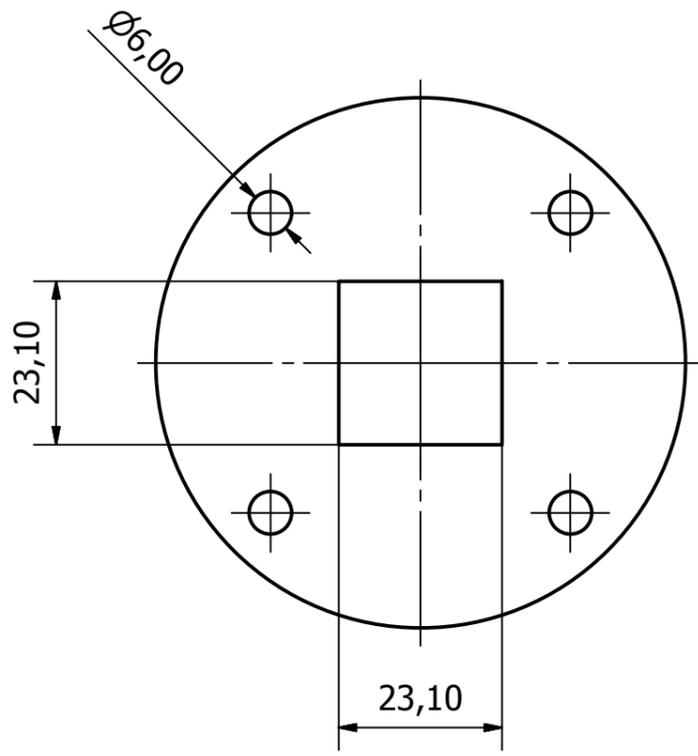
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	TUBO DE ALUMINIO SECCION CIRCULAR	
	7 / 15	Edición I Hoja



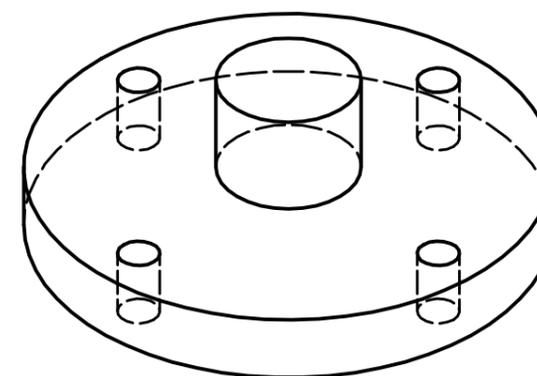
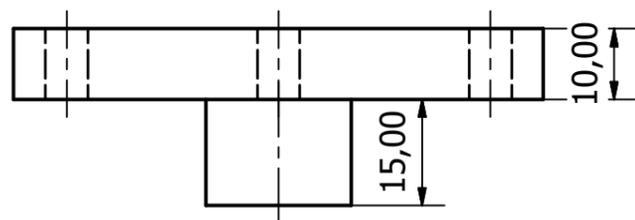
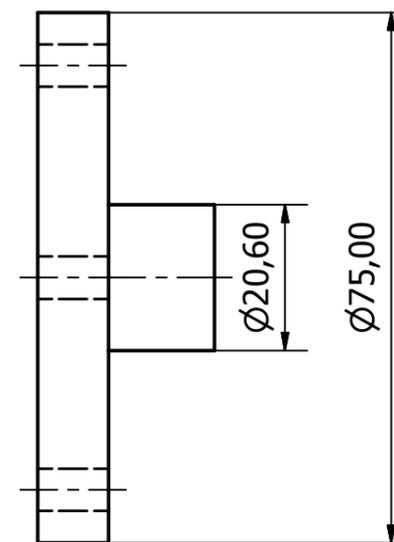
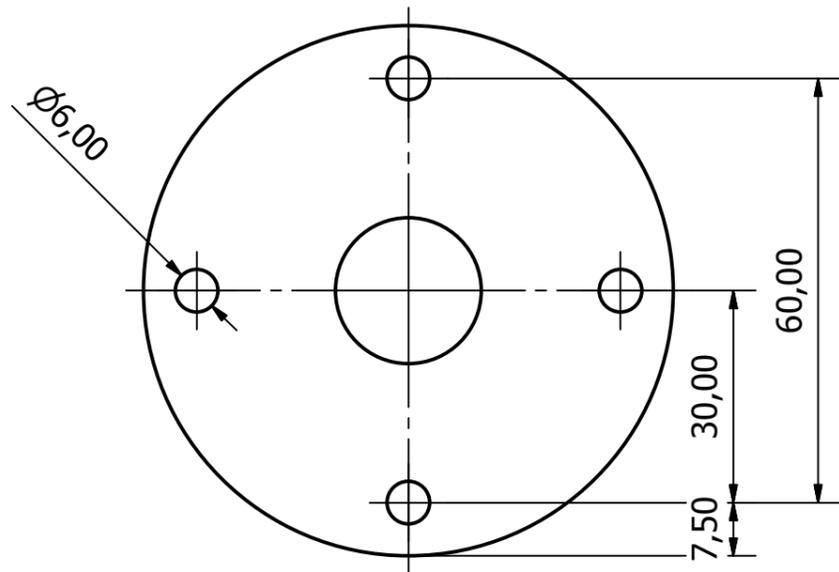
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PALANCA DE TORSIÓN (CUADRADO)	
	8 / 15	Edición I



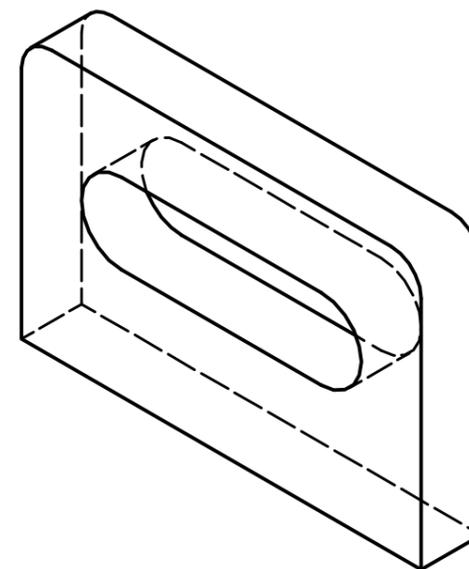
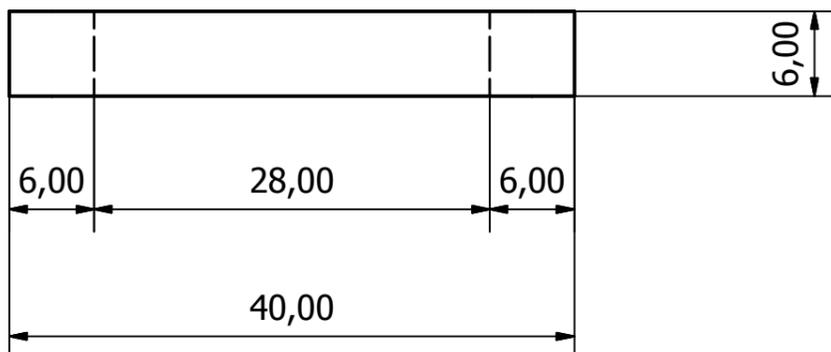
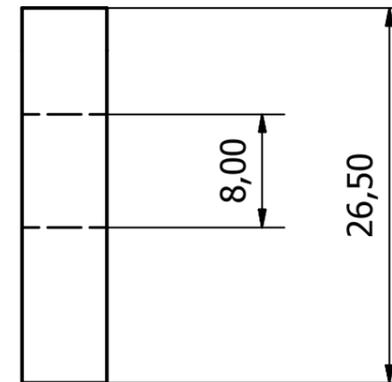
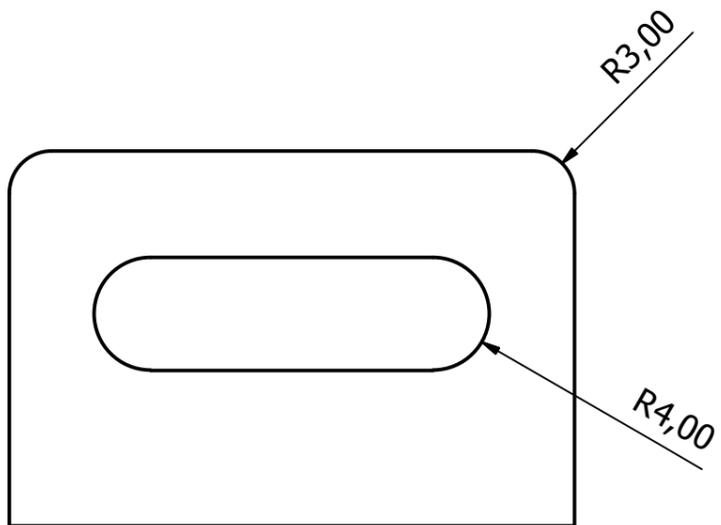
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015	
UNIVERSIDAD DEL AZUAY		PALANCA DE TORSIÓN (CIRCULAR)	
		9 / 15	Edición I



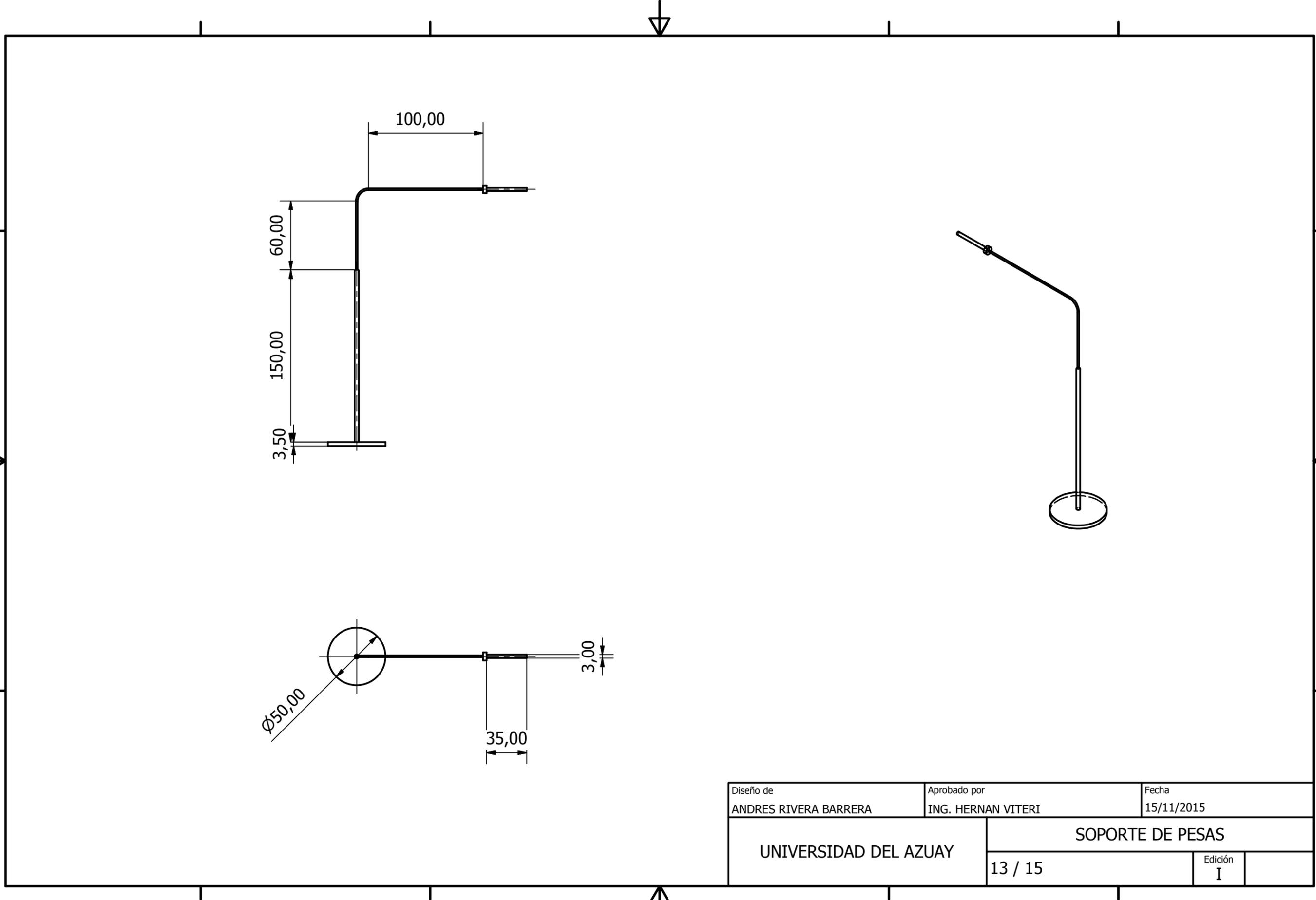
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 04/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	EMPOTRAMIENTO CUADRADO	
	10 / 15	Edición I



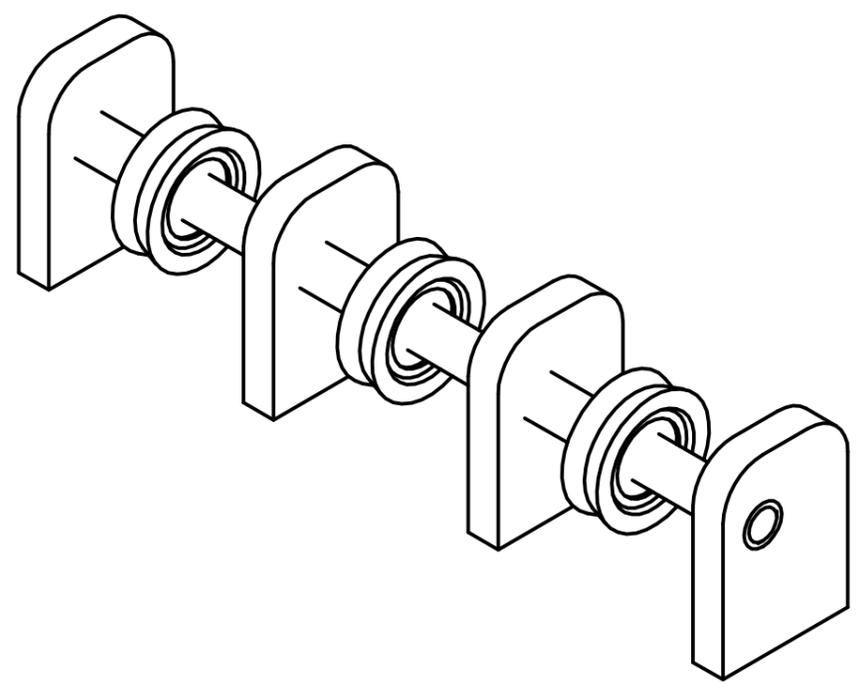
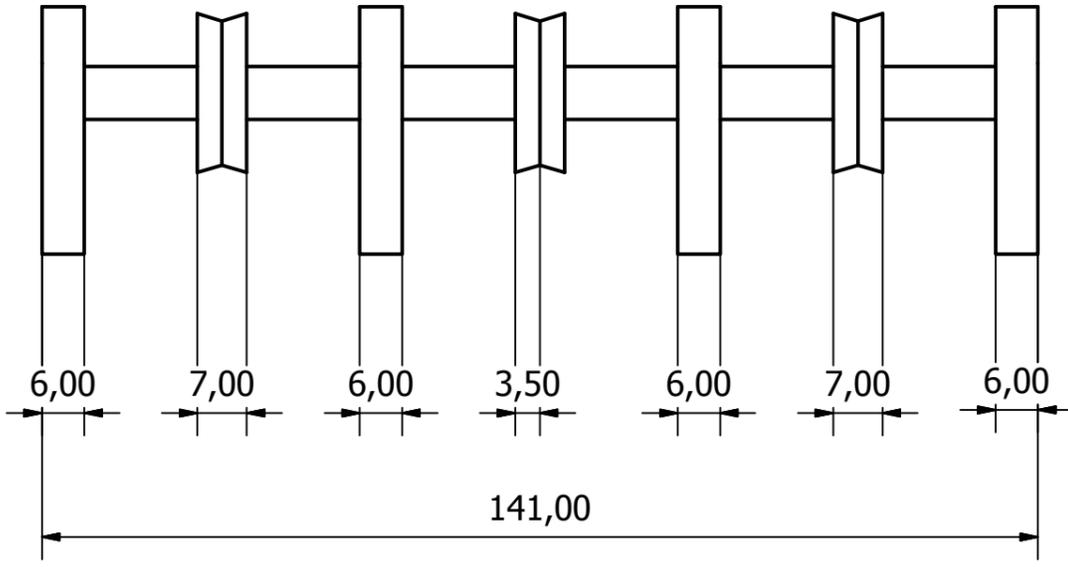
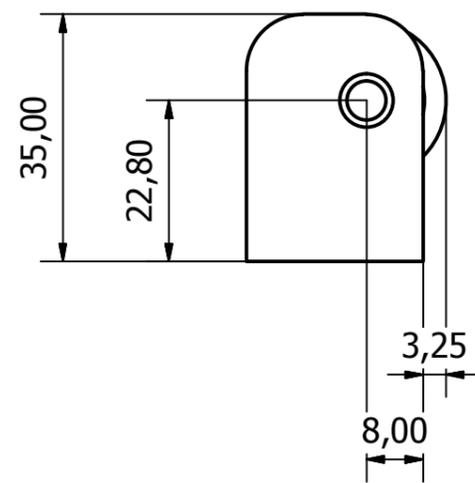
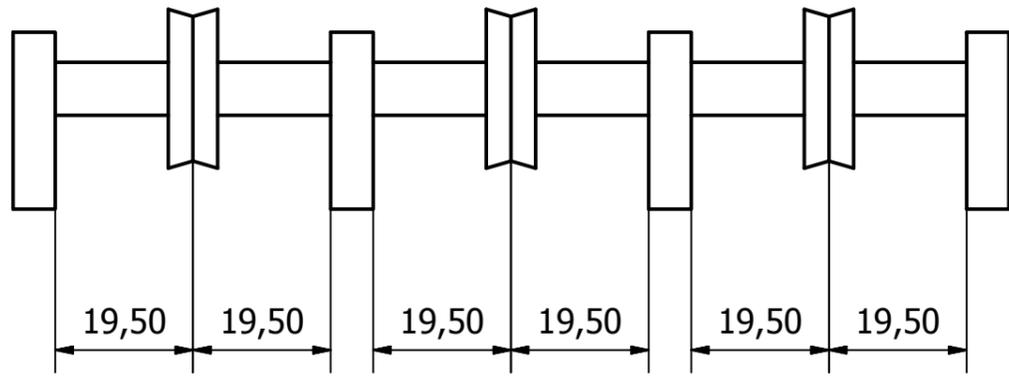
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 04/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	EMPOTRAMIENTO CIRCULAR	
	11 / 15	Edici3n I



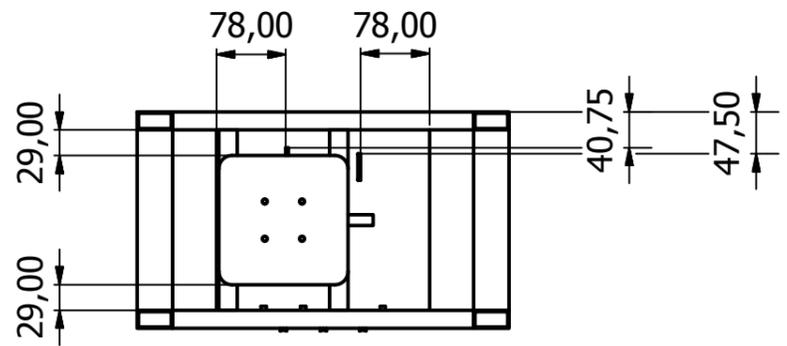
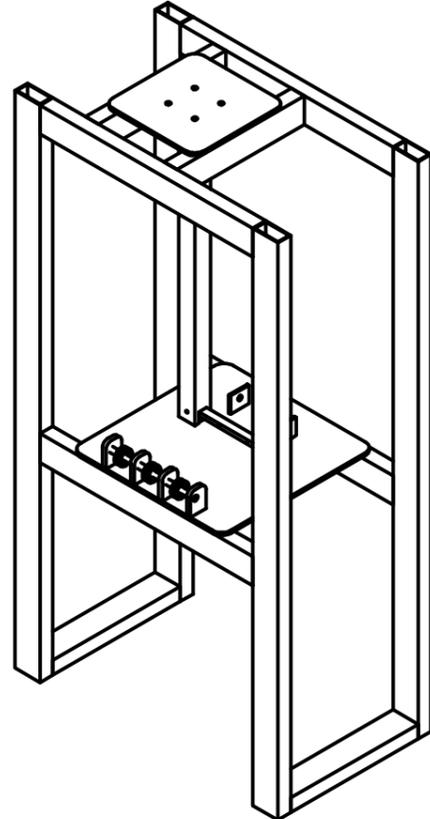
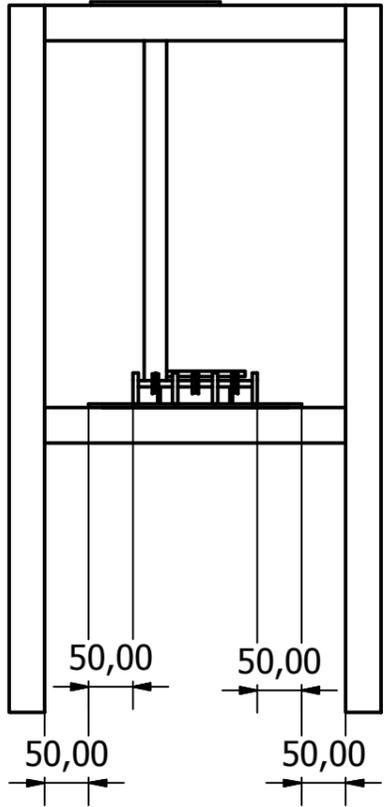
Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	BASE DE PALPADORES	
	12 / 15	Edición I



Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 15/11/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	SOPORTE DE PESAS	
	13 / 15	Edición I



Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 19/05/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	ENSAMBLAJE: EJE, SOPORTE Y RODILLOS	
	14 / 15	Edición I



Diseño de ANDRES RIVERA BARRERA	Aprobado por ING. HERNAN VITERI	Fecha 15/11/2015
UNIVERSIDAD DEL AZUAY	ENSAMBLAJE: MÁQUINA DE ENSAYOS	
	15 / 15	Edición I