



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR
ESFUERZOS POR TORSION.**

**ANDRÉS FELIPE OSORIO CAMARGO
CARLOS ANDRÉS ANIBAL ROJAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2018

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR
ESFUERZOS POR TORSION.**

**ANDRÉS FELIPE OSORIO CAMARGO
CARLOS ANDRÉS ANIBAL ROJAS**

TRABAJO DE GRADO

**DIRECTOR:
ALFONSO SANTOS JAIMES**

**UNIVERSIDAD PONTIFICA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
BUCARAMANGA**

2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, junio del 2018

DEDICATORIA

Dedico de manera especial este trabajo a Dios, mi padre, mi madre y mi hermana. Ellos fueron el principal pilar para la construcción de mi vida cómo profesional, mostrándome el camino de la rectitud, responsabilidad y deseos de superación. Ellos son mi ejemplo a seguir pues he visto a través de los años su constante entrega, paciencia y amor hacia mí. No tengo más que agradecimiento a esta hermosa familia que con sacrificio y mucho esfuerzo me ha dado una educación de calidad.

A todas las personas que de una u otra forma me apoyaron y me dieron ánimos para sacar adelante esta carrera.

Gracias

Andrés Felipe Osorio Camargo

DEDICATORIA

Dedicó este trabajo primeramente a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud, sabiduría y discernimiento para lograr mis objetivos.

A mi madre, por su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona íntegra, pero más que nada, por su amor.

A mi padre por su apoyo, su constancia y por creer en mí.

A mi hermana por ser el ejemplo de una hermana mayor de la cual aprendí aciertos y de momentos difíciles; sobre todo por su confianza y sus consejos continuos.

A mis familiares quienes creyeron y aportaron un grano de arena en mí.

¡Gracias a ustedes!

Carlos Andrés Anibal Rojas

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la universidad pontificia bolivariana, la cual nos facilitó los medios y herramientas que nos permitieron desarrollarnos como profesionales.

A los profesores de la facultad de ingeniería mecánica, que con paciencia y dedicación nos transmitieron sus experiencias y conocimientos.

A nuestro director de proyecto, el ingeniero Alfonso Santos Jaimes, Por guiarnos y apoyarnos durante nuestra carrera y a lo largo de este proyecto, para que todo saliera de la mejor manera posible.

TABLA DE CONTENIDO

1. OBJETIVOS	14
1.1. Objetivo General.....	15
1.2. Objetivos Específicos	15
2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Torsión	17
2.2. Materiales.....	29
2.2.1. Aluminio	30
2.2.2. Acero.....	34
2.3. Puente de Wheatstone	38
2.4. Comparadores de caratulas	40
2.5. Galgas extensiométricas	43
2.6. Bancos de pruebas de torsión comerciales.....	47
2.6.1. WP 500 ensayo de torsión, 30 N.....	47
2.6.2. WP 510 Ensayo de torsión 200Nm, accionamiento a motor	49
3. METODOLOGÍA DE DISEÑO	52
3.1. Identificación de la necesidad	54
3.2. Diseño conceptual.....	55
3.2.1. Existencia solo de momento torsor	55
3.2.2. Magnitudes de carga que no sobrepasen los 49 N	59
3.2.3. Cuantificación de la deformación unitaria al cortante y el ángulo de giro en puntos ubicados a diferentes longitudes de la probeta.....	60
3.2.4. Materiales comercialmente disponibles.....	61
3.2.5. Cambio de la probeta	61
3.2.6. Acabado final del equipo debe ser de buena calidad.....	62
4. DISEÑO PRELIMINAR.....	63
5. DISEÑO DETALLADO	70
5.1. Probeta.....	70

5.2. Sistema de Aplicación de la carga.....	70
5.3. Placa de ensamble de la probeta a la estructura.....	72
5.4. Sistema para la medición del desplazamiento vertical originado por el momento torsor.	74
5.5. Estructura	74
5.6. Sistema de medición de esfuerzos cortantes	76
6. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	82
7. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES Y ANGULOS DE GIRO EN PROBETAS SOMETIDAS A TORSION	89
7.1. ESFUERZO CORTANTE	89
7.2. ANGULO DE GIRO	90
8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
9. CONCLUSIONES.....	98
10. RECOMENDACIONES	99
11. BIBLIOGRAFIA.....	100
12. ANEXOS	102
Anexo 1: Planos detallados de los componentes del equipo didáctico para la corroboración de las ecuaciones de esfuerzo y deformación de elementos sometidos a momentos de torsión.....	102
Anexo 2: Tablas de valores y resultados obtenidos para cada condición de ensayo	110
Anexo 3: Guía de laboratorio	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Torsión de una barra por dos fuerzas F	17
Figura 2. Barra circular sometida a dos pares de fuerza torsional.	18
Figura 3. Esfuerzo cortante que actúan sobre un eje circular	19
Figura 4. Deformaciones presentadas en una barra circular.	21
Figura 5. Torsión realizada a una barra circular.....	22
Figura 6. Deformación interna y externa de una barra circular	23
Figura 7. Deformación unitaria por cortante en una sección circular	25
Figura 8. Bauxita (izquierda), aluminio (derecha)	30
Figura 9. Estructura del aluminio	31
Figura 10. Proceso de obtención del Acero	35
Figura 11. Circuito denominado puente de wheatstone.....	38
Figura 12. Componentes de un comparador de caratula.....	40
Figura 13. Galga extensiométrica	43
Figura 14. Galga extensiométrica adherida a una probeta	44
Figura 15. Partes de una galga extensiométrica.....	44
Figura 16. Galga sin cementar.....	45
Figura 17. Banco de ensayos de torsión WP 500	47
Figura 18. Componentes del banco de ensayos WP 500	48
Figura 19. Banco de ensayos de torsión WP 510	50
Figura 20. Componentes del banco de ensayos WP 510	50
Figura 21. Esquema del Modelo Lineal de diseño	53
Figura 22. Esquema del primer modelo propuesto	55
Figura 23. DCL de la probeta en el primer modelo propuesto	56
Figura 24. Resultados de Deformación de análisis realizado en ANSYS	57
Figura 25. Esquema del segundo modelo propuesto.....	58
Figura 26. DCL de la probeta en el segundo modelo propuesto.....	58
Figura 27. Vista isométrica del bosquejo inicial del equipo didáctico.....	63

Figura 28. Resultados de Deformación de análisis realizado en ANSYS	66
Figura 29. Resultados de Esfuerzos realizado en ANSYS	68
Figura 30. Esquema del sistema de aplicación de la carga sobre la probeta	69
Figura 31. Esquema del sistema para la medición del desplazamiento vertical originado por el ángulo de rotación.....	69
Figura 32. Configuración final del sistema de aplicación de carga a la probeta de ensayo	71
Figura 33. Pesos utilizados para generar el momento torsor sobre la probeta	71
Figura 34. Ubicación de los agujeros en la placa de aluminio soldada a la probeta	73
Figura 35. Resultados análisis de esfuerzos a través del software ANSYS	75
Figura 36. Galgas extensiométricas KFH-1.5-120-C1-11L1M2R.....	77
Figura 37 Especificaciones de Galgas KFH-1.5-120-C1-11L1M2R.....	77
Figura 38. Galgas extensiométricas KFH-06-120-D17-11L1M2S.....	78
Figura 39. Especificaciones de Galgas KFH-06-120-D17-11L1M2S	79
Figura 40. Ensamble de la estructura y las láminas de cobertura.....	82
Figura 41. Resultado final del proceso de protección y pintura de la estructura	83
Figura 42. Resultado final de la fabricación de la probeta y placa de ensamble. ..	83
Figura 43. Resultado final de la fabricación del sistema de aplicación de carga ...	84
Figura 44. Resultado final de la fabricación del sistema de medición de desplazamiento vertical	85
Figura 45. Pesos y porta pesos fabricados.....	85
Figura 46. Montaje inicial del sistema de medición de deformaciones en un protoboard	86
Figura 47. Montaje del sistema de medición sobre las baquetas.....	87
Figura 48. Montaje final del sistema de medición de esfuerzos y deformaciones sobre probetas sometidas a momentos torsores.	87
Figura 49. Montaje final del sistema de medición de esfuerzos y deformaciones sobre probetas sometidas a momentos torsores.	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Unidades en sistema internacional y sistema ingles	27
Tabla 2. Conceptos de propiedades físicas	29
Tabla 3. Propiedades y características del aluminio	32
Tabla 4. Propiedades del acero	36
Tabla 5. Esfuerzo y deformaciones sobre los materiales encontrados comercialmente.....	65
Tabla 6. Magnitud de los momentos de torsión que se pueden aplicar sobre la probeta a ensayar	72
Tabla 7. Condiciones de los ensayos realizados	91
Tabla 8. Resultados promedio de los ensayos realizados	92
Tabla 9. Comparación resultados teóricos y Experimentales de los esfuerzos cortantes obtenidos con el equipo	94
Tabla 10. Comparación resultados teóricos y Experimentales de los ángulos de giro obtenidos con el equipo	97

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR ESFUERZOS POR TORSION.

AUTOR(ES): ANDRÉS FELIPE OSORIO CAMARGO
CARLOS ANDRÉS ANIBAL ROJAS

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Mg. ALFONSO SANTOS JAIMES

RESUMEN

El presente proyecto es orientado al diseño y construcción de un banco de pruebas para medir esfuerzos por torsión, con la finalidad de favorecer a los estudiantes de la universidad pontificia bolivariana a realizar una práctica de laboratorio basada en el análisis de la torsión, por medio del uso de galgas extensiométricas y equipos de lectura. De esta manera poder dar un apoyo didáctico a la teoría, facilitando el aprendizaje de la temática.

PALABRAS CLAVE:

Galgas extensiométricas, puente de wheatstone, comparadores de caratula, torsión, deformación.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TEST BED TO MEASURE SHEAR STRESS CAUSED BY TORSION

AUTHOR(S): ANDRÉS FELIPE OSORIO CAMARGO
CARLOS ANDRÉS ANIBAL ROJAS

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Mg. ALFONSO SANTOS JAIMES

ABSTRACT

This project is oriented towards the design and construction of a test bed used to measure shear stress caused by torsion, with the goal of benefiting the University Pontificia Bolivariana's students by providing them with the equipment needed to incorporate a lab practice based on torsional analysis. This would include the use of strain gauges and digital, data indicating equipment. The lab would allow the students to put in practice the theoretic material they study and facilitate their learning process.

KEYWORDS:

Strain gauges, Wheatstone bridge, Dial comparators, Torsion, Deformation.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCION

La asignatura de resistencia de materiales, es una de las más importantes en el proceso de formación de un ingeniero mecánico, ante la problemática presentada en el laboratorio de dicha asignatura por la falta de una práctica en la que se puedan realizar ensayos aplicando cargas torsionales. Se decidió realizar este proyecto con el fin de poder realizar un banco que permita solucionar esta problemática y aportar un beneficio en el desarrollo de los futuros ingenieros mecánicos de la universidad pontificia bolivariana.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Diseñar, construir y probar un banco para medir esfuerzos y deformaciones de elementos de sección transversal circular sometidos a un par de torsión a través del uso de galgas extensiométricas.

1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un banco de laboratorio que permita aplicar un par de torsión en probetas de sección transversal circular, mediante el uso de las ecuaciones básicas de diseño y que tenga como mínimo un factor de seguridad de 1.5 **Resultado:** Planos detallados del banco de laboratorio. **Indicador:** El factor de seguridad del banco será según la metodología de diseño aplicada.
- Construir un banco de laboratorio que permita aplicar un par de torsión en probetas de sección transversal circular, utilizando materiales disponibles comercialmente en el mercado de la región y con procesos de manufactura disponibles en el laboratorio de proceso mecánicos de la UPB. **Resultado:** Banco de laboratorio. **Indicador:** Se utilizarán los planos detallados obtenidos del proceso de diseño.
- Desarrollar una metodología que permita cuantificar la deformación unitaria al cortante y el esfuerzo cortante en las probetas ensayadas en el banco construido mediante el uso de galgas extensiométricas. **Resultado:** Metodología desarrollado. **Indicador:** La metodología debe permitir cuantificar de manera

indirecta el esfuerzo y la deformación que soporta un elemento cuando está sometido a condiciones de momentos de par de torsión.

- Realizar pruebas para corrobora la exactitud entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos teóricos calculados a través de las ecuaciones de esfuerzo y deformación que se encuentran reportados en la literatura. **Resultado:** Tabla comparativa entre los datos obtenidos experimentalmente y los resultados teóricos calculados. **Indicador:** Se relacionará el porcentaje de error encontrado entre los datos teóricos y los datos experimentales.

- Realizar una guía que permita implementar esta práctica en el laboratorio de la asignatura Resistencia de Materiales, la cual se adaptará al formato que posee el documento guía que siguen los docentes que imparten este laboratorio. **Resultado:** Guía de laboratorio. **Indicador:** Se utilizará el formato con el cual está desarrollado el Manual Laboratorio Resistencia de Materiales.

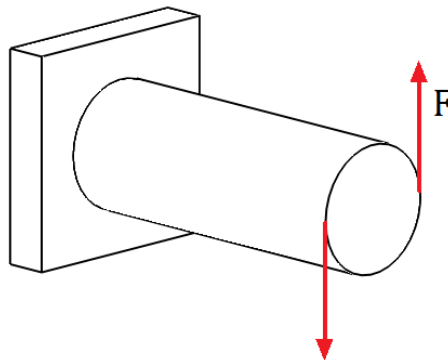
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Torsión

Par de torsión o par torsional

Cuando se habla de torsión, se hace referencia a la deformación que se presenta en una barra longitudinal producto de la acción de momentos o pares de torsión, que causan una rotación alrededor del eje longitudinal.¹ Un ejemplo de barras sometidas a una torsión son los ejes de impulsión en automóviles, ejes de transmisión, ejes de hélices, barras de dirección y taladros.²

Figura 1. Torsión de una barra por dos fuerzas F



Fuente: Autores

Un par de fuerzas consiste en las fuerzas (P) que actúan en la barra (ver Figura 1). Cada par de fuerzas forma un par de torsión que tiende a torcer la barra con respecto a su eje longitudinal.

¹ Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning, séptima edición, México D.F. 2009.

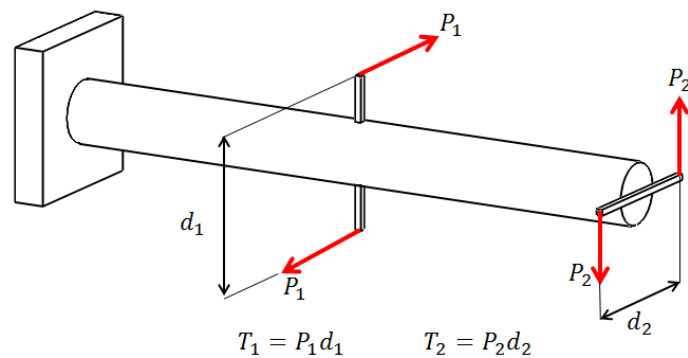
² Craig, Roy r. *Mecánica de Materiales, Continental, segunda edición, México D.F. 2002*

El momento de un par de torsión es igual al producto de una de las fuerzas y la distancia perpendicular entre las líneas de acción de las fuerzas; $T = P \cdot d$.

En la figura 2 se observan dos pares de fuerzas actuando sobre una barra fijada por uno de sus extremos.

Los efectos del momento torsor son un esfuerzo cortante (τ) y un ángulo de giro (ϕ).³

Figura 2. Barra circular sometida a dos pares de fuerza torsional.



Fuente: Autores

Las unidades para el momento son la libra-pie (lb-ft) y la libra-pulgada (lb-in) si es en el sistema inglés. Para el sistema internacional se usa es el newton-metro (N•m).

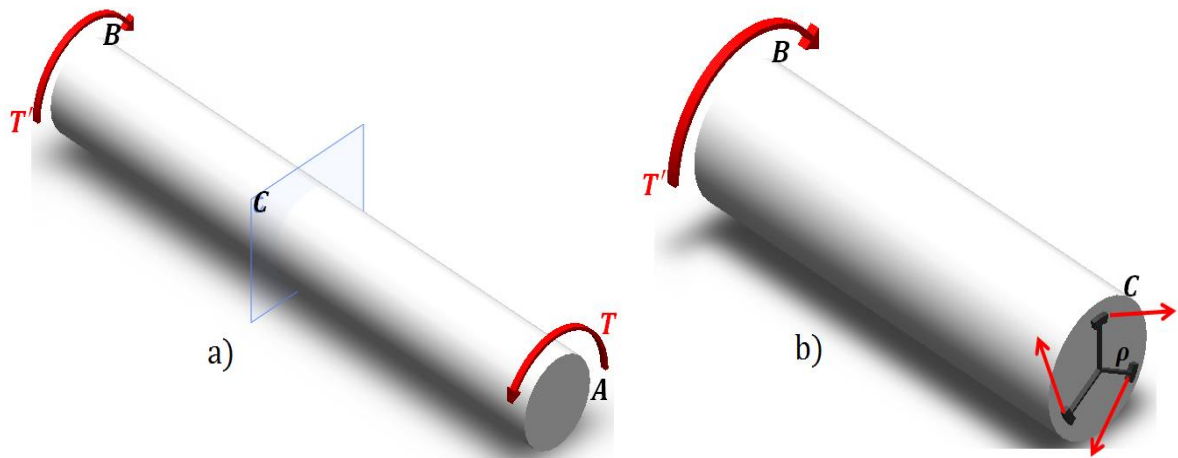
Análisis a los esfuerzos de un eje

Se toma un eje AB que está sometido en sus extremos a pares de torsión T opuestos y de igual magnitud, y se realiza un corte perpendicular al eje en un punto cualquiera C. (Figura 3a), el DCL hecho al tramo BC tendrá las fuerzas

³ Beer F. P, et al. *Mecánica de Materiales*, Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013

cortantes dF perpendiculares al radio del eje que el tramo AC ejerce sobre este al producirse el torcimiento (Figura 3b).

Figura 3. Esfuerzo cortante que actúan sobre un eje circular



Fuente: autores

Para que BC se encuentre en equilibrio, el sistema de fuerzas debe ser equivalente a un par de torsión interno T , donde ρ es la distancia perpendicular desde la fuerza dF al eje, y donde la suma de momentos de las fuerzas cortantes dF alrededor del eje sean de la misma magnitud que el par T .⁴

$$\int \rho dF = T$$

⁴ Beer F. P., et al. *Mecánica de Materiales*, Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013

Y teniendo en cuenta que $dF = \tau dA$, donde τ es el esfuerzo cortante en el elemento de área dA

$$\int \rho \tau dA = T$$

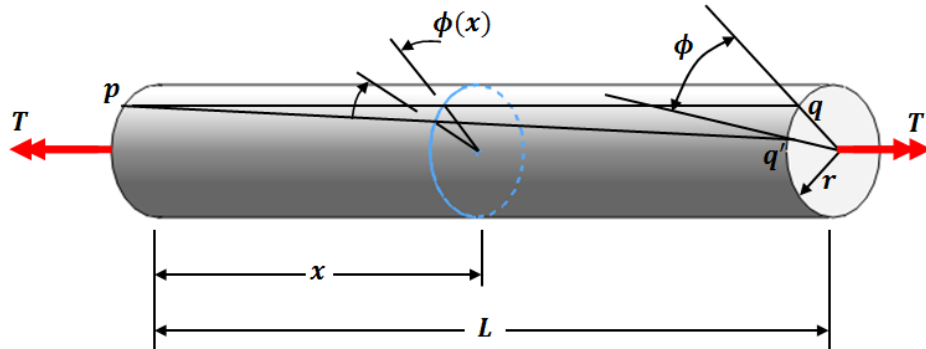
Deformaciones por torsión en una barra circular

Se tiene en cuenta una barra de sección circular sometida a pares de torsión, debido a que cada sección transversal de la barra es idéntica a la otra, la carga interna a las que son sometidas es igual, por esto al torcer la barra sobre su propio eje la sección transversal no cambiara de forma en ningún punto de la barra y si el ángulo de rotación que hay entre los extremos de la barra es pequeño la longitud de la barra no se verá afectada, tampoco sus radios.

Para ver la deformación que se produce en la barra (ver Figura 4), Suponiendo que la barra esta fija en el extremo izquierdo, se le realiza un par de torsión T en el extremo derecho lo que causa una rotación de este extremo respecto al izquierdo. Se traza una línea imaginaria recta formada por los puntos pq , al momento de aplicar el par de torsión T , el punto q rotara respecto al punto p , generando una línea curva pq' . Entre los puntos q y q' se generara un pequeño ángulo conocido como ángulo de torsión (ϕ). Este ángulo cambia a lo largo de la barra, en secciones intermedias tendrá un valor de ϕx , será ϕ en el extremo derecho y cero en el izquierdo.⁵

⁵ Beer F. P, *et al. Mecánica de Materiales*, Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013; Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009.

Figura 4. Deformaciones presentadas en una barra circular.



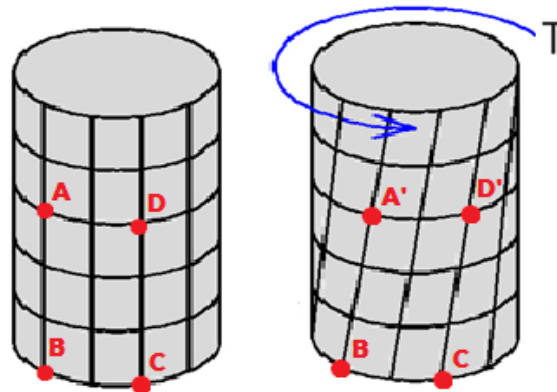
Fuente: Autores

Deformación unitaria por cortante en la superficie exterior

La Figura 5, muestra un cilindro antes y después aplicarle un par de torsión, suponiendo que la base del cilindro esta fija. Se observa que las líneas horizontales AD y BC que representan secciones transversales, permanecen en el mismo plano después de aplicada la deformación, pero las líneas verticales AB y DC se han vuelto helicoidales debido a la deformación por torsión, dando paso a las líneas formadas por los puntos (A'B y D'C), y los ángulos como el ABC que era recto antes de la deformación, deja de serlo después de aplicada esta misma. Este cambio de ángulo muestra que el cilindro está en un estado de cortante puro, es decir que está bajo deformaciones por cortante pero no bajo deformaciones normales.⁶

⁶ Craig, Roy r. *Mecánica de Materiales, Editorial Continental, segunda edición, México D.F. 2002.*

Figura 5. Torsión realizada a una barra circular



Fuente: Autores

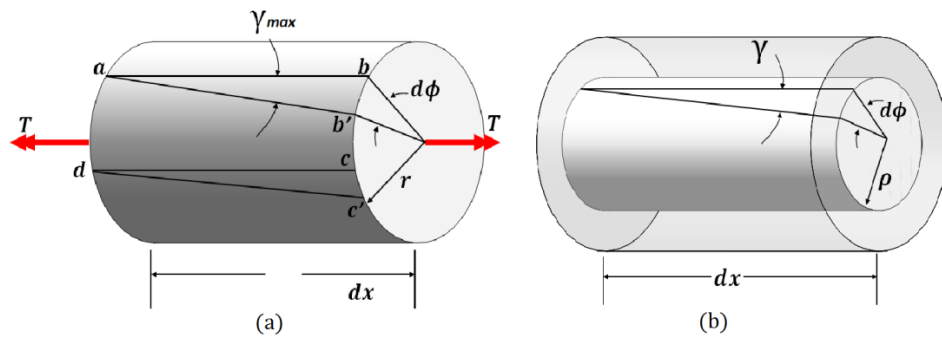
La magnitud de la deformación por cortante está dada por γ_{\max} y es igual al decremento en el ángulo en el punto a, es decir, el decremento en el ángulo BAD. De la Figura 6a se observa que el decremento en este ángulo es

$$\gamma_{\max} = \frac{bb'}{ab}$$

Donde γ_{\max} se mide en radianes, bb' es la distancia que se desplaza el punto b y ab es la longitud del elemento (igual a dx).⁷

⁷ Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009.

Figura 6. Deformación interna y externa de una barra circular



Fuente: Autores

Siendo r el radio de la barra podemos expresar la distancia bb' como $rd\phi$, por tanto

$$\gamma_{m\acute{a}x} = \frac{rd\phi}{dx}$$

Esta ecuación relaciona la deformación unitaria cortante con el ángulo de torsión. Estas ecuaciones son válidas en casos generales de torsión, por ejemplo cuando θ varía con la distancia x a lo largo de la barra.

En casos donde solo se aplique torsión pura, la razón de torsión será igual al ángulo de torsión ϕ dividido por la longitud L , por lo que, únicamente para torsión pura, tendremos ⁸

$$\gamma_{m\acute{a}x} = r \frac{d\phi}{dx} = \frac{r\phi}{L}$$

⁸ Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009.

Deformación unitaria por cortante en el interior de la barra

Calcular la deformación por cortante causada en el interior de la barra, se puede hacer de la misma forma como se halla γ_{max} en la superficie de la barra, ya que los radios de las secciones transversales no se ven afectados ni distorsionados. El análisis realizado en el exterior del elemento $abcd$ (Figura 6a) será de igual manera válido para un elemento interior de radio ρ como el de la Figura 6b, por lo que los elementos ubicados en el interior también se encuentran bajo cortante puro con las deformaciones dadas por la ecuación.

$$\gamma = \rho \frac{d\phi}{dx} = \frac{\rho}{r} \gamma_{m\acute{a}x}$$

Esta ecuación demuestra que las deformaciones presentadas en el interior de una barra circular varían linealmente con la distancia radial ρ desde el centro, donde será cero la deformación en el centro y el valor máximo γ_{max} en la superficie exterior.

Esfuerzos en el rango elástico

Para hablar de los esfuerzos en el rango elástico se considerara el caso donde el par de torsión T es tal que los esfuerzos cortantes estarán por debajo de la resistencia a la cedencia τ_y . Esto significa que los esfuerzos estarán por debajo del límite de proporcionalidad y también por debajo del límite elástico. Por lo cual si el material es linealmente elástico, podemos utilizar la ley de Hooke en cortante.⁹

⁹ Craig, Roy r. *Mecánica de Materiales, Editorial Continental, segunda edición, México D.F. 2002.*

$$\tau = G\gamma$$

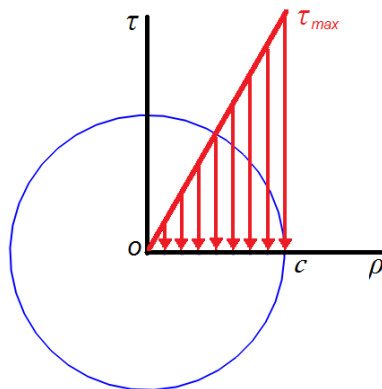
Donde G es el módulo de rigidez o módulo de corte del material, y γ es la deformación por cortante en radianes.

Aplicando por cortante las anteriores ecuaciones en la ecuación obtenemos

$$\tau_{max} = Gr \frac{d\phi}{dx}$$
$$\tau = G\rho \frac{d\phi}{dx} = \frac{\rho}{r} \tau_{m\acute{a}x}$$

Esta ecuación expresa la distribución de esfuerzo cortante en una sección transversal de una barra linealmente estática. Si dicha barra tiene su módulo de rigidez constante (barra homogénea), el esfuerzo cortante variara linealmente con la distancia ρ al centro del eje y el esfuerzo cortante máximo actúa en el borde extremo de la sección transversal (Figura 7).¹⁰

Figura 7. Deformación unitaria por cortante en una sección circular



Fuente: Autores

¹⁰ Beer F. P, et al. *Mecánica de Materiales*, Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013

Formula de torsión

Con la fórmula del par de torsión y para el caso particular del comportamiento linealmente elástico, el par de torsión T se da de la siguiente manera

$$\int_A \rho \left(G \rho \frac{d\phi}{dx} \right) dA = T$$

Y si G depende de ρ entonces

$$T = G \rho \frac{d\phi}{dx} \int_A \rho^2 dA$$

La integral presente en la ecuación es lo que se conoce como el momento polar de inercia (J)

$$J = \int_A \rho^2 dA$$

Para una sección transversal maciza de radio r

$$J = \frac{\pi r^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32}$$

El símbolo combinado GI_p representa la rigidez torsional. Por lo que la ecuación se puede reescribir como

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{T}{GJ}$$

Y al combinar las ecuaciones obtenemos la fórmula de la torsión.

$$\tau = \frac{T\rho}{J}$$

Esta ecuación demuestra que el esfuerzo cortante máximo es proporcional al par a T e inversamente proporcional a J .¹¹

Las unidades utilizadas en la fórmula de torsión son

Tabla 1. unidades en sistema internacional y sistema ingles

Elemento y símbolo	Sistema internacional	Sistema ingles
Par de torsión (T)	newton metro ($N\cdot m$)	libra-pies ($lb\cdot ft$) o libra-pulgadas ($lb\cdot in$)
Radio (ρ)	metros (m)	pulgadas (in)
Momento polar de inercia (J)	metros a la cuarta potencia (m^4)	pulgadas a la cuarta potencia (in^4)
Esfuerzo cortante (τ)	pascales (Pa)	en libras por pulgada cuadrada (psi)

Fuente: Autores

¹¹ Gere, james. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009

Angulo de Torsión

Para relacionar el ángulo de torsión de una barra de material linealmente elástico con el par de torsión, tenemos

$$\theta = \frac{T}{GJ}$$

En una barra en torsión pura, el ángulo de torsión ϕ es igual a la razón de torsión multiplicada por la longitud de la barra (es decir, $\phi = \theta L$). Por lo tanto

$$\phi = \frac{TL}{GJ}$$

2.2. Materiales

Para el desarrollo de esta temática se tendrá en cuenta la tabla 2 con el fin de conocer el significado de algunas de las propiedades de estos materiales.

Tabla 2. conceptos de propiedades físicas

Dureza:	Es la resistencia por parte del material a sufrir una alteración, tal como la abrasión, el rayado o la penetración. Generalmente es medido en unidades de brinell (HB) por medio del ensayo que recibe el mismo nombre.
Ductilidad	Es la capacidad que tiene un material que al ejercerle una fuerza, presente deformación sin llegar a romperse es decir, que sus átomos pueden deslizarse unos sobre otros estirando el material sin fractura logrando producir hilos o alambres.
maleabilidad	Propiedad que poseen algunos materiales a sufrir una deformación sin fracturarse, a diferencia de la ductilidad, esta determina la capacidad de poder ser descompuesto en láminas.
Resistencia al desgaste	Es la resistencia que tiene un material ante la abrasión. Es decir a sufrir un desgaste cuando está bajo una fuerza de fricción ocasionada por otro material.

Fuente: Autores

2.2.1. Aluminio

El aluminio es un elemento químico abundante en la corteza terrestre, pero no se encuentra en estado puro. Hasta 1889 Karl Josef Bayer halla un procedimiento para extraer el aluminio a partir de la bauxita. Como consecuencia, los precios del aluminio comienzan a bajar drásticamente y aparecen las primeras aplicaciones. Desde 1889 y hasta hoy en día se recicla el aluminio, debido a que el costo de reciclaje es un 95% menor que el de su extracción desde la bauxita. De ahí que el ciclo de vida del aluminio sea redondo.¹²

Figura 8. Bauxita (izquierda), aluminio (derecha)



Fuente: La periódica, <https://laperiodica.webnode.es/news/aluminio/>;
metallurgist, <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/wp-content/uploads/2016/10/Alumino.png>

911

El aluminio tiene una amplia variedad de aplicaciones, que van desde la industria y obras de ingeniería hasta uso doméstico. Desde mediados del siglo XX, es el metal que más se utiliza después del acero.

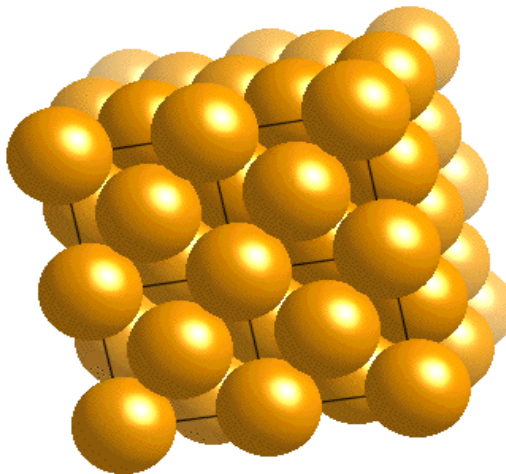
Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica. Tales como su baja densidad (2.700 kg/m³) y su alta

¹² Extruidos Del Aluminio. Artículos técnicos. La historia del aluminio. Albacete, España. Disponible en <http://www.extrual.com/es/noticias/articulos-tecnicos/la-historia-del-aluminio>

resistencia a la corrosión. Usando aleaciones se puede aumentar su resistencia mecánica.

Los átomos en aluminio sólido se ordenan en una red tridimensional con una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, como se muestra en la ilustración 9.¹³

Figura 9. Estructura del aluminio



Fuente: Universidad de Cádiz, Propiedades del aluminio, España. Disponible en <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/uca/centro/tablaperiodica/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/imagenes/aluminio-estructura.png>

La tabla 3 es un resumen de las propiedades y características estructurales más importantes del aluminio.

¹³ Universidad de Cádiz, Propiedades del aluminio, España. Disponible en <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/Prop.%20Al>

Tabla 3 Propiedades y características del aluminio

Estructura	Símbolo	Al	Unidades
	Numero atómico	13	
	Peso atómico	29.98154	u.m.a
	Volumen atómico	$9.996 \cdot 10^{-6}$	$m^3 \cdot mol^{-1}$
	Estr. cristalina	FCC	A1
	Densidad Empaquetamiento	74	%
	N. de coordinación	12	
	Parámetro de red	0.40496	nm
	Distancia interatómica mínima	0.28635	nm
Propiedades	Densidad	2.6989	$g \cdot cm^{-3}$
	Módulo de Young	66.6	Gpa o $KN \cdot m^{-1}$
	Resistencia a tracción	230-570	Mpa
	Limite elástico	215-505	Mpa
	% Elongación	10-25	%
	Coefficiente de expansión entre 20°C y 100°C	185	%
	Módulo de Poisson	0.35	
	Tª de fusión	660.2	°C
	Calor latente de fusión	390	$KJ \cdot Kg^{-1}$
	Energía de activación para la autodifusión	120	$KJ \cdot mol^{-1}$
	Conductividad eléctrica	37.67	$m \cdot \Omega^{-1} \cdot mm^{-2}$
	Conductividad térmica	235	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Fuente: Universidad de Cádiz, Propiedades del aluminio, España. Disponible en <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/uca/centro/tablaperiodica/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/imagenes/tabla.pn>

Propiedades físicas

A parte de las mencionadas anteriormente, el aluminio posee otra gran variedad de ventajas como son:

- Bajo peso, con una densidad 2.7 veces más alta que la del agua ha impulsado la industria aeronáutica y de transporte entre otras debido a su fácil manipulación, bajos costos de mano de obra y de transporte.
- Alta conductividad térmica.
- Alta conductividad eléctrica.
- Bajo punto de fusión, por lo que su uso se extiende a disipadores de calor, aires acondicionados, industria química, e incluso utensilios de cocina.
- Tercer elemento más abundante en la tierra (primero el oxígeno y segundo el silicio).
- Facilidad para su reciclaje por lo que reduce los costos de su uso. Es necesario tener en cuenta que sus propiedades pueden variar dependiendo del contenido de impureza.¹⁴

Propiedades mecánicas (Resistencia mecánica)

Estas propiedades definen el comportamiento del material al momento de una aplicación específica, unas de ellas son.

¹⁴ Universidad de Cádiz, Propiedades del aluminio, España. Disponible en <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/Prop.%20Al>

- Dureza: es la resistencia por parte del material a sufrir una alteración, tal como la abrasión, el rayado o la penetración. Generalmente es medido en unidades de brinell (HB) por medio del ensayo que recibe el mismo nombre. En el aluminio puro sus valores van desde los 15HB y endurecido térmicamente (aleación aluminio-zinc 7075) llega a los 140 HB.
- Ductilidad: dependiendo de su composición es altamente deformable por lo que se emplea en la fabricación de alambres y cableados, siendo muy usados recientemente en el cableado eléctrico de alta tensión, también gracias a su alta conductividad eléctrica.
- Maleabilidad: hoy en día, la industria utiliza con un mayor grado este material, debido a que se pueden hacer aleaciones más fuertes pero que conserven cierto grado de maleabilidad, como por ejemplo el papel aluminio o las latas utilizadas por la industria alimenticia.
- Resistencia al desgaste: Los diversos materiales fabricados con aluminio están sometida a abrasión entre materiales en determinadas funciones en la que esté actuando, tienden a tener un buen comportamiento durante las numerosas aplicaciones que tienen en cojinetes de fricción y émbolo.¹⁵

2.2.2. Acero

Es un metal ferroso (aquellos cuyo principal ingrediente es el hierro) que se obtiene mediante la aleación entre hierro y una cantidad de carbono que varía entre 0,03% y menos del 2% dependiendo de la aplicación, en ocasiones otros elementos como el níquel o el cromo se agregan con propósitos específicos.¹⁶

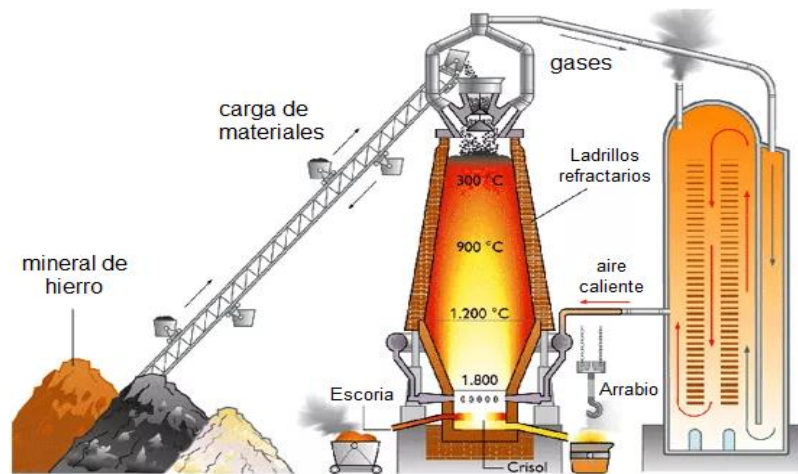
¹⁵ Universidad de Cádiz, Propiedades del aluminio, España. Disponible en <http://tablaperiodica.uca.es/Tabla/elementos/Aluminio/Grupo1/Prop.%20Al>

La fecha en que se descubrió la técnica para fundir el mineral de hierro no se tiene con exactitud, aunque los artefactos compuestos por este material encontrados por arqueólogos datan del año 3000 a.c en Egipto.¹⁷

Los primeros artesanos en trabajar el hierro, producían aleaciones hoy conocidas como hierro forjado, que se compone de masa mineral de hierro y carbón vegetal calentados en un horno golpeando con martillos para poder retirar la escoria y soldar el hierro.

A partir del siglo XIV el tamaño de los hornos para la fundición aumentó considerablemente, al igual que el tiro para forzar el paso de los gases de combustión. En estos hornos el material absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.

Figura 10. Proceso de obtención del Acero



Fuente: Materiales y Propiedades,
<https://materialestecno1.wordpress.com/procesos-de-obtencion-del-acero-y-otros-productos-ferrosos/>

¹⁷ ¹⁷ Asociación Latinoamericana de Acero. Que es el Acero. Santiago de Chile. Disponible en <https://www.alacero.org/es/page/el-acero/que-es-el-acero>

Los componentes principales del acero se encuentran abundantemente en la naturaleza, además de que el acero es totalmente reciclable, sin llegar a perder sus propiedades, lo que hace que sea más fácil de producir a gran escala.¹⁸

Propiedades del acero

Debido a sus propiedades, el acero es posiblemente el material más importante del mundo en aplicaciones de ingeniería y construcción. Las propiedades del acero más importantes son la durabilidad, resistencia a la tracción, buena resistencia a la fluencia, buena conductividad térmica, y, para los aceros inoxidables, la resistencia a la corrosión. Dichas propiedades, las variaciones que estas pueden tener dependiendo de su composición química, el procesamiento y el tratamiento térmico que conducen a su micro estructura final, van de la mano con la aplicación específica que se le vaya a dar y del medio ambiente al que será expuesto. La tabla 4 muestra algunas de sus propiedades.

Tabla 4. propiedades del acero

Propiedades			Unidades
	Densidad	7.7 - 8	$g \cdot cm^{-3}$
	Módulo de Young	207	Gpa o $KN \cdot m^{-1}$
	Resistencia a tracción	441 - 686	MPa
	Límite de elástico	190 - 210	MPa
	% Elongación	15 - 30	%
	Módulo de Poisson	0.3	
	Tª de fusión	1375	°C
	Conductividad eléctrica	5.9	$m \cdot \Omega^{-1} \cdot mm^{-2}$
	Conductividad térmica	11.2 – 48.3	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Fuente: Autores

¹⁸Concha, Alejandro. Historia del Acero. Archdaily Colombia 2018. Disponible en <https://www.archdaily.co/co/02-44191/historia-del-acero>

Ventajas del acero

- Alta resistencia: su relación peso–resistencia tanto a compresión como a tracción permite la elaboración de estructuras ligeras, pero de gran resistencia.
- Fácil de soldar: son altos conductores eléctricos.
- Elasticidad: Su comportamiento es prácticamente elástico, hasta cierto punto donde los esfuerzos son considerables.
- Tenacidad: Enorme capacidad de absorción de energía.
- Ductilidad: Es la capacidad que tiene el acero de deformarse considerablemente antes de entrar a un estado plástico o de rotura. Esta característica permite que los elementos estructurales de hormigón armado avisen su falla mediante agrietamientos.
- Reciclable: El acero es reciclable en un 100% además de ser totalmente degradable.

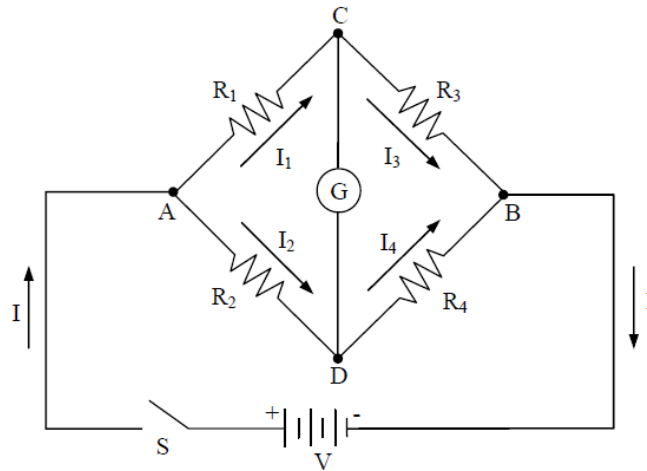
Desventajas

- Corrosión: Es el principal inconveniente del acero, debido a la fácil oxidación del hierro.
- Endotérmico: Propaga fácilmente el calor debido a sus propiedades, y en caso de incendio las altas temperaturas se propagarán fácilmente.

2.3. Puente de Wheatstone

El puente de wheatstone es un circuito que se utiliza para medir el valor de una resistencia eléctrica mediante el equilibrio de los brazos del puente, en su configuración más común en forma de rombo (ver Figura 11), se compone de cuatro resistencias (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) que forman un circuito cerrado siendo una de ellas la resistencia bajo medida.¹⁹

Figura 11. Circuito denominado puente de wheatstone



Fuente: vicerrectorado de investigación, Manual de Electricidad y Magnetismo, Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 2001.

Para este ejemplo las resistencias R_1 Y R_3 están conectadas en serie, igual que las resistencias R_2 y R_4 . Conectado entre R_1 Y R_3 (punto C), y entre R_2 Y R_4 (punto D) está un galvanómetro, cuya función es detectar pequeñas corrientes. La corriente (I) de una batería o una fuente, llega por el punto A, luego de este punto la corriente se divide en R_1 y R_2 , siendo:

¹⁹ Universidad Tecnología Del Perú, Vicerrectorado de Investigación. Manual De Electricidad Y Magnetismo, Imprenta Grupo IDAT, Lima 2001

$$I = I_1 + I_2$$

Como A y B son puntos comunes para ambas ramas y cuando estas están conectadas en paralelo su potencial es igual, entonces el potencial sobre R_1 y R_3 , y R_2 y R_4 debe ser el mismo.

Como R_1 y R_3 son resistencias variables, R_2 también lo es, estando equilibrio (corriente nula por el galvanómetro). Por lo que el punto C y D tendrán el mismo potencial, siendo así el diferencial de potencial de R_1 será igual al de R_2 , por lo tanto el diferencial de potencia de R_3 debe ser igual al de R_4 .

$$V_1 = V_2 \quad \text{ó} \quad I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$V_3 = V_4 \quad \text{ó} \quad I_3 R_3 = I_4 R_4$$

Dividiendo las ecuaciones y teniendo en cuenta la condición de equilibrio donde $I_1 = I_3$ y $I_2 = I_4$ entonces:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

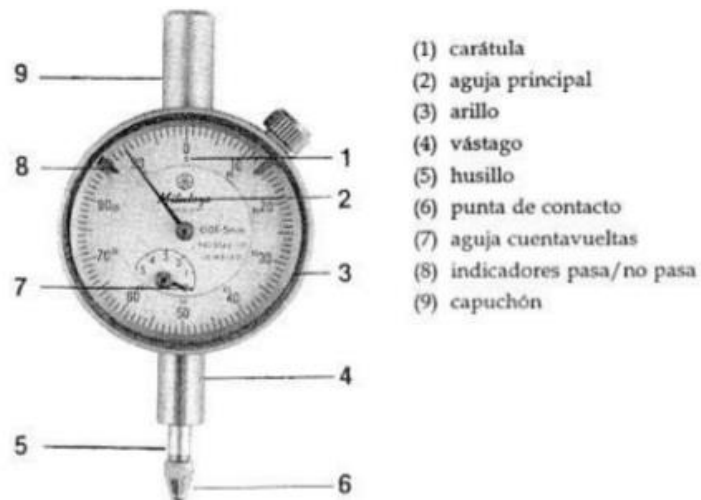
Despejando R_4 en la ecuación y si los valores de las resistencias R_1 , R_2 y R_3 son conocidos, se podrá hallar los valores de una resistencia desconocida (R_4).

2.4. Comparadores de caratulas

El comparador de caratula (Dial gage) es un instrumento de medición, donde el movimiento realizado en el husillo se amplifica mediante una serie de engranajes que dan movimiento a una aguja indicadora que se encuentra ubicada en la caratula del mecanismo. El movimiento de la aguja depende del paso que realice dispositivo de medición.

Este instrumento no entrega valores de mediciones, sino que entrega variaciones de mediciones (de ahí su nombre) su exactitud está relacionada con el tipo de medidas que se desea comparar, suelen medir rangos de 0,25 mm a 300 mm.²⁰

Figura 12. Componentes de un comparador de caratula



Fuente: Todo Ingeniería Industrial,
<https://todoingenieriaindustrial.files.wordpress.com/2012/10/72.jpg>

²⁰ Todo Ingeniería Industrial. Comparadores de Caratula. ING Luis Miguel Hernández. Disponible en: <https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/>

Al momento de la utilización, tenemos que tener en cuenta que este instrumento es de comparación lo cual exige que su uso se encuentre fijo a la base donde se va a realizar la medición. Por esto se necesita utilizar soportes especiales para una mejor sujeción al trabajar.²¹

Tipos de comparadores de caratula

Existe diferentes formas de clasificar los comparadores de caratula.

- Forma de lectura (Análogos o digital). Los más utilizados son los análogos.
- Tamaño de dial.
- Precisión (0,01 mm; 0,001mm).
- Rango de medición.
- Numero de revoluciones del dial.
- Estilo del dial (simétrico o continuo).
- Estilo de graduación: los números positivos van en sentido horario y los números negativos van sentido anti horario.
- Contador de revoluciones: muestra el número de revoluciones completas que ha dado la aguja principal.

²¹ Todo Ingeniería Industrial. Comparadores de Caratula. ING Luis Miguel Hernández. Disponible en: <https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/>

Aplicaciones:

Los comparadores de caratula se pueden utilizar para un gran número de mediciones, por ejemplo:

- Excentricidad del árbol de levas.
- Excentricidad del cigüeñal.
- Deflexión del volante de inercia.
- Juego longitudinal del árbol de levas.

Recomendaciones:

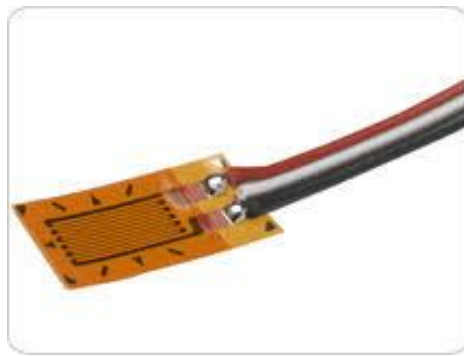
- Seleccionar el comparador más adecuado para acoger las necesidades de medición (lectura, curso tamaño y tipo).
- Situar el comparador en posición perpendicular a la base de referencia para evitar errores al momento de la medición.
- Asegurar el comparador de impactos o fuerzas extremas. Después del uso, limpie la suciedad y marcas dejadas por los dedos en el uso.
- Use un paño limpio y seco. Guardar en ambiente seco y limpio, preferiblemente en su estuche.²²

²² Todo Ingeniería Industrial. Comparadores de Caratula. ING Luis Miguel Hernández. Disponible en: <https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com/>

2.5. Galgas extensiometricas

Las galgas extensiometricas, son sensores utilizados en la medición de la deformación, presión, carga entre otras cosas. Que está basado en la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor de su resistencia cuando es sometida a un esfuerzo.

Figura 13. Galga extensiometrica



Fuente: National Instruments,
<http://www.ni.com/images/coreblock/large/strainGage.gif>

La galga extensiométrica consiste en un alambre muy fino o una lámina metálica delgada fabricada en forma de rejilla, dicha forma tiene el fin de abarcar la máxima cantidad de material de la galga sujeta a tensión en la superficie del objeto a analizar. Como se ve en la ilustración 13, es una lámina metálica estampada a una base flexible y aislante. La galga se adhiere al objeto al cual se le hará el estudio (ilustración 14). En el momento en que el objeto comience a deformarse también se producirá una variación en la resistencia eléctrica de la lámina.

La galga extensiométrica hace una lectura en el punto del material donde está ubicada.²³

²³ Universidad Nacional Experimental del Táchira. Departamento de ingeniería electrónica. Características de los sensores y sistemas de acoplamiento. San Cristóbal 2012

Figura 14. Galga extensiometrica adherida a una probeta



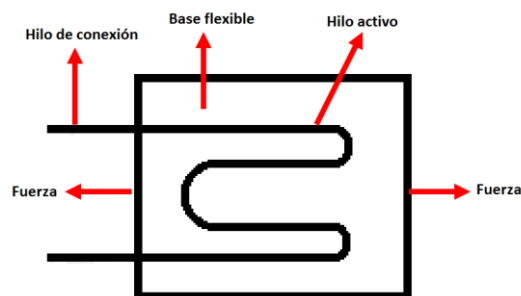
Fuente: Genera tecnología, http://www.generatetecnologias.es/images/p005_0_2.jpg

Tipos de galgas extensiometricas

Existen dos tipos de galgas extensiometricas

Galgas cementadas: estas están formadas por varias trazas de hilo muy fino que se encuentran estampados en un pedazo plástico, y este se adhiere totalmente a la pieza a la que se le hará el estudio.

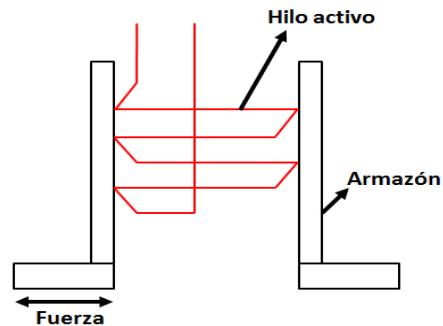
Figura 15. Partes de una galga extensiometrica



Fuente: Autores

Galgas sin cementar: en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

Figura 16. Galga sin cementar



Fuente: Autores

En ambos tipos de galgas la fuerza a la que son sometidas, estira o comprime los hilos según sea el estudio que se vaya a realizar.

La galga extensiométrica es una de las resistencias que componen el puente de wheatstone (ilustración 11) el cual tiene una resistencia determinada, pero al momento de aplicar una tensión, la variación presentada en la galga crea una caída de tensión y el puente se equilibra a estas condiciones.²⁴

Aplicación de las galgas extensiométricas

La aplicación de las galgas extensiométricas es muy extensa, pero su uso más común es en la ingeniería mecánica y civil. A la hora de hacer un montaje, o una construcción de estructuras o maquinaria es necesario el uso de las galgas para determinar la carga o deformación que sufrirá esta misma.²⁵

²⁴ Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial, Grupo Editor Alfaomega, sexta edición, México D.F. 1999

²⁵ Genera, SL. Mediciones con Galgas Extensiométricas, Madrid, España 2018. Disponible en http://www.generatecnologias.es/mediciones_galgas_extensiométrica.html

La galga extensiométrica es la parte del sistema de medición que trasforma la deformación inducida por el modelo en una variación de resistencia; haciendo una lectura de la variación de resistencia, se puede llegar a conocer la deformación que el modelo indujo a la galga, y, por tanto, la deformación unitaria que el modelo experimentó por efecto de la fuerza. Los componentes requeridos para el sistema de medición son los siguientes:

- **Sensor:** es un dispositivo que está diseñado para recibir captar una magnitud estímulo externo y transformarlo en otra magnitud. La galga extensiométrica es un tipo de sensor que transmite una deformación o esfuerzo aplicada a una estructura, y lo convierte en una variación de resistencia eléctrica.
- **Transductor:** Los transductores son dispositivos que se encuentran en una serie de medición en la cual convierten una magnitud física en una señal eléctrica. El cambio de resistencia que se consigue de las galgas es un valor de deformación, pero en los sistemas electrónicos es inadecuado hacer una toma de datos de resistencia. Por eso es necesario la ayuda de un transductor para la lectura de la variación de resistencia que se vincula al cambio de voltaje y así poder realizar una medición.
- **Amplificador:** es un instrumento que como dice su nombre amplifica una señal. La variación de voltaje que emite la deformación de la galga es muy pequeña, por lo que para poder ser digitalizada es indispensable amplificarla.
- **Registro de datos:** para almacenar los datos, se deben tomar cada cierto intervalo de tiempo, que permita una resolución óptica del registro. Finalmente, los datos obtenidos son una serie de valores de tiempo y de voltaje.

2.6. Bancos de pruebas de torsión comerciales.

2.6.1. WP 500 ensayo de torsión, 30 N

El equipo de ensayo WP 500 permite realizar ensayos de torsión en probetas que se ven sometidas a una carga hasta que se rompen.

El momento de torsión se aplica por medio de un volante y un engranaje de tornillo sin fin. La placa base está reforzada contra la torsión. La cubierta protectora transparente protege a los operarios de los fragmentos que puedan salir despedidos. El momento de torsión efectivo se mide mediante un árbol de momento de torsión dotado de galgas extensométricas (DMS) y se puede leer directamente en un indicador. El ángulo de torsión se registra por medio de un codificador incremental y también se puede leer directamente. Los valores de medición se pueden transferir a un ordenador y evaluarse con ayuda del software.²⁶

Figura 17. Banco de ensayos de torsión WP 500

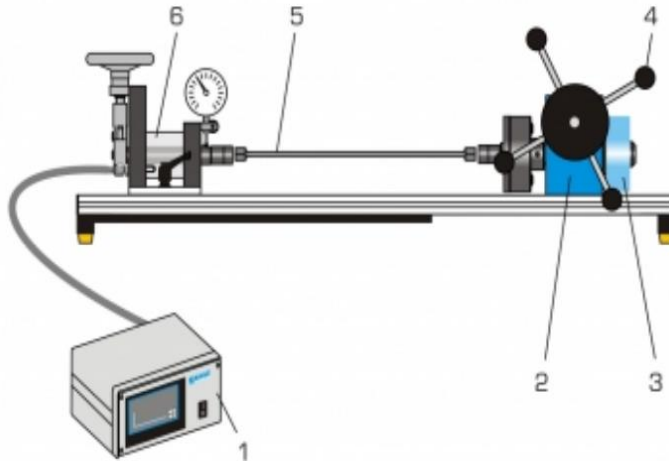


Fuente: GUNT Hamburg, https://www.gunt.de/images/datasheet/1644/WP-500-Ensayo-de-torsin-30Nm-gunt-1644-foto_totale.jpg

²⁶GUNT Hamburg, WP 500 Ensayo de Torsión, 30Nm, ficha técnica de datos, Alemania disponibles en: <https://www.gunt.de>

Especificación de los componentes

Figura 18. Componentes del banco de ensayos WP 500



Fuente: GUNT Hamburg, <https://www.gunt.de/images/datasheet/1644/WP-500-Ensayo-de-torsin-30Nm-gunt-1644-zeichnung.jpg>

- [1] Amplificador de medida con indicador.
- [2] Engranaje de tornillo sin fin.
- [3] Codificador incremental.
- [4] Volante para el momento de torsión.
- [5] Probeta.
- [6] Dispositivo de medición móvil con árbol de momento de torsión de galgas extensométricas y unidad de compensación.

Datos técnicos

- Momento de torsión máx.: 30Nm
- Dispositivo de carga, engranaje de tornillo sin fin
- relación de transmisión: 1:63
- Portaprobetas: 2x 17mm, hexagonal
- Rangos de medición

- momento de torsión: 0 a 30,0Nm
- ángulo de torsión: 0 a $\pm 3200^\circ$, resolución: $0,1^\circ$
- Peso: aprox. 43kg (todo)

2.6.2. WP 510 Ensayo de torsión 200Nm, accionamiento a motor

El equipo de ensayo WP 510 permite realizar ensayos de torsión en probetas que se ven sometidas a una carga hasta que se rompen. Su estructura es clara y su manejo sencillo, lo que permite observar todos los detalles y fases del procedimiento técnico del ensayo. La potencia del equipo de ensayo permite realizar ensayos a escala industrial. Durante el ensayo, las probetas metálicas se torsionan hasta que sufren la típica rotura por cizallamiento. El momento de torsión se aplica mediante un motor reductor de alta desmultiplicación. El convertidor de frecuencia ofrece cuatro velocidades de accionamiento diferentes hacia izquierda y derecha. La placa base está reforzada contra la torsión. La cubierta protectora transparente protege a los operarios de los fragmentos que puedan salir despedidos. El momento de torsión efectivo (momento de ensayo) se mide mediante un árbol de momento de torsión dotado de galgas extensométricas (DMS) y se puede leer directamente en un indicador. El ángulo de torsión se registra por medio de un codificador incremental y también se puede leer directamente. La tecnología de medición controlada por microprocesadores se encuentra bien protegida en la carcasa.²⁷

²⁷ GUNT Hamburg, WP 510 Ensayo de Torsión200Nm, accionamiento a motor, ficha técnica de datos, Alemania disponibles en: <https://www.gunt.de>

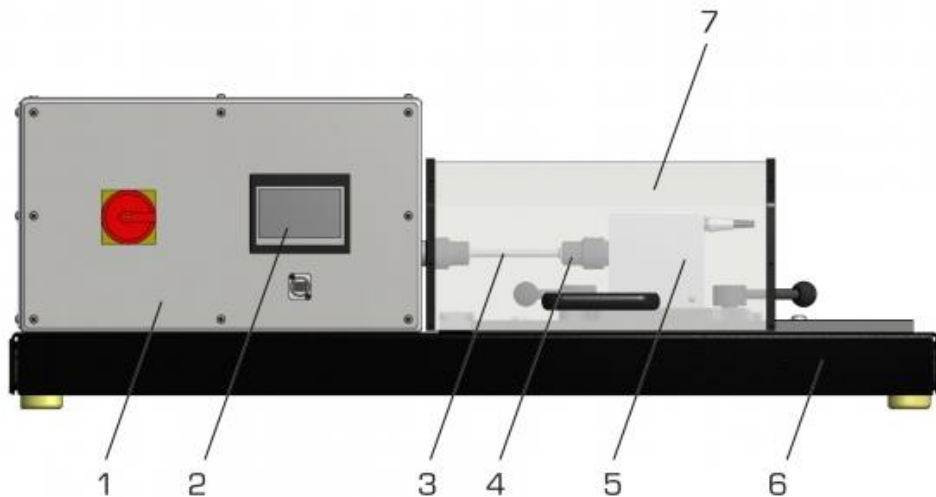
Figura 19. Banco de ensayos de torsión WP 510



Fuente: GUNT Hamburg, https://www.gunt.de/images/datasheet/1648/WP-510-Ensayo-de-torsin-200Nm-accionamiento-a-motor-gunt-1648-foto_totale.jpg

Especificación de los componentes

Figura 20. Componentes del banco de ensayos WP 510



Fuente: GUNT Hamburg, <https://www.gunt.de/images/datasheet/1648/WP-510-Ensayo-de-torsin-200Nm-accionamiento-a-motor-gunt-1648-zeichnung.jpg>

- [1] Unidad de accionamiento con motor reductor.
- [2] Panel táctil para el manejo y la indicación de los valores de medición.
- [3] Probeta.
- [4] Portaprobetas (boca para llave conectable común de 19mm).
- [5] Estribo de fijación rápida a los perfiles de guía con dispositivo de medición del momento de galgas extensométricas.
- [6] Placa base rígida a la torsión.
- [7] Cubierta protectora transparente.

Datos técnicos

- Motor reductor helicoidal
- momento de torsión máx.: 200Nm
- velocidades de giro: 50, 100, 200, 500°/min
- convertidor de frecuencia con 4 números de revoluciones fijos
- potencia del motor: 0,12kW, con marcha a izquierda y derecha
- momento de torsión: 0...199,9Nm
- ángulo de torsión: 0...±3200°, resolución: 0,1°
- Peso: aprox. 95kg

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Para el desarrollo del proyecto se decidió implementar una de las metodologías utilizada en el área de ingeniería de diseño. El diseño como tarea consiste en idear y describir un sistema que posea las características requeridas y deseadas para satisfacer una necesidad específica; el diseño como proceso es una actividad sistemática para la generación y evaluación sistemática e inteligente de especificaciones de artefactos cuya forma y función alcanza los objetivos establecidos y satisfacen las restricciones especificadas.

Ninguna metodología de diseño prevé de una manera exacta todas las situaciones que se pueden presentar en una etapa específica del mismo, por consiguiente estas deben usarse de manera flexible, como una guía, y no como un principio innegable e irrefutable.

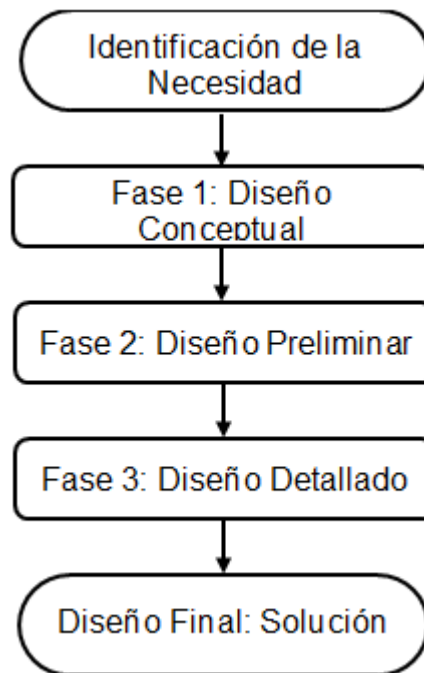
En general los modelos de diseño se dividen en cuatro grupos: descriptivos, prescriptivos, cognitivos y computacionales. Los modelos descriptivos describen una secuencia de actividades que ocurren en el diseño; los prescriptivos recomiendan un patrón de actividades de diseño; los cognitivos explican el comportamiento del diseñador y los computacionales expresan la forma en que un computador desarrolla las actividades de diseño.

Para el desarrollo del diseño del banco para medir deformaciones y esfuerzo originados por momentos de torsión se utilizó el modelo lineal, el cual pertenece al grupo de los descriptivos, debido a que es muy básico y permite identificar fácilmente las fases del diseño que son comúnmente aceptadas por la mayoría de los investigadores y las cuales se relacionan en la Figura 21.

En la primera fase, denominada de diseño conceptual, se buscan conceptos que permitan solucionar el problema propuesto, para lo cual se analiza el problema, se

sintetizan las posibles alternativas de solución y se evalúan con respecto a las restricciones (especificaciones) impuestas. En esta fase se generan principios de solución, pero no se obtienen estructuras de solución lo suficientemente concretas como para materializar la respuestas al problema.

Figura 21. Esquema del Modelo Lineal de diseño



Fuente: Autores

En la segunda fase o de diseño preliminar se avanza en la concretización de una solución al problema, determinando componentes e interacciones con el suficiente grado como para poderla evaluar objetivamente. Se obtienen formas específicas, materiales propuestos y planos de conjunto con dimensiones generales. En general esta fase es más comprendida por los ingenieros debido a su formación curricular.

La tercera y última fase de diseño denominada de detalle tiene como finalidad la obtención de todas las especificaciones necesarias para la construcción de la solución. Como resultado de esta fase se obtienen planos de detalle, el proceso de fabricación, la identificación de proveedores, etc.

3.1. Identificación de la necesidad

El requerimiento del diseño y la construcción de un equipo didáctico para la corroboración de las ecuaciones de esfuerzo y deformación de elementos sometidos a momentos de torsión son solicitados por el docente a cargo de la asignatura Resistencia de Materiales, con el fin de adecuar de una mejor manera los contenidos teóricos a las prácticas de laboratorio implementadas. Debido a lo anterior los requerimientos de diseño fueron entregados por él y se pueden resumir en los siguientes ítems:

- El equipo debe permitir, en lo posible, que la probeta utilizada este sometida solo a momento torsor, es decir, se deben evitar al máximo que estén presentes cargas axiales, momentos flectores y fuerzas transversales.
- Debido a que es un equipo didáctico las cargas que se deben utilizar deben ser de magnitud pequeña, es decir que no sobrepasen los 49 N
- El equipo debe permitir cuantificar la deformación unitaria al cortante, γ , el cual es necesario para determinar el esfuerzo cortante en la probeta; adicionalmente también debe facilitar la obtención del ángulo de giro, ϕ , en puntos ubicados a diferentes longitudes del espécimen.
- Los materiales utilizados en la construcción del equipo y la probeta deben ser comercialmente disponibles.
- El equipo debe permitir el cambio de la probeta, con el fin de poder desarrollar ensayos con diferentes configuraciones de sección transversal durante la realización de las prácticas con los estudiantes que matriculan la asignatura.

- El acabado final del equipo debe ser de buena calidad, con el fin de garantizar su durabilidad en el tiempo.

3.2. Diseño conceptual

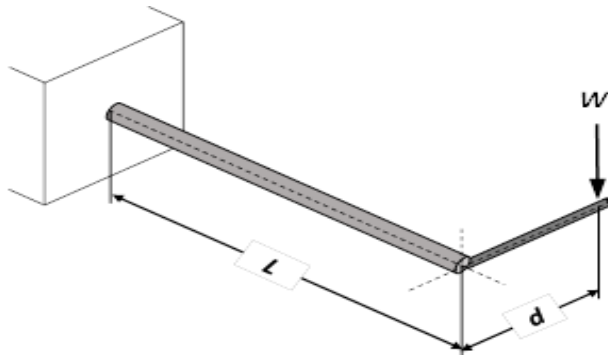
Para dar respuesta a cada uno de los requerimientos de la persona que solicita el equipo se analiza cada uno de ellos a continuación.

3.2.1. Existencia solo de momento torsor

Debido a que la torsión se origina solo por un momento torsor se hace necesario aplicar una carga (fuerza) a una distancia perpendicular del eje centroidal del elemento que se va a analizar; la mejor forma de hacerlo es ubicar uno de los extremos de la probeta en un empotramiento, apoyo que restringe todos los movimientos, y en el otro extremo un sistema que permita la existencia de una distancia perpendicular para la aplicación de la carga, la cual por facilidad deber ser el peso de un cuerpo.

El primer modelo propuesto se representa en la figura 22

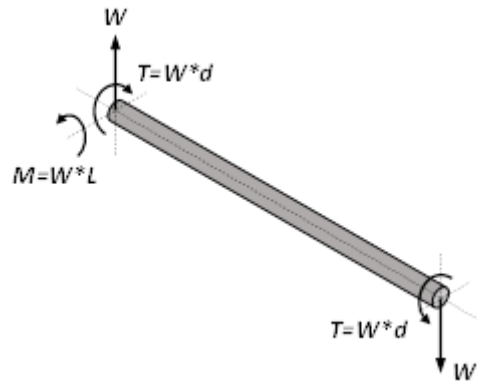
Figura 22. Esquema del primer modelo propuesto



Fuente: Autores

Para determinar cuáles cargas están presentes en la probeta se hace necesario realizar el diagrama de cuerpo libre "DCL" de este elemento, el resultado del análisis se presenta en la figura 23

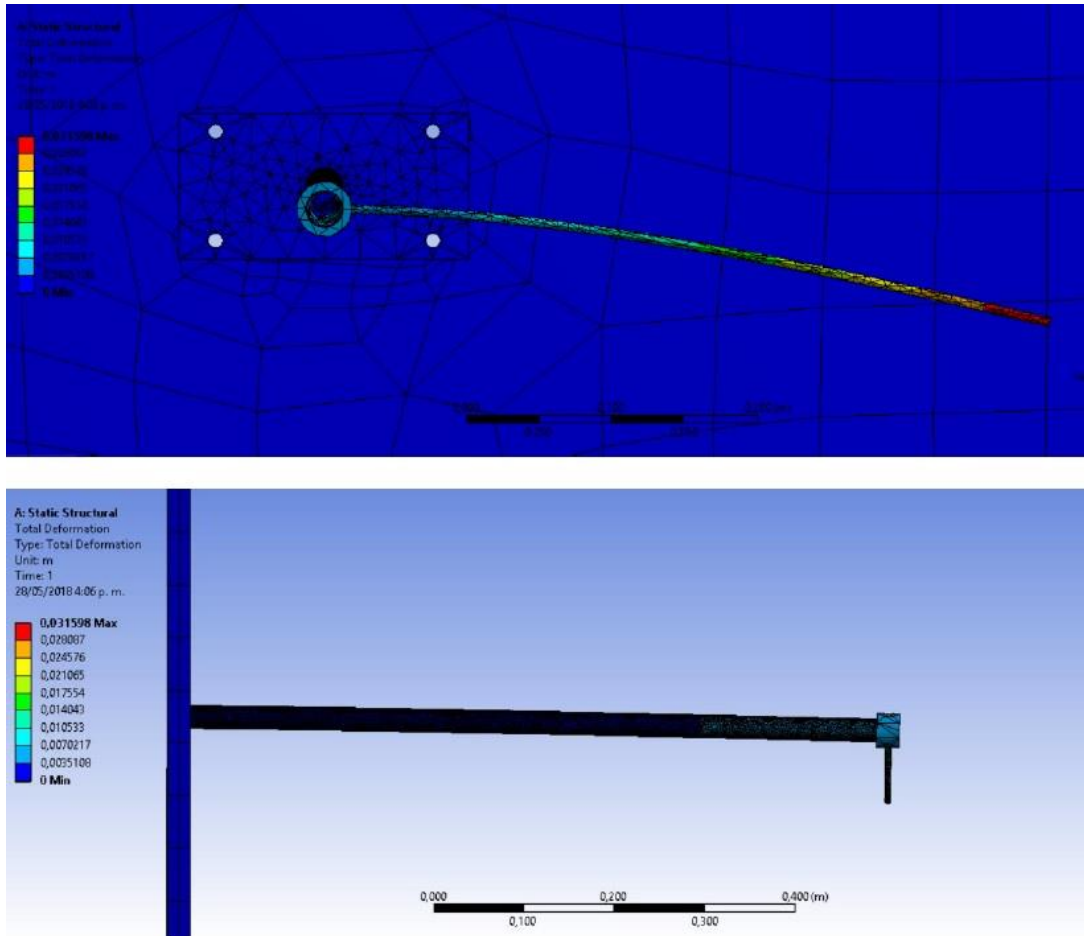
Figura 23. DCL de la probeta en el primer modelo propuesto



Fuente: Autores

La figura 23 permite observar que la probeta bajo el primer diseño propuesto estaría sometida a condiciones de esfuerzos originados por torsión, pero también por flexión, lo cual, por solicitud explícita de los requerimientos no debe estar presente; esta condición hace inviable esta propuesta para su implementación. Para corroborar lo anteriormente descrito se realizó un análisis a través del software ANSYS, y los resultados se reportan en la Figura 24.

Figura 24. Resultados de Deformación de análisis realizado en ANSYS

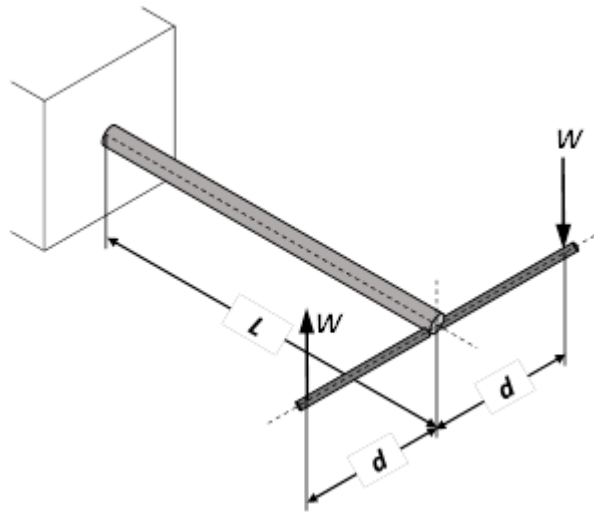


Fuente: Autores

La figura 24 muestra que efectivamente la probeta está soportando cargas de flexión si se utiliza el modelo inicial propuesto, y esto afecta la determinación del ángulo de rotación que se está presentando en el espécimen que se está analizando y por consiguiente los porcentajes de error en la determinación de este parámetro van a tener una mayor magnitud.

Debido a la inviabilidad de la primera propuesta, se plantea una segunda opción, la cual se puede observar en la figura 25

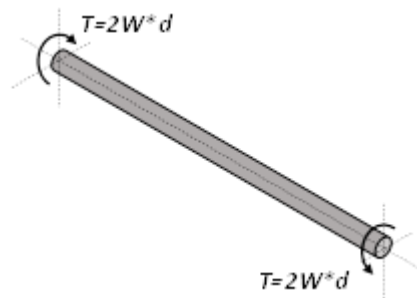
Figura 25. Esquema del segundo modelo propuesto



Fuente: Autores

Al igual que en la primera propuesta se procede a realizar un DCL de la probeta para determinar las cargas presentes sobre ésta, el cual se muestra en la figura 26

Figura 26. DCL de la probeta en el segundo modelo propuesto



Fuente: Autores

En la figura 26 se puede observar que la fuerza transversal que se presentaba en el primer modelo propuesto desaparece y por consiguiente el momento flector también; por consiguiente se puede afirmar que para esta segunda propuesta la

probeta está sometida solo a un momento torsor y por ende se está cumpliendo lo solicitado por el proponente del trabajo.

Es importante aclarar que el peso propio de la probeta y de las barras sobre las cuales se va a aplicar las fuerzas se están despreciando, por consiguiente cuando se realicen los ensayos es necesario tener presente que la deflexión originada por estas cargas existe y esto trae consigo una incertidumbre que afecta el porcentaje de error que resulte en las pruebas realizadas.

3.2.2. Magnitudes de carga que no sobrepasen los 49 N

Para garantizar esta condición y poder obtener resultado en los ensayos de magnitudes que puedan ser identificables con los sistemas de medición que se van a implementar en el equipo, se analizó los factores que afectan tanto el esfuerzo cortante como el ángulo de rotación de un elemento sometido a torsión.

Las ecuaciones que definen el esfuerzo cortante máximo y el ángulo de rotación de un elemento de sección circular son:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T * C}{J}$$

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

Se observa que tanto el esfuerzo como la deformación dependen directamente de la magnitud del momento torsor, razón por la cual es necesario implementar en el equipo la mayor longitud posible de las barras que se utilizan para aplicar la carga, ya que el momento es igual a la fuerza por la distancia perpendicular y aunque la

carga sea baja se puede alcanzar un mayor momento torsor mediante esta condición.

También se puede apreciar en las ecuaciones que ambos parámetros son inversamente proporcionales al momento polar de inercia (J), el cual depende de las dimensiones de la sección transversal; debido a lo anterior es conveniente utilizar secciones circulares tubulares, ya que con las mismas dimensiones externas tendrán momentos de inercia más bajos y por consiguiente el esfuerzo y la deformación se incrementan.

El esfuerzo cortante también tienen una relación directamente proporcional al valor de C , es decir a la distancia desde el eje central hasta el punto más lejano de la sección transversal, en el caso de una sección circular tubular este valor equivaldría al radio externo del tubo, sin embargo el valor de (J) también depende de esta variable y adicionalmente tiene mayor relevancia en la ecuación, razón por la cual este valor queda supeditado a su influencia dentro del momento polar de inercia.

El ángulo de giro es directamente proporcional a la longitud (L) de la probeta a ensayar, por consiguiente el equipo se debe diseñar de tal manera que permita maximizar esta variable; adicionalmente es inversamente proporcional al módulo de rigidez (G) de la probeta a ensayar, propiedad característica del material, por consiguiente está debe ser fabricada de un material con una magnitud más baja.

3.2.3. Cuantificación de la deformación unitaria al cortante y el ángulo de giro en puntos ubicados a diferentes longitudes de la probeta.

La deformación unitaria al cortante máxima se presenta sobre la superficie externa de la probeta a ensayar, para determinar este magnitud se deben implementar galgas extensiométricas, las cuales cuantifican la deformación que se presenta y la suministra a través de un cambio en su resistencia eléctrica, valor que se

detecta y se visualiza a través de un transductor y un sistema de adquisición de señales.

Para la cuantificación del ángulo de giro se utiliza una barra ubicada sobre la probeta, la cual puede ser desplazada sobre la misma con el fin de cuantificar su desplazamiento vertical hacia abajo cuando se aplica el momento torsor sobre la probeta. Este desplazamiento se cuantifica a través de un comparador de carátula y a través de la magnitud encontrada y mediante el uso de las funciones trigonométricas se puede determinar el valor de θ .

3.2.4. Materiales comercialmente disponibles.

Después de una búsqueda de información a nivel comercial en la ciudad de Bucaramanga se definió que los materiales más adecuados para la construcción del equipo pueden ser aluminio o acero de secciones circular maciza y tubular o barras tubulares de sección rectangular o cuadrada; ya que estos son los más fáciles de encontrar, presentan una alta gama de dimensiones y económicamente son los de menor costo.

3.2.5. Cambio de la probeta

Para garantizar esta condición se propone diseñar un sistema que permita separar fácilmente la probeta a ensayar de la estructura propia del equipo, para esto el sistema de tornillos, arandelas y tuerca será el más adecuado para la aplicación. Este sistema aunque fácilmente desmontable permite que este ensamble se comporte como un empotramiento y por consiguiente garantiza el equilibrio estático de la probeta.

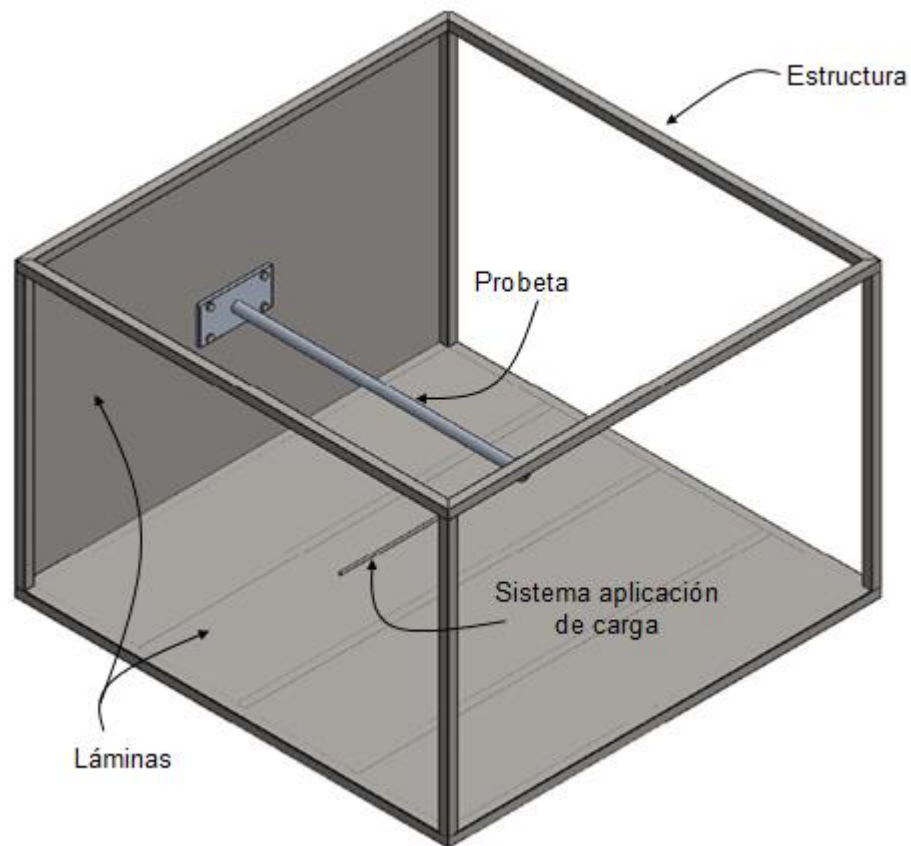
3.2.6. Acabado final del equipo debe ser de buena calidad

El acabado final de equipo será a través del uso de pinturas comerciales, las cuales serán depositas sobre laca anticorrosiva en los componentes que sean fabricados de acero al carbono, con el fin de incrementar la durabilidad del equipo; donde se utilice aluminio este será dejado tal cual como sea suministrado por el almacén, ya que como es sabido el fenómeno de pasivación propio de este material lo protege de la oxidación.

4. DISEÑO PRELIMINAR

Con base en las definiciones relacionadas en la etapa de diseño conceptual se propone un bosquejo inicial del equipo didáctico para la corroboración de las ecuaciones de esfuerzo y deformación de elementos sometidos a momentos de torsión, el cual se relaciona en la figura 27

Figura 27. Vista isométrica del bosquejo inicial del equipo didáctico.



Fuente: Autores

El sistema propuesto consta de los siguientes componentes.

- Estructura base: la cual será fabricada de un material de sección tubular cuadrada, la cual como su nombre lo indica, le dará soporte a todos los demás

elementos que componen el equipo; adicionalmente dos de las caras de esta estructura serán cubiertas con lámina, el suelo para facilitar el anclaje del comparador de carátula y una lateral que facilitara el soporte de la probeta que se va a ensayar

- Probeta a ensayar: elemento que será sometido a un momento torsor y sobre el cual se cuantificara el esfuerzo y la deformación que está soportando debido a dicha carga.
- Sistema de aplicación de Carga: está compuesto por un anillo que se ajusta a la probeta y una barra que permite la aplicación de una carga a una distancia específica, para generar el momento torsor sobre la probeta.
- Sistema Medición de ángulo de Giro: está compuesto de un anillo que se ajusta a la probeta y una barra que origina un desplazamiento vertical hacia abajo del comparador de carátula.

Para determinar el material adecuado para la fabricación de las probetas se analizó teóricamente los esfuerzos y las deformaciones que se presentan para diferentes materiales encontrados comercialmente. En la tabla 5 se relacionan los resultados encontrados para diferentes longitudes de probeta suponiendo un torque de $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ y módulo de rigidez de 79 GPa y 26 GPa para el acero y el aluminio respectivamente.

Tabla 5. Esfuerzo y deformaciones sobre los materiales encontrados comercialmente

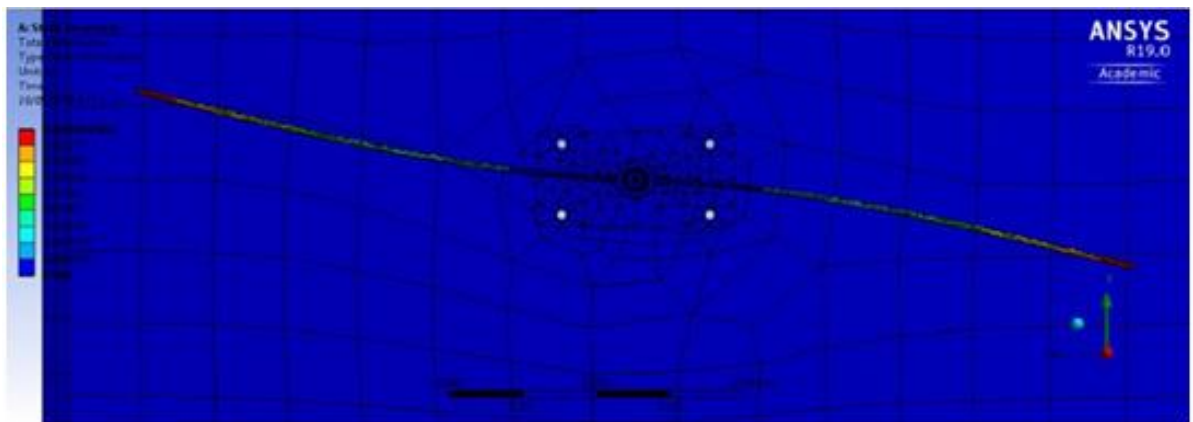
Material	Sección Transversal	Dimensiones Transversales (mm)		Longitud (mm)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	\emptyset (°)
		d_{ext}	t			
Acero	Tubular	19.05	1.2	400	17.7	0.54
				600		0.81
				800		1.08
			1.6	400	14.1	0.43
				600		0.65
				800		0.86
		25.4	1.2	400	9.48	0.22
				600		0.32
				800		0.43
			1.6	400	7.46	0.17
				600		0.26
				800		0.34
	38.1	1.2	400	4.02	0.06	
			600		0.09	
			800		0.12	
		1.6	400	3.11	0.05	
			600		0.07	
			800		0.09	
	Maciza	19.05	----	400	7.37	0.18
				600		0.28
				800		0.37
		25.4	----	400	3.11	0.08
				600		0.11
				800		0.15
38.1		----	400	0.92	0.04	
			600		0.05	
			800		0.07	
Aluminio	Tubular	19.05	1.2	400	17.7	1.64
				600		2.46
				800		3.27
			1.6	400	14.1	1.31
				600		1.96
				800		2.62
		25.4	1.2	400	9.48	0.66
				600		0.99
				800		1.32
			1.6	400	7.46	0.52
				600		0.78
				800		1.04
	38.1	1.2	400	4.02	0.19	
			600		0.28	
			800		0.37	
		1.6	400	3.11	0.14	
			600		0.22	
			800		0.29	
	Maciza	19.05	----	400	7.37	0.68
				600		1.02
				800		1.36
		25.4	----	400	3.11	0.22
				600		0.32
				800		0.43
38.1		----	400	0.92	0.04	
			600		0.06	
			800		0.09	

Fuente: Autores

La tabla 5 corrobora los análisis realizados en la etapa de diseño conceptual, por lo cual y con base en las especificaciones requeridas por el solicitante del banco se decide fabricar la probeta en Aluminio de sección transversal tubular de diámetro exterior 25.4 mm, espesor 1.2 mm y longitud 800 mm; la decisión se basa en que a pesar que con un diámetro exterior de 19.05 mm y espesores de 1.2 y 1.6 mm se obtienen deformaciones mayores se considera un grado de dificultad más alto para la construcción y el ensamble del sistema de aplicación de las cargas sobre la misma. Adicionalmente esta tabla descarta el uso de acero y secciones transversales macizas para la fabricación de la probeta, ya que los esfuerzos y las deformaciones son de una magnitud mucho más baja, lo cual dificulta su cuantificación a través del sistema de medición que se implemente.

Para corroborar que efectivamente el sistema propuesto no origina flexión sobre la probeta se realizó un análisis a través de elementos finitos, mediante el software ANSYS, los resultados reportados en la figura 28

Figura 28. Resultados de Deformación de análisis realizado en ANSYS



Fuente: Autores

Continuación Figura 28. Resultados de Deformación de análisis realizado en ANSYS

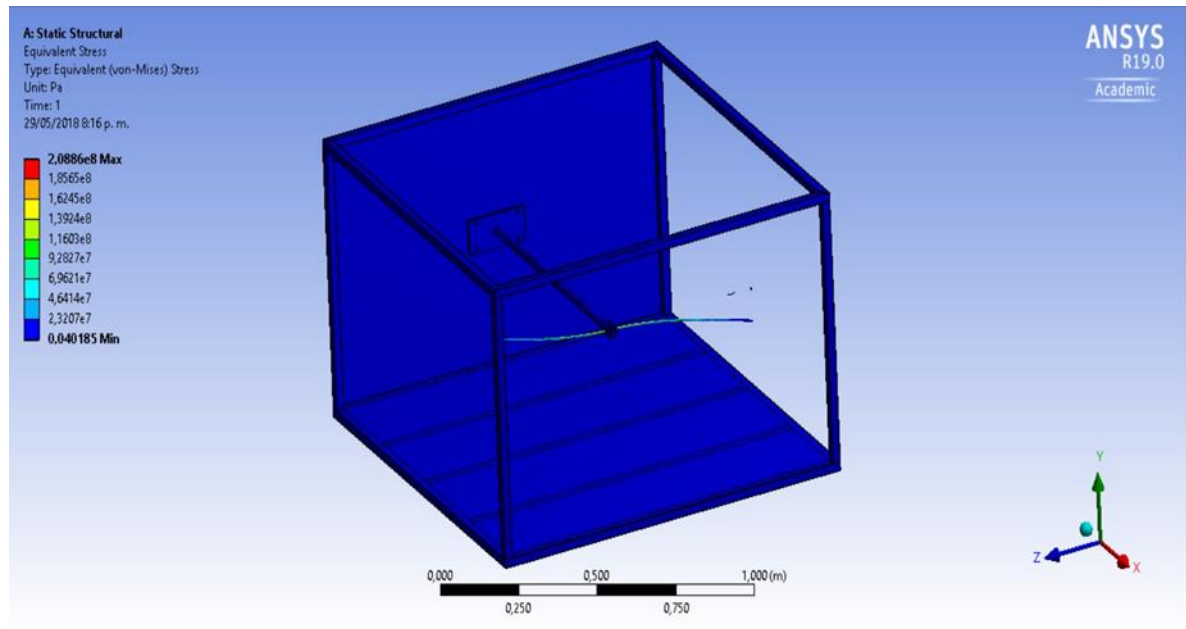


Fuente Autores

La figura 28 muestra que la probeta conserva su línea horizontal, lo cual comprueba que no hay flexión sobre la probeta; adicionalmente muestra una gran deformación sobre el sistema de aplicación de la carga, por lo cual se requiere el uso de una sección maciza de un material de alto módulo de elasticidad para disminuir al máximo esta magnitud. Es importante aclarar que así la barra de aplicación de la carga se deforme esto realmente no afecta los análisis que se pretenden realizar con el equipo de laboratorio, ya que su función es originar el momento torsor sobre la probeta y esto se está cumpliendo de una manera efectiva.

Los análisis de la estructura también se realizan a través del software de elementos finitos ANSYS, ya que permite de una manera sencilla cuantificar los esfuerzos y las deformaciones que se presentan debido a las cargas aplicadas sobre la probeta. Los resultados obtenidos de una simulación realizada con una fuerza de 9.8 N en cada uno de los extremos de la barra de aplicación de la carga se relacionan en la figura 29

Figura 29. Resultados de Esfuerzos realizado en ANSYS

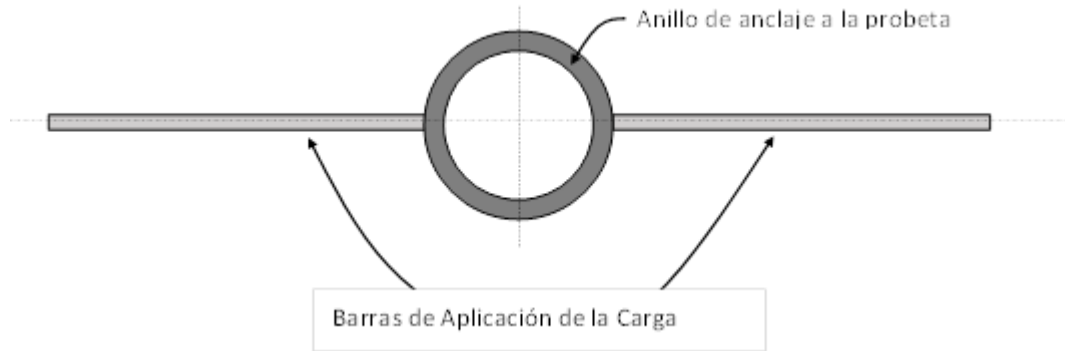


Fuente: Autores

La figura 29 muestra que para un peso de 9.8 N, ubicado en cada uno de los extremos de la barra de aplicación de la fuerza, el sistema presenta un esfuerzo máximo sobre dicho elemento con una magnitud de 208 MPa; sobre la estructura el esfuerzo es mucho menor alcanzando un valor promedio de 23 MPa.

El sistema de aplicación de la carga se fabricará de acero de sección transversal maciza para que sus esfuerzos y deformaciones no afecten la integridad estructural del elemento y las variables que se van a cuantificar en los ensayos; su configuración se relaciona en la figura 30

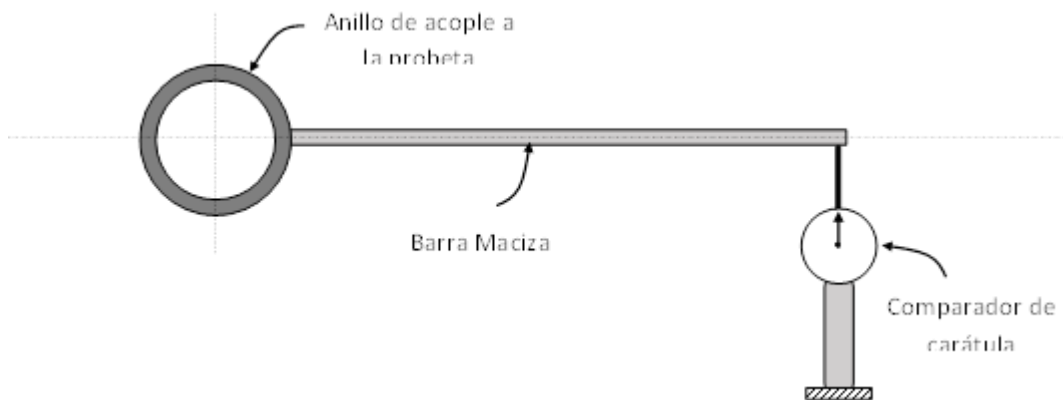
Figura 30. Esquema del sistema de aplicación de la carga sobre la probeta



Fuente: Autores

El sistema que se utiliza para cuantificar el ángulo de giro que está soportando la probeta consta de un anillo acoplado a esta y unido rígidamente a una barra circular maciza que amplía el desplazamiento vertical originado por la deformación que se está presentando en el espécimen; este dato es cuantificado a través de un comparador de carátula ubicado en el extremo de la barra, tal como se aprecia en la figura 31.

Figura 31. Esquema del sistema para la medición del desplazamiento vertical originado por el ángulo de rotación



Fuente: Autores

5. DISEÑO DETALLADO

Con base en la información suministrada en el diseño preliminar se procede a cuantificar de una manera exacta cada una de las dimensiones, sistemas de unión y proceso de ensamble de cada uno de los componentes que conforman el equipo. Los planos detallados obtenidos del equipo se relacionan en el Anexo 1.

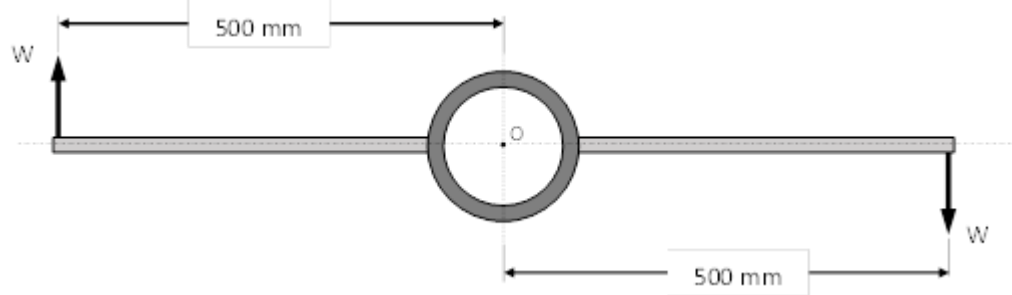
5.1. Probeta

De la tabla 5 se observa que la mejor opción para la construcción de este componente es una sección tubular de aluminio con diámetro exterior 25.4 mm, un espesor de 1.2 mm y una longitud de 800 mm; estas condiciones facilitan la construcción de los componentes que se acoplan a la probeta y permiten adherir de una mejor manera las galas extensiométricas sobre la superficie externa del tubo.

5.2. Sistema de Aplicación de la carga

El sistema consta de un anillo circular de acero AISI 1020 cuya resistencia a la fluencia es de 296 MPa, su diámetro interior es de 25.4 mm para que se ajuste de una manera exacta a la superficie externa de la probeta a ensayar, su diámetro exterior es de 38.1 mm y el ancho del mismo es de 25 mm; y una barra redonda de acero AISI 1020, con una sección transversal de 6.4 mm de diámetro y un la longitud tal que cada uno de los pesos que se aplique a la probeta esté ubicado a una distancia de 500 mm desde su centro; tal como se observa en la figura 32

Figura 32. Configuración final del sistema de aplicación de carga a la probeta de ensayo

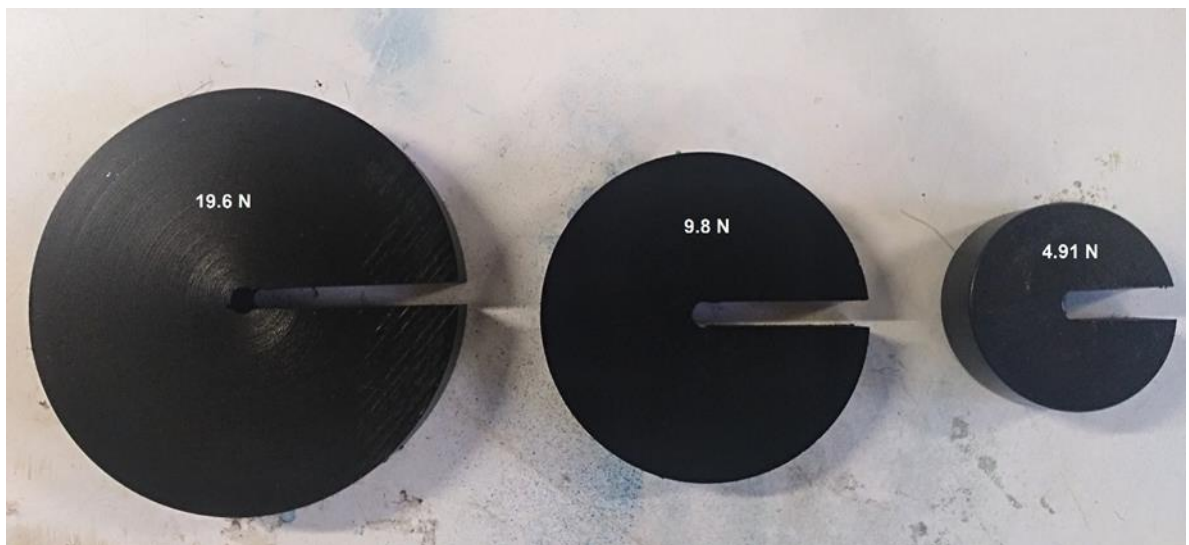


Fuente: Autores

Con base en las dimensiones mostradas en la figura 32 y las cargas que se van a aplicar sobre el sistema cuyas magnitudes son 4.91 N, 9.8 N y 19.6 N y que tienen la forma que se muestra en la figura 33, se puede cuantificar los momentos torsores que se le pueden aplicar a la probeta a través de una sumatoria de momento con respecto al punto O, que es el eje centroidal del espécimen.

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow -0.5 * W - 0.5 * W + T = 0 \Rightarrow T = W [N * m]$$

Figura 33. Pesos utilizados para generar el momento torsor sobre la probeta



Fuente: Autores

Los resultados de las magnitudes de los momentos de torsión que se pueden originar sobre la probeta con base en la sumatoria de momentos realizada y los pesos disponibles se relacionan en la tabla 6.

Tabla 6. Magnitud de los momentos de torsión que se pueden aplicar sobre la probeta a ensayar

Peso [N]	Momento Torsor [N*m]
4.9	4.9
9.8	9.8
14.7	14.7
19.6	19.6
24.6	24.6
29.5	29.5
34.3	34.3

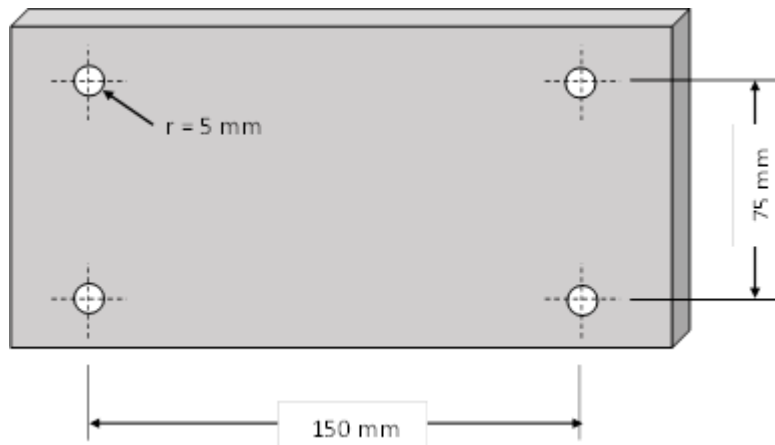
Fuente: Autores

5.3. Placa de ensamble de la probeta a la estructura

Para permitir el ensamble de la probeta a la estructura del equipo se decidió utilizar un sistema de tornillos y tuercas, por lo cual se suelda en uno de sus extremos una placa rectangular de aluminio (para evitar la corrosión galvánica originada por el contacto entre diferentes materiales) con cuatro agujeros y sobre la lámina soldada a la estructura se realiza la misma cantidad de agujeros y en la misma posición para permitir el paso de los tornillos y su posterior apriete; este sistema debe estar alineado con el fin de garantizar la horizontalidad de la probeta y evitar posibles fuentes de error en la medición del ángulo de rotación de la misma.

Las dimensiones de la placa de aluminio son 200 X 100 X 10 mm; los agujeros tienen un diámetro de 10 mm y se encuentran ubicados en la posición mostrada en la figura 34

Figura 34. Ubicación de los agujeros en la placa de aluminio soldada a la probeta



Fuente: Autores

Para garantizar que los pernos no fallen por cortante se realiza un cálculo del esfuerzo cortante que están soportando, para lo cual se tomó como referencia el momento torsor máximo que puede ser aplicado sobre el sistema y que se relaciona en la tabla 6, cuya magnitud es de $34.3 \text{ N}\cdot\text{m}$

A través del teorema de Pitágoras se determina la distancia desde el centro de la probeta hasta el centro de cada uno de los tornillos, parámetro que tiene una magnitud de 83.85 mm ; como son 4 tornillo la fuerza que le corresponde soportar a cada uno de ellos es la necesaria para contrarrestar el momento torsor transmitido por la probeta a la estructura, es decir:

$$T = 4F_t * 0.08385 \Rightarrow F_t = \frac{34.3 \text{ N} * \text{m}}{4 * 0.08385 \text{ m}} \Rightarrow F_t = 102.27 \text{ N}$$

Con la fuerza que soporta cada tornillo y sabiendo que están sometidos a esfuerzo cortante originado por carga transversal, se determina la magnitud de este parámetro a través de la ecuación

$$\tau = \frac{F_t}{A_t} = \frac{102.27N}{\pi * (0.005)^2} \Rightarrow \tau = 1.3 MPa$$

Esta magnitud de esfuerzo con respecto a un valor permisible para un acero de baja resistencia, es decir un AISI 1020, que equivale a cerca de 80 MPa permite obtener un factor de seguridad superior a 60, magnitud que está muy por encima de los valores recomendados para aplicaciones industriales; sin embargo por facilidad de compra y como su costo es bajo se optó por la magnitud de 10 mm de diámetro como la adecuada para los tornillos.

5.4. Sistema para la medición del desplazamiento vertical originado por el momento torsor.

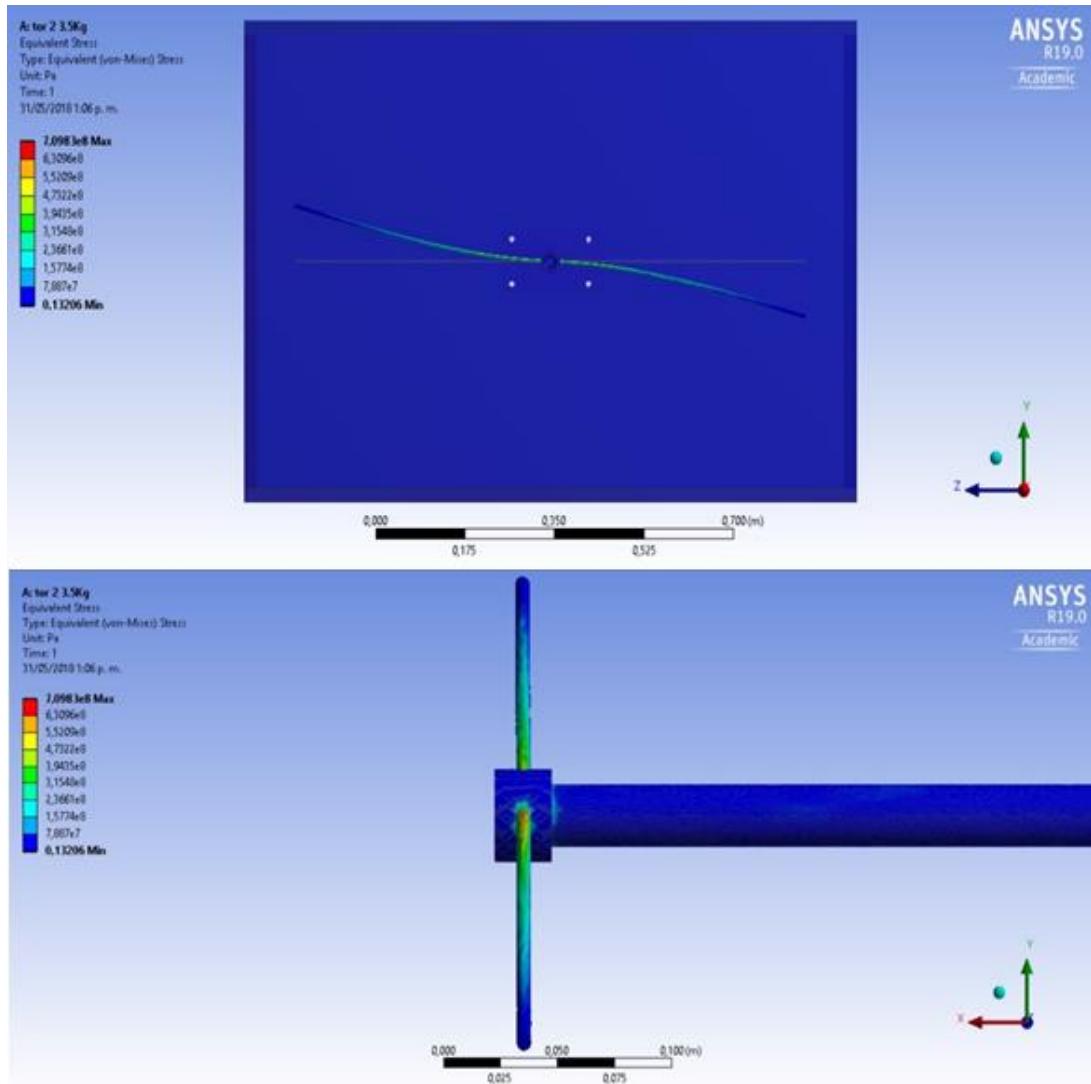
Este sistema consta de un anillo circular fabricado de acero de baja resistencia al carbono (AISI 1020) por facilidad de construcción y bajos costos, el cual se acopla a la probeta a través de un perno de apriete; y una barra circular maciza del mismo material, el cual tiene una longitud que garantiza que la distancia desde el centro de la probeta hasta la ubicación del comparador de carátula sea de 500 mm. Esta distancia se determina en función de la longitud definida para las barras de aplicación de la carga, con el fin de evitar dimensiones del equipo muy altas.

5.5. Estructura

La estructura es la encargada de dar soporte a todos los elementos que componen el equipo; su análisis de esfuerzos se realiza a través del software ANSYS, para lo cual se definió unas dimensiones exteriores de 1.2 X 1.2 X 0.8 m,

que permiten contener todos los componentes del equipo, el material utilizado es acero AISI 1020 con una sección tubular cuadrada de 25.4 mm de lado y 1.6 mm de espesor, y una carga de 34.3 N en cada uno de los extremos de la barra de aplicación de los pesos, los resultados del análisis se observan en la figura 35.

Figura 35. Resultados análisis de esfuerzos a través del software ANSYS



Fuente: Autores

En la figura 35 se observa que el esfuerzo máximo sobre la estructura base es de 78.9 MPa, valor que se encuentra por debajo de la resistencia a la fluencia del acero AISI 1020 que corresponde a 207 Mpa, y que arroja como resultado un factor de seguridad de 2.62, el cual se considera adecuado para la aplicación. Adicionalmente también se observa que el esfuerzo máximo se presenta en la unión entre la barra de aplicación de la carga y el anillo de acople a la probeta, esto debido al concentrador de esfuerzo presente en esta zona y tiene una magnitud de 709 Mpa, lo cual no puede ser soportado por el sistema y es por esto que se incrementa el radio de la discontinuidad para disminuir este valor.

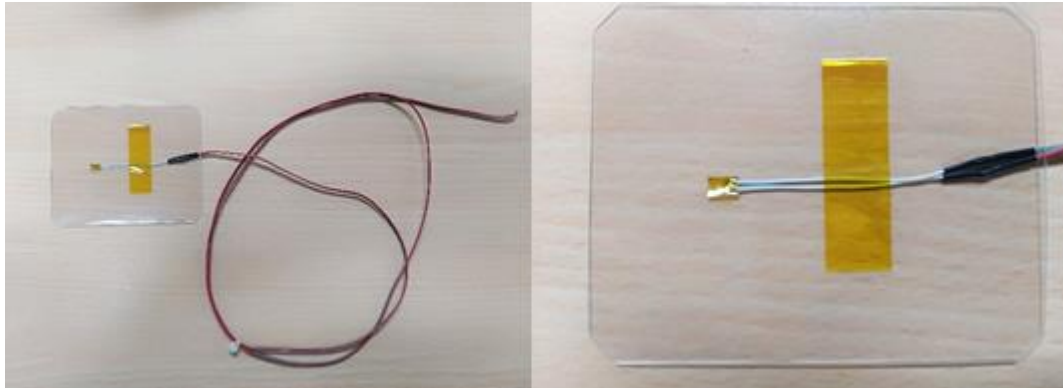
5.6. Sistema de medición de esfuerzos cortantes

Para determinar el esfuerzo cortante que está soportando la probeta se implementa el uso de galgas extensiométricas adheridas a ella y a través de un puente de Wheatstone se cuantifica el cambio en la magnitud de la resistencia originado por la deformación presente en las mismas a razón del momento torsor aplicado. Esta señal es leída mediante de un transductor que entrega una señal de voltaje, la cual a través de las ecuaciones que caracterizan el puente implementado permiten cuantificar la deformación que se está presentando en la galga.

Por facilidad de implementación se definió la utilización de galgas y transductores de la marca OMEGA Engineering, ya que en la institución se cuenta con equipos de esta casa matriz y ante requerimientos adicionales estos pueden ser utilizados. La galgas extensiométricas seleccionadas son las siguientes:

- KFH-1.5-120-C1-11L1M2R: Es un indicador de esfuerzo lineal, con una rejilla de 1.5 mm, utilizadas para el análisis de esfuerzos y propósitos generales, con una resistencia interna de 120 ohmios y 1 metro de longitud de cable. La configuración geométrica de esta galga se muestra en la figura 36

Figura 36. Galgas extensiométricas KFH-1.5-120-C1-11L1M2R



Fuente: Autores

Las especificaciones de esta clase de galgas extensiométricas se relacionan en la figura 37

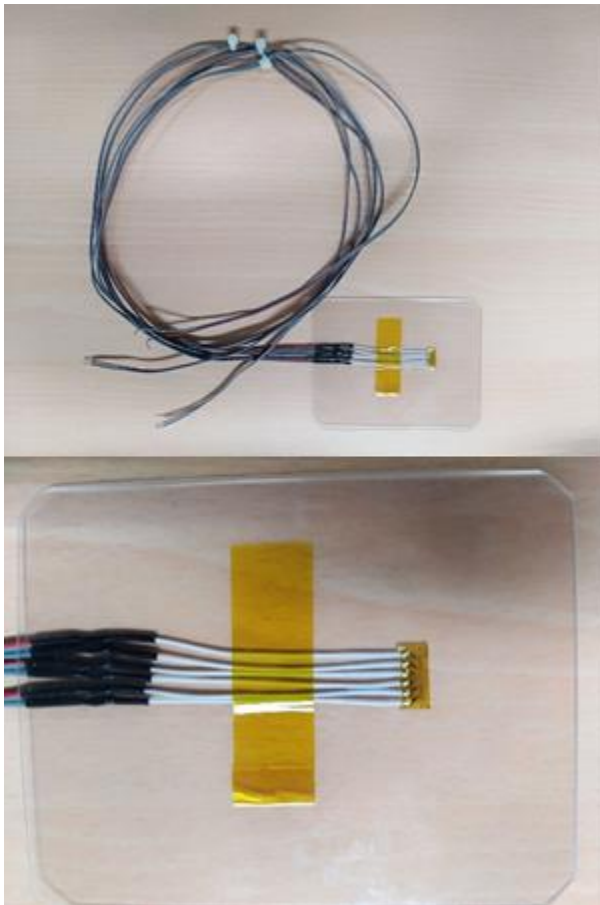
Figura 37 Especificaciones de Galgas KFH-1.5-120-C1-11L1M2R



Fuente: Autores

- KFH-06-120-D17-11L1M2S: Es una roseta de deformación es un arreglo de tres galgas extensiométricas ($0^\circ/45^\circ/90^\circ$) utilizado para medir el estado de deformaciones de un material en el plano, lo cual implica medir la deformación unitaria normal en x (ϵ_x), la deformación unitaria normal en y (ϵ_y) y la deformación unitaria cortante en el plano (γ_{xy}). Tiene una rejilla de 0.6 mm, con una resistencia interna de 120 ohmios y 1 metro de longitud de cable. La configuración geométrica de esta galga se muestra en la figura 38

Figura 38. Galgas extensiométricas KFH-06-120-D17-11L1M2S



Fuente: Autores

Esta roseta, la cual se dice que es rectangular porque sus galgas están arregladas con una diferencia de 45° entre sí, por lo que una galga se encuentra en posición horizontal, una en posición vertical y otra a un ángulo de 45°.

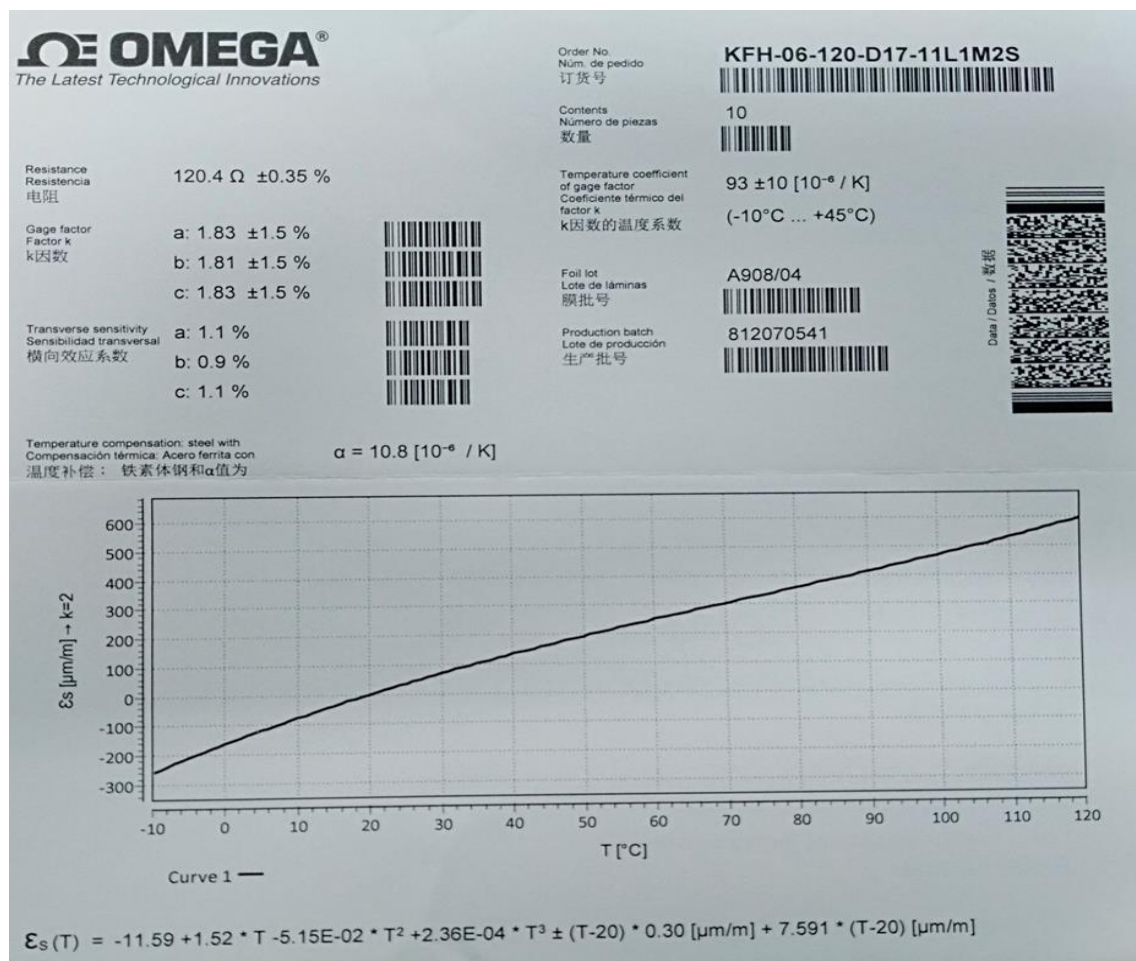
Con este arreglo de galgas, las deformaciones que se obtienen son las siguientes:

$$\epsilon_x, \epsilon_y$$

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x + \epsilon_y)$$

Las especificaciones de esta clase de galgas extensiométricas se relacionan en la figura 39

Figura 39. Especificaciones de Galgas KFH-06-120-D17-11L1M2S



Fuente Autores

El puente de Wheatstone para la obtención de la deformación a través de la galga KFH-1.5-120-C1-11L1M2R será un montaje de $\frac{1}{4}$ de puente, ya que de las 4 resistencias que lo conforman solo una es variable; cuando el sensor no está sometido a ninguna acción externa su resistencia coincide con las demás del puente, de modo que el puente está equilibrado. Si la galga sufre una variación en su resistencia ΔR , la deformación para un $\frac{1}{4}$ de puente es:

$$\epsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R}$$

Donde K, es el factor de galga y tiene una magnitud de $1.93 \pm 1.5\%$, y R es la resistencia y tiene un valor de $120.4 \Omega \pm 0.35\%$.

Si el transductor entrega la señal en voltaje la ecuación de la deformación se puede expresar en términos de este parámetro de la siguiente manera

$$\epsilon = \frac{4 * V_{vd}}{K * V_a}$$

Donde V_a es el voltaje de alimentación del equipo y tiene un valor de 10 V y V_{vd} es el voltaje obtenido de la lectura de la galga.

El puente de Wheatstone para la obtención de la deformación a través de la galga KFH-06-120-D17-11L1M2S será un montaje de $\frac{1}{4}$ puente. El factor de galga para este sensor tiene una magnitud de $1.83 \pm 1.5\%$, y una resistencia de $120.4 \Omega \pm 0.35\%$.

La deformación para un $\frac{1}{4}$ puente en función de voltajes es

$$\epsilon = \frac{4 * V_{vd}}{K * V_a}$$

Donde V_a es el voltaje de alimentación del equipo y tiene un valor de 10 V y V_{vd} es el voltaje obtenido de la lectura de la galga.

El indicador utilizado para la lectura de las galgas es el DP-41B, el cual posee una precisión de hasta $\pm 0.005\%$ de lectura y hasta 142 lecturas por segundo; es extremadamente versátil y transmite una gran variedad de rangos de tensión y corriente CC, 9 tipos de termopares, múltiples RTD y señales desde los transductores del calibrados de tensión como celdas de carga y transductores de presión, así como entradas potenciométricas.

6. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

Con base en la información obtenida del proceso de diseño se dio inicio al proceso de fabricación del equipo, para lo cual se utilizó las instalaciones del laboratorio de procesos mecánicos de la Universidad Pontificia Bolivariana. El primer paso consistió en la construcción de la estructura base del equipo, para lo cual se adquirió el material en el centro de Bucaramanga, se procedió a su corte y ensamble a través de un proceso de soldadura con arco eléctrico. Las láminas utilizadas para cubrir el piso y la lateral donde se coloca la probeta también fueron ensambladas durante este primer paso a través de un proceso de soldadura. El resultado de esta etapa se puede observar en la figura 40

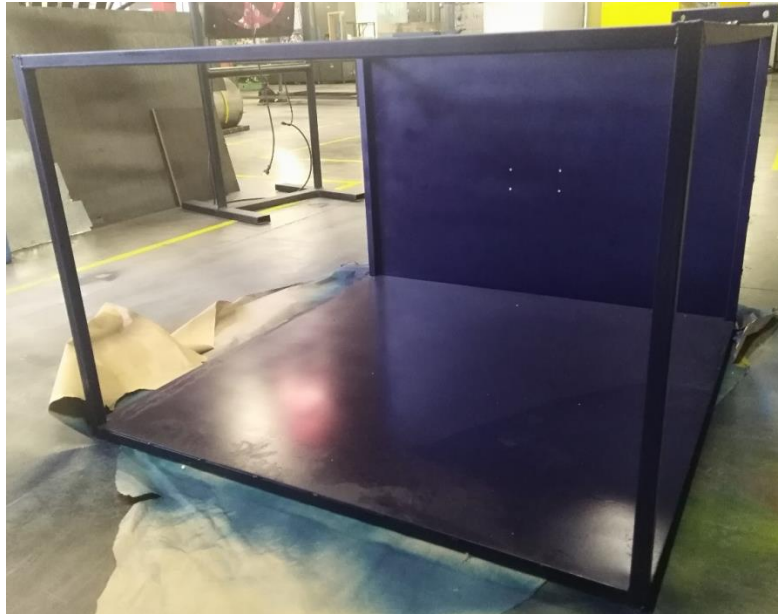
Figura 40. Ensamble de la estructura y las láminas de cobertura



Fuente: Autores

Para cumplir con la especificación dada por el solicitante del equipo con respecto a la durabilidad del sistema se procedió a realizar la pintura de la estructura con una placa base que lo protege de la oxidación y una laca externa azul que le da un mejor acabado superficial, tal como se observa en la figura 41

Figura 41. Resultado final del proceso de protección y pintura de la estructura



Fuente: Autores

La segunda etapa de la construcción consistió en la fabricación de la probeta y el sistema de anclaje a la estructura; los dos elementos fueron fabricados en aluminio, la probeta fue cortada de un tubo estándar comprado en una ferretería de la ciudad, la placa se maquinó a través de un proceso de fresado y los agujeros se realizaron por medio de un taladro vertical. La probeta se unió a la placa de ensamble a través de un proceso de soldadura oxiacetilénica. El resultado obtenido de esta etapa se observa en la figura 42

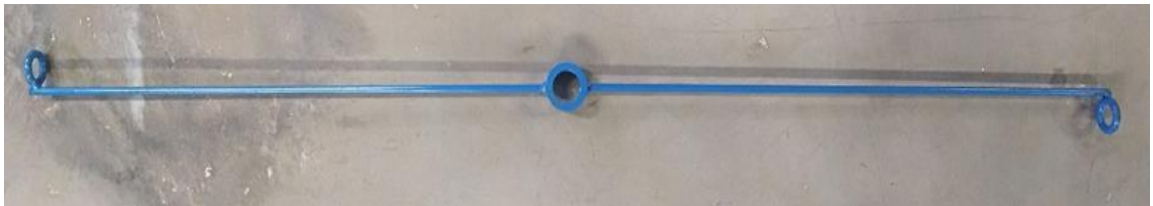
Figura 42. Resultado final de la fabricación de la probeta y placa de ensamble.



Fuente: Autores

El tercer paso consistió en la fabricación del sistema de aplicación de carga para lo que se adquirió una barra de acero la cual fue maquinada a través de un proceso de torneado para alcanzar las dimensiones y la configuración geométrica requerida; adicionalmente se taladro un agujero pasante que permitiera ajustar el sistema a la probeta. A este anillo circular se soldó a través de un proceso con arco eléctrico una barra de sección transversal circular a cada uno de sus lados para poder aplicar en sus extremos la carga que se aplicará a la probeta. Finalmente se realizó un proceso de pintura para alcanzar el acabado superficial deseado, resultado que se observa en la figura 43

Figura 43. Resultado final de la fabricación del sistema de aplicación de carga



Fuente: Autores

En el cuarto paso se procedió a la fabricación del sistema de medición del desplazamiento vertical, el proceso fue exactamente igual al realizado en el paso anterior, la única diferencia es que este sistema solo tiene una barra soldada al anillo circular de acople a la probeta y no cuenta con las argollas en los extremos para la sujeción de los pesos aplicados en el ensayo. El resultado final se observa en la figura 44

Figura 44. Resultado final de la fabricación del sistema de medición de desplazamiento vertical



Fuente: Autores

Como quinta etapa se procedió a la construcción de los pesos y porta pesos requeridos para las pruebas; los pesos se fabricaron de acero a través de un proceso de maquinado que constó de dos pasos, el primero un fresado para la realización de las ranuras para apoyarlos en el porta pesos y el segundo un maquinado para alcanzar las dimensiones que den los pesos definidos para los ensayos. Los portapesos se fabricaron de aluminio a través de un proceso de corte y ensamble mecánico. Los resultados obtenidos de estos componentes se observan en la figura 45

Figura 45. Pesos y porta pesos fabricados



Fuente: Autores

Por último se procedió a la fabricación del sistema de medición de deformaciones, Se adquirió en un centro comercial de la ciudad trimmer de 500 ohmios, baquetas universales, cable 20 AWG y cajas plásticas para proteger el puente de Wheatstone; posteriormente se realizaron los primeros montajes del sistema mediante la utilización de un protoboard con el fin de observar su comportamiento, tal como se observa en la figura 46

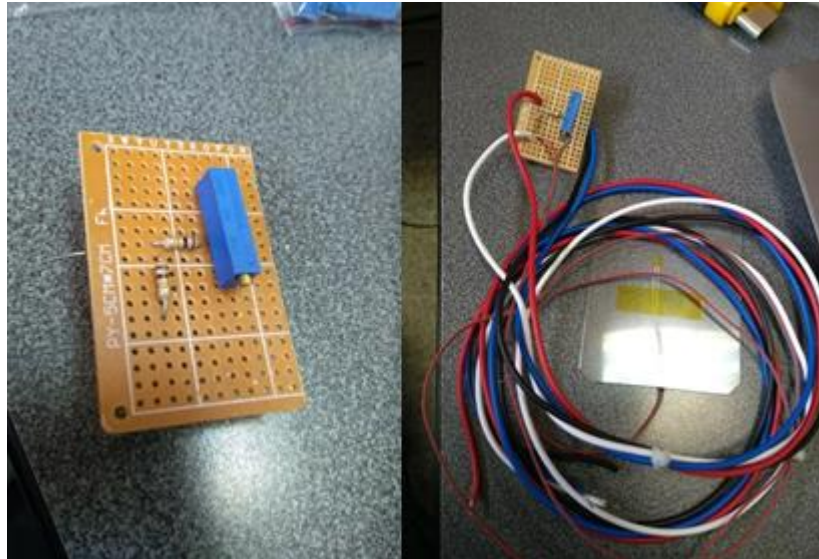
Figura 46. Montaje inicial del sistema de medición de deformaciones en un protoboard



Fuente: Autores

Después de verificar el correcto funcionamiento del sistema se procede a reproducir sobre las baquetas el montaje realizado en el protoboard, como se observa en la figura 47

Figura 47. Montaje del sistema de medición sobre las baquetas



Fuente: Autores

Y por último se adapta este montaje al indicador DP-41B

El ensamble de todo el sistema construido se relaciona en la figuras 48 y 49

Figura 48. Montaje final del sistema de medición de esfuerzos y deformaciones sobre probetas sometidas a momentos torsores.



Fuente: Autores

Figura 49. Montaje final del sistema de medición de esfuerzos y deformaciones sobre probetas sometidas a momentos torsores.



Fuente: Autores

7. METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE ESFUERZOS CORTANTES Y ANGULOS DE GIRO EN PROBETAS SOMETIDAS A TORSION

Los datos obtenidos a través de los sistemas implementados en el equipo construidos son las deformaciones unitarias a través de las galgas extensiométricas y el desplazamiento vertical a través del comparador de carátula; con esta información es posible determinar el esfuerzo cortante y el ángulo de giro presente en la probeta que se está ensayando a través de los procedimientos descritos a continuación:

7.1. ESFUERZO CORTANTE

El procedimiento requerido para cuantificar el esfuerzo cortante varía si se utiliza la galga KFH-1.5-120-C1-11L1M2R o la galga KFH-06-120-D17-11L1M2S; para el primer tipo se debe realizar los siguientes pasos:

- Determinar la lectura suministrada por la galga a través del indicador, los cual representa el voltaje originado por la deformación de la galga que es exactamente igual a la deformación de la probeta.
- Con el resultado de la lectura y la ecuación de $\frac{1}{4}$ de puente de Wheatstone se obtiene la deformación circunferencial en unidades de longitud
- Con la distancia existente entre el empotramiento de la probeta y el punto de adhesión de la galga, la deformación circunferencial calculada en el paso anterior y la función trigonométrica tangente se puede obtener el ángulo que se forma debido a la deformación en grados.
- El ángulo de deformación se expresa en radianes y este representa la deformación unitaria al cortante originada por las cargas aplicadas.
- El esfuerzo cortante se obtiene de la ley de Hooke, que indica que este parámetro es igual a la deformación unitaria al cortante multiplicado por el módulo de rigidez del material.

Par las galgas KFH-06-120-D17-11L1M2S el procedimiento es el siguiente:

- Determinar la lectura suministrada por la galga a través del indicador, los cual representa el voltaje originado por la diferencia de deformación entre el sensor ubicado en el eje x y el sensor ubicado a 45°
- Con el resultado de la lectura y la ecuación de $\frac{1}{2}$ de puente de Wheatstone se obtiene la diferencia de deformación en unidades de longitud
- Con la ecuación para una roseta rectangular se obtiene la deformación unitaria al cortante originada por las cargas aplicadas
- El esfuerzo cortante se obtiene de la ley de Hooke, que indica que este parámetro es igual a la deformación unitaria al cortante multiplicado por el módulo de rigidez del material.

7.2. ANGULO DE GIRO

El ángulo de giro se obtiene a partir de los datos arrojados por el comparador de carátula a través del siguiente procedimiento:

- La lectura del comparador representa la distancia vertical que se mueve la barra utilizada para medir este parámetro
- Mediante la distancia que hay entre el centro de la probeta y la posición del comparador, la distancia vertical originada por la carga aplicada y la función trigonométrica tangente se puede determinar el ángulo que forma este triángulo que por aproximación puede ser considerado rectángulo. Esta magnitud representa el ángulo de giro de la probeta expresado en grados.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las condiciones de los ensayos realizados en el equipo con el fin de determinar el esfuerzo cortante y el ángulo de giro que originaban las cargas aplicadas se relacionan en la tabla 7

Tabla 7. Condiciones de los ensayos realizados

Ensayo	Peso Aplicado (N)	Torque Aplicado (N*m)	Longitud (m)
1	9.8	9.8	0.2
			0.4
			0.6
2	14.7	14.7	0.2
			0.4
			0.6
3	19.6	19.6	0.2
			0.4
			0.6

Fuente: Autores

Para cada ensayo se cuantificó la información entregada por las dos galgas extensiométricas a través del indicador (Galga 1: KFH-1.5-120-C1-11L1M2R y Galga 2: KFH-06-120-D17-11L1M2S) y el desplazamiento vertical en cada una de las tres longitudes definidas de la probeta. Para cada condición de ensayo se cuantifico tres veces el valor y los resultados obtenidos se reportan en el Anexo 2. Los datos promedios para la realización del cálculo del esfuerzo cortante y el ángulo de giro para cada condición se relacionan en la tabla 8

Tabla 8. Resultados promedio de los ensayos realizados

Ensayo	Longitud (mm)	Lectura Galga 1 (mV)	Lectura Galga 2 (mV)	Desplazamiento Vertical (mm)
1	200	0.009	0.426	2.27
	400			5.45
	600			7.4
2	200	0.04	0.64	3.39
	400			8.55
	600			10.92
3	200	0.024	0.85	5.33
	400			10.40
	600			15.74

Fuente: Autores

Con base en la información relacionada en la tabla 8 se cuantifican los valores experimentales del esfuerzo cortante a través de la metodología plasmada en el capítulo 5 de este documento; un ejemplo de este procedimiento se relaciona a continuación:

Ensayo 1

Lectura galga 1: 0.009 V

Deformación Circunferencial:

$$\epsilon_{\theta} = \frac{4 * V_{vd}}{K * V_a} = \frac{4 * 0.009}{1.93 * 10} = 1.865 * 10^{-3}$$

Ángulo de Deformación:

$$\tan \gamma = \frac{\epsilon_{\theta} * L_{galga}}{distancia} = \frac{1.865 * 10^{-3} * 1.5 \text{ mm}}{723 \text{ mm}} = 3.869 * 10^{-6}$$

$$\gamma = 2.217 * 10^{-4}$$

Deformación Unitaria cortante:

$$\gamma = 3.87 * 10^{-6} \text{ rad}$$

Esfuerzo Cortante:

$$\tau = G * \gamma = 28 * 10^9 * 3.87 * 10^{-6} = 0.11 \text{ MPa}$$

Lectura galga 2: 0.426 V

Deformación Unitaria:

$$\epsilon = \frac{4 * V_{vd}}{K * V_a} = \frac{4 * 0.426 * 10^{-3}}{1.83 * 10} = 9.31 * 10^{-5}$$

Deformación Unitaria cortante

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x + \epsilon_y) = 2\epsilon = 2 * 9.31 * 10^{-5} = 1.863 * 10^{-4}$$

Esfuerzo Cortante: Para los aluminios el módulo de rigidez varía de 26 a 29 GPa, por consiguiente para la realización de los cálculos se definió como magnitud de esta propiedad 28 Gpa

$$\tau = G * \gamma = 28 * 10^9 * 1.863 * 10^{-4} = 5.22 \text{ MPa}$$

Los valores teóricos del esfuerzo cortante se obtienen de la siguiente manera:

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

Donde T es la magnitud del momento torsor, en el ensayo 1 está magnitud vale 9.8 N*m; C es la distancia más lejana al eje centroidal de la probeta, es decir, el radio externo del tubo (0.0128 m) y J es el momento polar de inercia y equivale a:

$$J = \frac{\pi}{2}(r_{ext}^4 - r_{int}^4) = \frac{\pi}{2}(0.0128^4 - 0.0115^4) = 1.47 * 10^{-8} m^4$$

Reemplazando en la ecuación del esfuerzo cortante se tiene:

$$\tau = \frac{T * C}{J} = \frac{9.8 * 0.0128}{1.47 * 10^{-8}} = 8.53 MPa$$

En la tabla 9 se reportan los valores de esfuerzos cortantes obtenidos experimentalmente, los datos teóricos calculados y los porcentajes de error para cada una de las dos galgas utilizadas.

Tabla 9. Comparación resultados teóricos y Experimentales de los esfuerzos cortantes obtenidos con el equipo

Ensayo	Esfuerzo Cortante Experimental (MPa)		Esfuerzo Cortante Teórico (MPa)	Porcentaje de error (%)	
	Galga 1	Galga 2		Galga 1	Galga 2
1	0.11	5.22	8.53	98.7	38.8
2	0.48	7.83	12.8	98.7	39.1
3	0.29	10.4	17.1	98.3	39.2

Fuente: Autores

La tabla 9 permite observar que la galga 1 arroja errores entre el 98.3 y 98.7%, lo cual indica que esta metodología no es aceptable para el cálculo del esfuerzo cortante presente en la probeta; estos resultados se pueden originar debido a que al utilizar una galga para el análisis de esfuerzos lineales ubicada sobre la circunferencia de la probeta está no mide la deformación ya que se desplaza con la superficie del tubo y por consiguiente su lectura es mucho menor que la rotación presente en el elemento analizado. La galga 2, que es rectangular arroja porcentajes de error entre el 38.8 y el 39.2%, valor que pueden ser considerados aceptables si se analiza que las señales originadas por la deformación son bastante pequeñas y adicionalmente se ven afectadas por cualquier cambio externo que se presente durante la realización de la medición; adicionalmente hay factores de error inherentes tanto en los equipos de medición (galga e indicador), las dimensiones geométricas de las probetas y el hecho de no haber tenido en cuenta el peso propio de la probeta, el porta pesos y de los elementos utilizados para aplicar la carga y la fricción entre el cable y la polea.

Con base en la información relacionada en la tabla 9 se cuantifican los valores experimentales del ángulo de giro a través de la metodología plasmada en el capítulo 5 de este documento; un ejemplo de este procedimiento se relaciona a continuación:

Ensayo 1

Longitud: 200 mm

Lectura Comparador de Carátula: 2.27 mm

Longitud barra sistema de medición: 500 mm

Angulo de Giro:

$$\tan \phi = \frac{\text{Desplazamiento Vertical (mm)}}{500 \text{ (mm)}} = \frac{2.27}{500} = 4.54 * 10^{-3}$$

$$\phi = 0.26^\circ$$

Los valores teóricos del ángulo de giro se obtienen de la siguiente manera:

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

Donde T es la magnitud del momento torsor, en el ensayo 1 está magnitud vale 9.8 N*m; L es la distancia del empotramiento a donde se mide el ángulo de giro (0.2 m), G es el Módulo de rigidez (28GPa) y J es el momento polar de inercia y equivale a:

$$J = \frac{\pi}{2}(r_{ext}^4 - r_{int}^4) = \frac{\pi}{2}(0.0128^4 - 0.0115^4) = 1.47 * 10^{-8} m^4$$

Reemplazando en la ecuación del esfuerzo cortante se tiene:

$$\phi = \frac{T * L}{G * J} = \frac{9.8 * 0.2}{28 * 10^9 * 1.47 * 10^{-8}} = 4.762rad = 0.27$$

En la tabla 10 se reportan los valores del ángulo de giro obtenidos experimentalmente, los datos teóricos calculados y los porcentajes de error para cada una de los ensayos realizados.

Tabla 10. Comparación resultados teóricos y Experimentales de los ángulos de giro obtenidos con el equipo

Ensayo	Longitud (m)	Valor Experimental (°)	Valor Teórico (°)	Porcentaje de error (%)
1	0.2	0.26	0.30	4.7
	0.4	0.63	0.60	15.4
	0.6	0.85	0.90	3.8
2	0.2	0.39	0.45	4.7
	0.4	0.98	0.90	19.7
	0.6	1.25	1.35	1.8
3	0.2	0.61	0.60	11.8
	0.4	1.20	1.20	10.0
	0.6	1.80	1.80	10.0

Fuente: Autores

Los resultados mostrados en la tabla 10 permiten observar que el porcentaje de error máximo presentado en los datos del ángulo de rotación obtenidos a través del equipo diseñado y construido es del 19.7%, valor que puede ser considerado como aceptable si se tiene en cuenta que existen errores inherentes tanto en las características geométricas de las probetas como en las mediciones, las cuales fueron tomadas de manera manual a través del comparador de carátula.

9. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un equipo que permite cuantificar de manera indirecta el esfuerzo cortante y el ángulo de giro que originan los momentos de torsión presentes en una probeta tubular de sección transversal circular.
- El uso de galgas de esfuerzo lineal no pueden ser utilizadas para determinar el esfuerzo cortante sobre un elemento sometido a momentos de torsión, ya que los porcentajes de error obtenidos están cerca del 100% y por consiguiente la metodología propuesta para su implementación no es válida.
- La galga extensiométrica rectangular arrojó resultados aceptables en la medición del esfuerzo cortante originado por momentos torsores, ya que el error máximo obtenido en los ensayos fue del 39.2%, a pesar de la presencia de errores inherentes tanto en los equipos de medición (galga e indicador), las dimensiones geométricas de las probetas y el hecho de no haber tenido en cuenta el peso propio de la probeta, el porta pesos y de los elementos utilizados para aplicar la carga y la fricción entre el cable y la polea. Estos resultados permiten validar la metodología propuesta para la determinación de esfuerzos cortantes a través de este tipo de galgas.
- El ángulo de giro obtenido en los diferentes ensayos mediante la metodología propuesta muestra resultados aceptables ya que el porcentaje de error máximo fue del 19.7%, aún bajo la certeza que existen errores inherentes tanto en las características geométricas de las probetas como en las mediciones, las cuales fueron tomadas de manera manual a través del comparador de carátula.

10.RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar un diámetro mayor en la barra que se implementó para la medición del desplazamiento vertical originado por el momento torsor durante los ensayos, ya que los resultados obtenidos por ANSYS y durante el desarrollo de las está presentó una deformación considerable.
- Se recomienda realizar ensayos en probetas macizas y tubulares con diámetros mayores y espesores diferentes para corroborar los porcentajes de error obtenidos en los ensayos realizados durante el desarrollo de este proyecto.

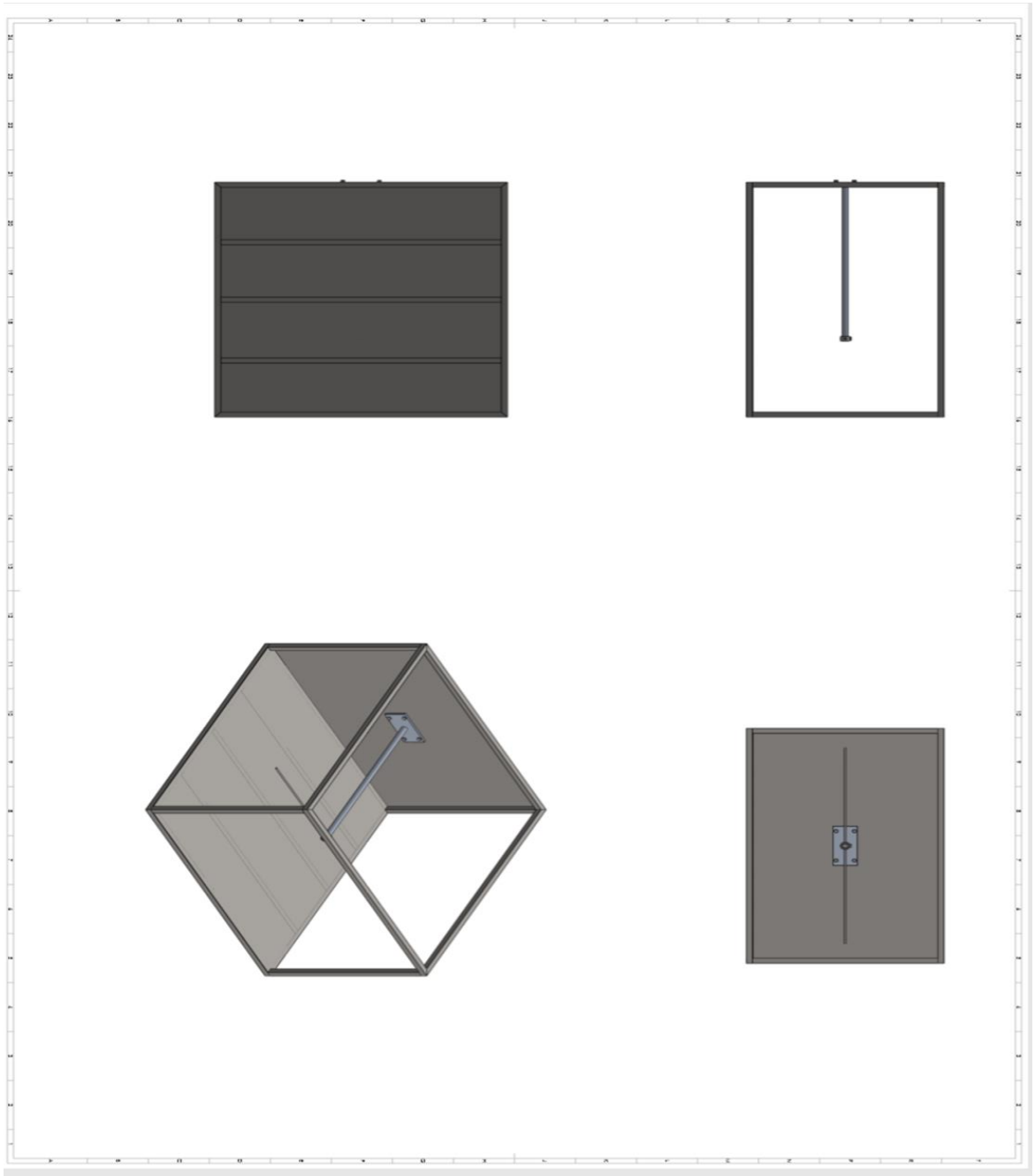
11. BIBLIOGRAFIA

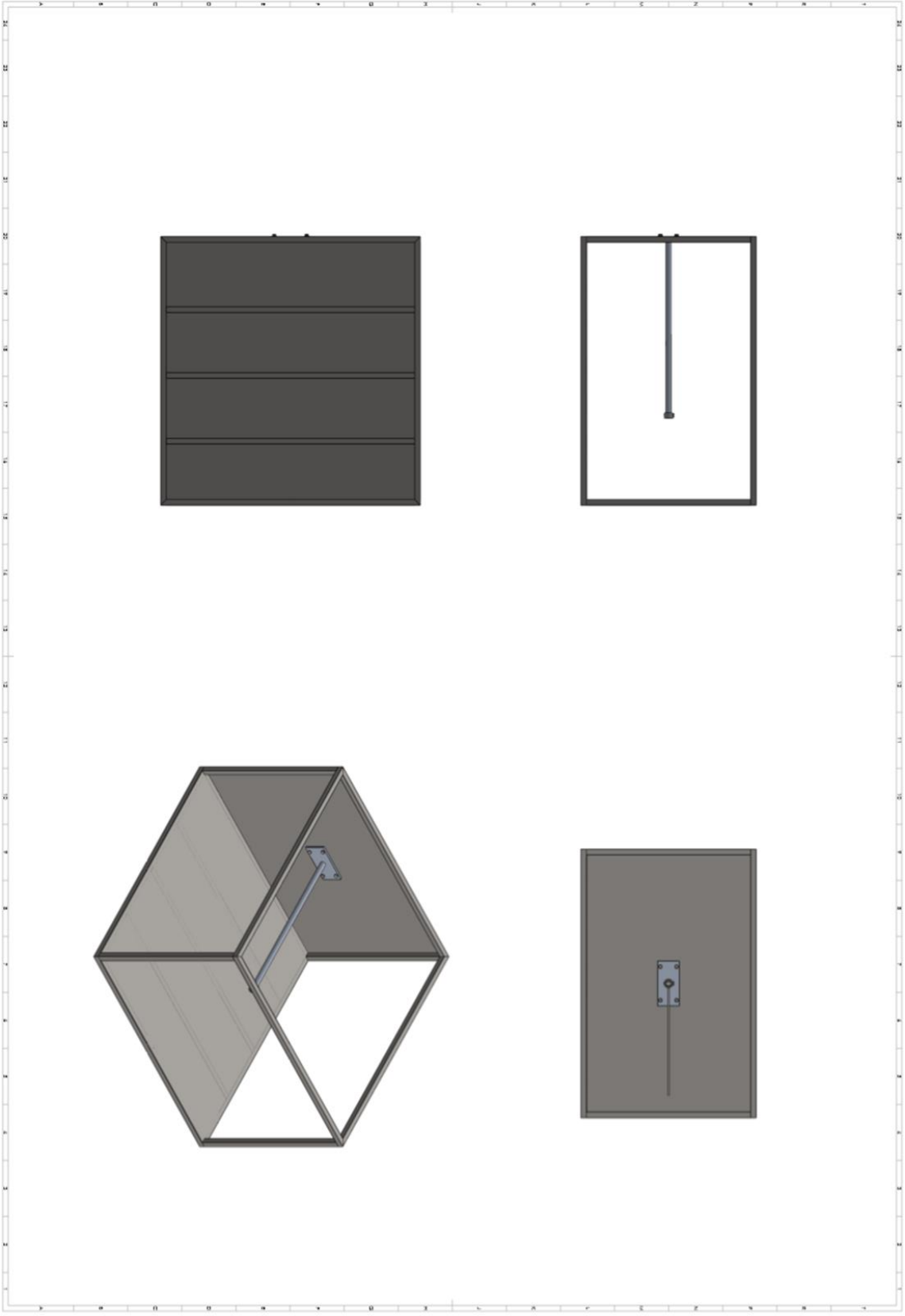
- [1] Beer F. P, *et al. Mecánica de Materiales*, Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013.
- [2] Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009.
- [3] Craig, Roy r. *Mecánica de Materiales, Editorial Continental, segunda edición, México D.F. 2002.*
- [4] Pytel Andrew. Singer Ferdinand L. *Resistencia de Materiales*, Oxford University Press, Cuarta edición, México D.F. 2008.
- [5] Mott R. L. *Resistencia de Materiales*, Editorial Prentice Hall, quinta edición, México 2009.
- [6] Shanley F. R. *Mecánica de Materiales*, editorial McGraw Hill traducido de la primera edición en inglés. México D.F
- [7] Santos A. *Resistencia de Materiales*, División de Publicaciones UIS, Bucaramanga 2013.
- [8] Hibbeler R. C. *Mecánica de Materiales*, Editorial Pearson, octava edición, México 2011.
- [9] Ortiz L. *Resistencia de Materiales*, editorial Mc Graw Hill, segunda edición, Madrid 2002.
- [10] Riley W. F., Sturges L. D. y Morris D. H. *Mecánica de Materiales*, Editorial Limusa - John Wiley & Sons, primera edición, México 2001
- [11] Budynas R. G. y Nisbett J. K. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Editorial Mc Graw Hill, octava edición, México 2008.
- [12] Doebelin E. E., *Sistemas de Medición e Instrumentación: Diseño y Aplicación*, editorial Mc Graw Hill, quinta edición, México 2005.
- [13] Beasley D. E. and Figliola R. S., *Mediciones Mecánicas: Teoría y Diseño*, Editorial Alfaomega, tercera edición, México 2003.

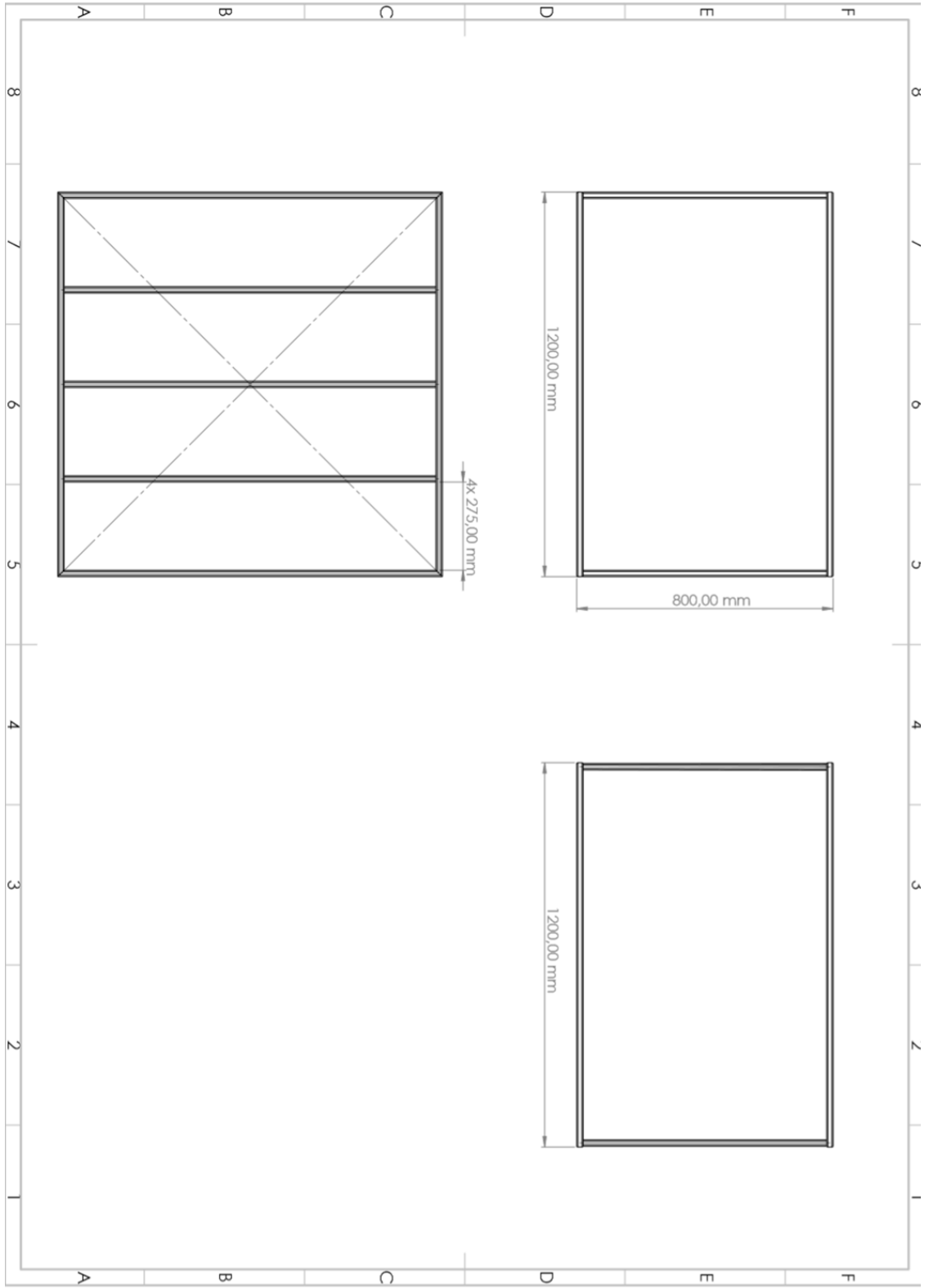
- [14] Universidad Tecnología Del Perú, Vicerrectorado de Investigación. Manual De Electricidad Y Magnetismo, Imprenta Grupo IDAT, Lima 2001.
- [15] Floyd, Thomas L. Principios de circuitos eléctricos, Pearson Education, octava edición, México D.F. 2007.
- [16] Universidad Nacional Experimental del Táchira, Vicerrectorado académico, departamento de ingeniería electrónica. Características de los sensores y sistemas de acoplamiento, San Cristóbal 2012.
- [17] Creus Solé, Antonio. Instrumentación Industrial, Grupo Editor Alfaomega, sexta edición, México D.F. 1999
- [18] Genera, SL. Mediciones con Galgas Extensiométricas, Madrid, España 2018
http://www.generatecologias.es/mediciones_galgas_extensiométrica.html
- [19] Gunt Hamburg. WP 500 Ensayo de torsión, 30Nm, ficha técnica de datos. Alemania. <http://www.gunt.de>
- [20] Gunt Hamburg. WP 510 Ensayo de torsión, 200Nm, accionamiento a motor, ficha técnica de datos. Alemania. <http://www.gunt.de>
- [21] Todo Ingeniería Industrial. Comparadores de Caratula. ING Luis Miguel Hernández. Disponible en: <https://todoingenieriaindustrial.wordpress.com>

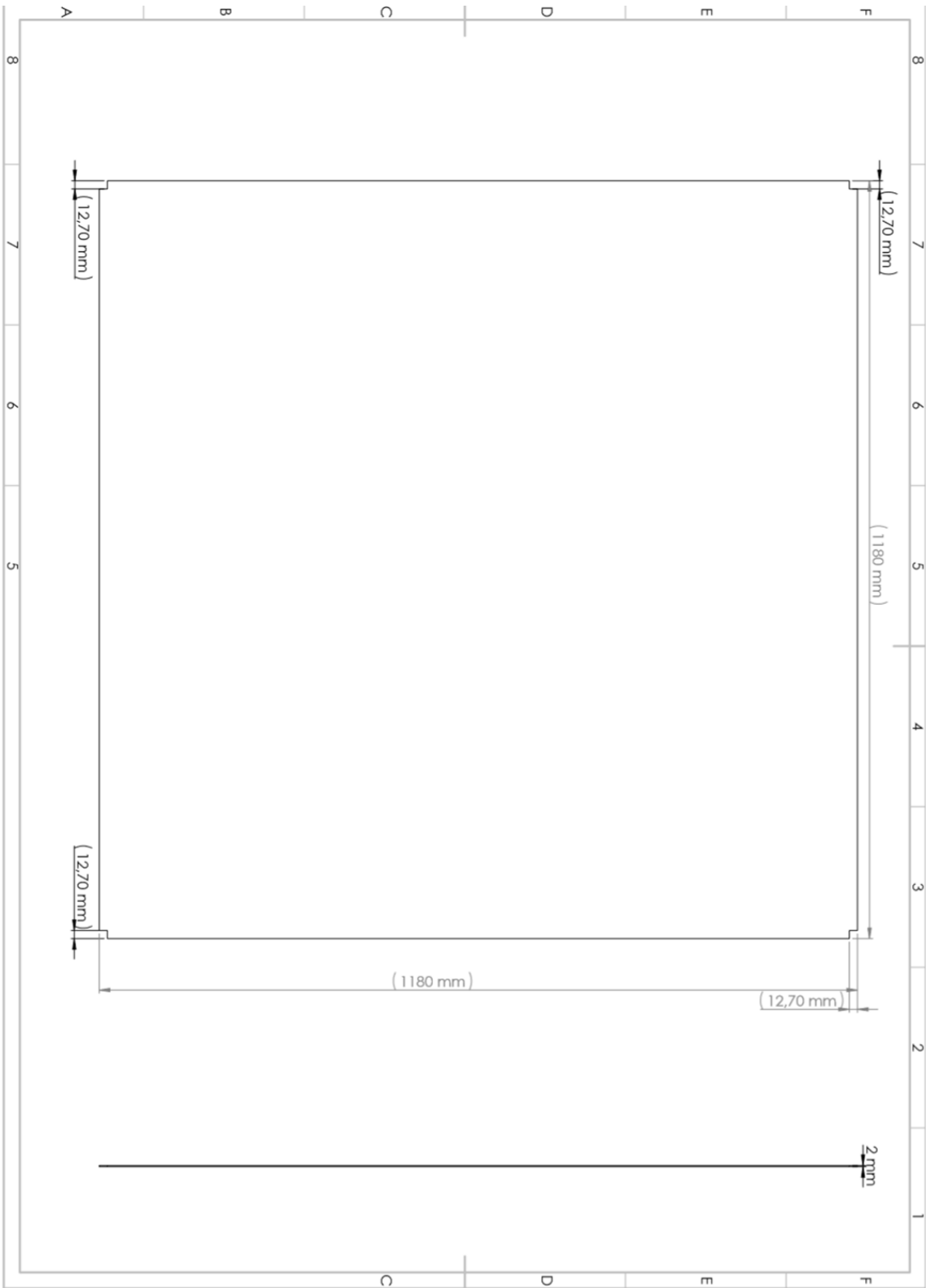
12. ANEXOS

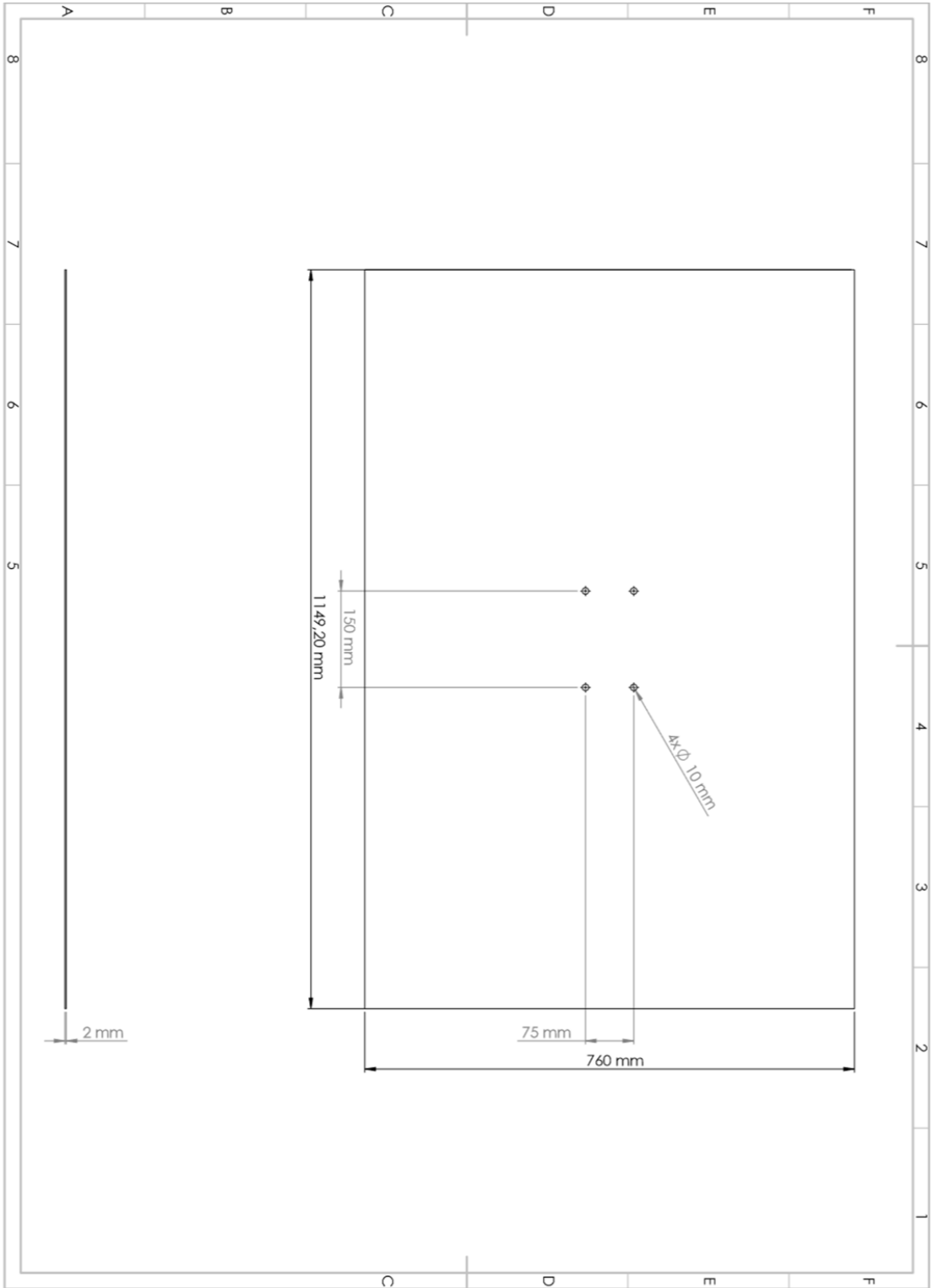
Anexo 1: Planos detallados de los componentes del equipo didáctico para la corroboración de las ecuaciones de esfuerzo y deformación de elementos sometidos a momentos de torsión

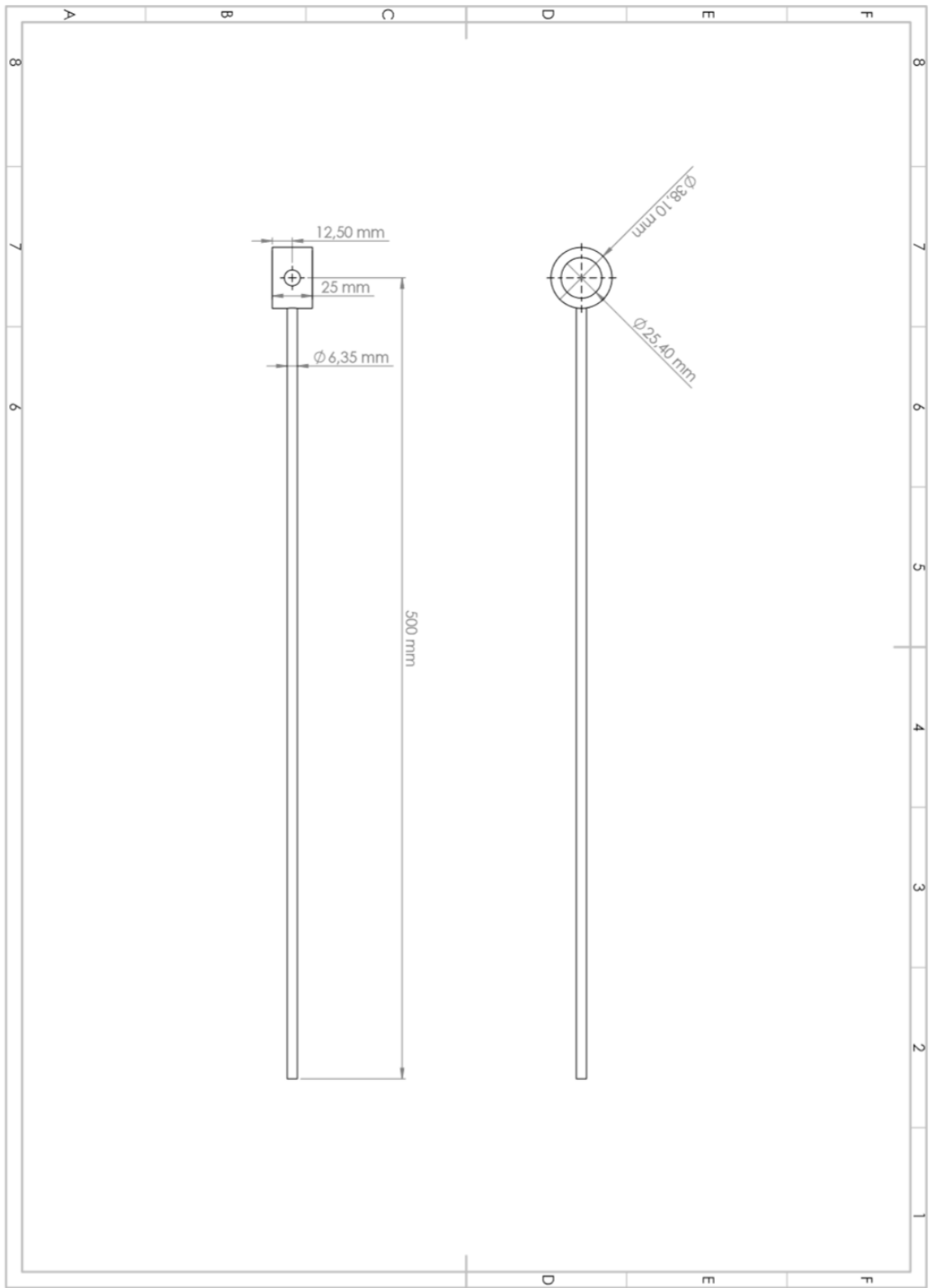


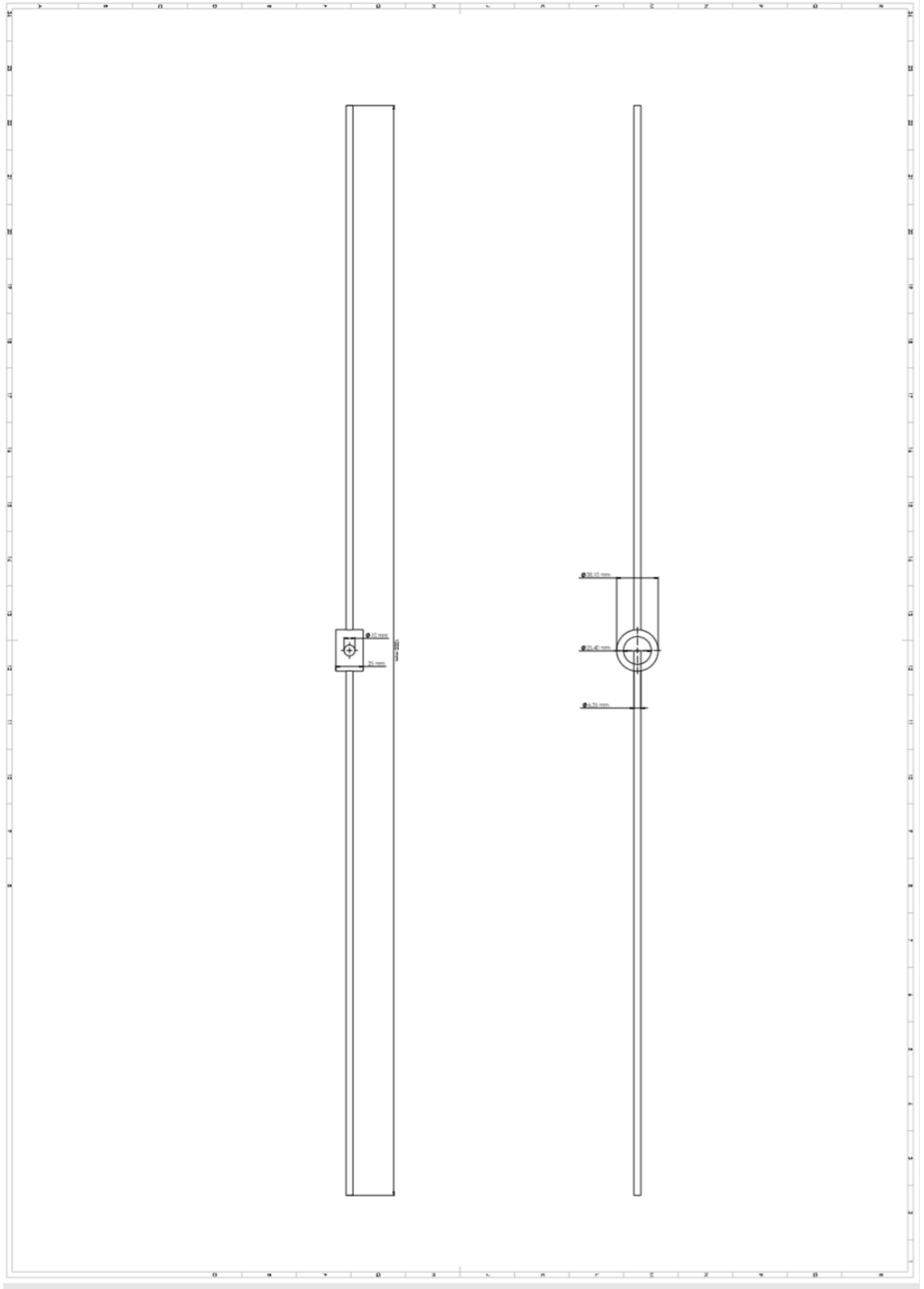


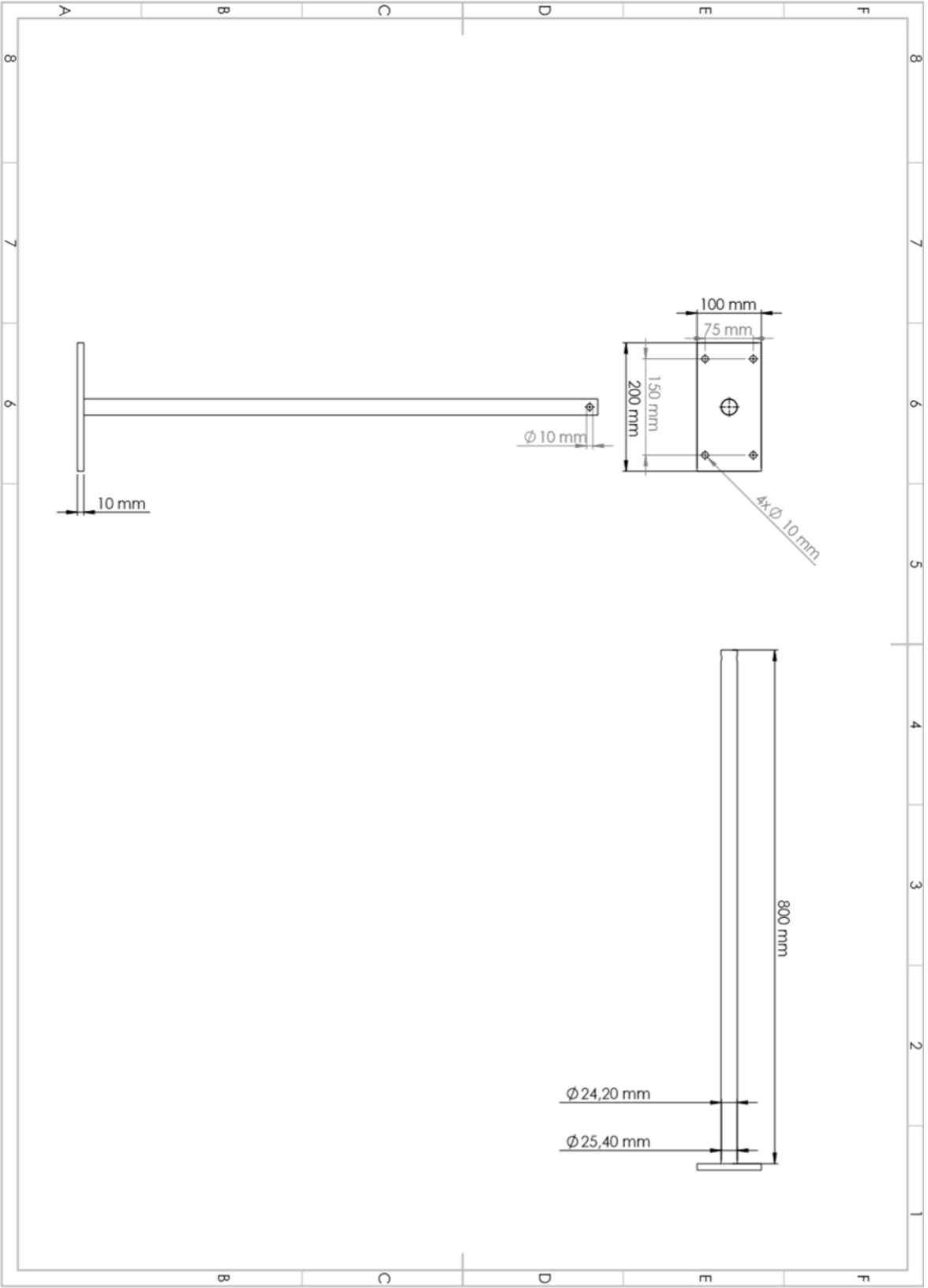












Anexo 2: Tablas de valores y resultados obtenidos para cada condición de ensayo

- **Datos iniciales**

1000 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1 (mv)	0,61	0,76	1,04	1,01	0,84	0,83
	1,27	1,20	1,04	1,02	0,83	0,81
	1,25	1,21	1,02	1,01	0,81	0,78
GALGA 2 (mv)	39,48	39,06	39,42	39,01	39,44	39,03
	39,45	39,02	39,43	38,99	39,45	39,03
	39,44	39,01	39,43	39,00	39,45	39
COMPARADOR DE CARATULA (mm)	2,10		5,60		7,70	
	2,45		5,15		7,30	
	2,25		5,60		7,20	

1500 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1 (mv)	1,01	0,93	1,10	1,06	0,81	0,78
	0,48	0,45	1,09	1,05	0,81	0,79
	0,43	0,41	1,01	0,99	0,8	0,76
GALGA 2 (mv)	39,43	38,82	39,43	38,80	39,46	38,82
	39,43	38,78	39,43	38,81	39,46	38,82
	39,43	38,78	39,43	38,80	39,46	38,81
COMPARADOR DE CARATULA (mm)	3,40		8,7		10,95	
	3,18		8,65		10,92	
	3,30		8,30		10,89	

2000 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1 (mv)	0,51	0,54	1,01	0,86	0,79	0,85
	0,64	0,64	0,91	0,86	0,85	0,84
	0,71	0,69	0,92	0,88	0,86	0,82
GALGA 2 (mv)	39,43	38,58	39,43	38,57	39,46	38,64
	39,43	38,58	39,43	38,58	39,48	38,61
	39,43	38,57	39,44	38,6	39,48	38,65
COMPARADOR DE CARATULA (mm)	5,43		10,10		15,75	
	5,35		10,70		15,80	
	5,20		10,40		15,68	

- Promedios inicial y final

1000 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1	1,04333	1,0566	1,0333	1,01333	0,82666	0,8066
GALGA 2	39,4566	39,03	39,4266	39	39,4466	39,02
COMPARADOR	2,27		2,45		2,40	

1500 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1	0,64	0,5966	1,07	1,03333	0,80666	0,7766
GALGA 2	39,43	38,7933	39,43	38,80	39,46	38,8166
COMPARADOR	3,33		8,40		10,92	

2000 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1	0,62	0,6233	0,95	0,8666	0,83333	0,83666
GALGA 2	39,43	38,5766	39,4333	38,58	39,4733	38,6333
COMPARADOR	5,29		10,34		15,74	

- **Promedios total inicial y total final**

	1000		1500		2000	
	inicial	final	inicial	final	inicial	final
GALGA 1	0,9677	0,9588	0,84	0,8022	0,80	0,7755
GALGA 2	39,4433	39,0166	39,44	38,80	39,4455	38,60

- **Diferencia entre promedio final y promedio inicial**

	1000	1500	2000
GALGA 1	0,0088	0,04	0,0244
GALGA 2	0,4266	0,64	0,8477

Anexo 3: guía de laboratorio

ENSAYO DE TORSION

OBJETIVO GENERAL

Realizar el ensayo de torsión para calcular la deformación a un eje circular tubular de aluminio, por medio del uso de galgas extensiométricas.

OBJETIVO ESPECIFICO

- ✓ Analizar el comportamiento del eje al ser sometido al esfuerzo de torsión
- ✓ Comprender el funcionamiento de las galgas extensiométricas y su participación en el puente de wheatstone
- ✓ Determinar experimentalmente la deformación ocasionada al eje por acción de las cargas
- ✓ Conocer las propiedades, ventajas y desventajas del aluminio.

CONCEPTOS

- Torsión: Cuando se habla de torsión, se hace referencia a la deformación que se presenta en una barra longitudinal producto de la acción de momentos o pares de torsión, que causan una rotación alrededor del eje longitudinal.²⁸ Un ejemplo de barras sometidas a una torsión son los ejes de impulsión en automóviles, ejes de transmisión, ejes de hélices, barras de dirección y taladros.²⁹
- Angulo de torsión: La deformación que se produce en la barra (ver Figura 4), Suponiendo que la barra esta fija en el extremo izquierdo, se le realiza un par de torsión T en el extremo derecho lo que causa una rotación de este extremo respecto al izquierdo. Se traza una línea imaginaria recta formada por los puntos pq , al momento de aplicar el par de torsión T , el punto q rotara respecto al punto p , generando una línea curva pq' . Entre los puntos q y qc se generara un pequeño ángulo conocido como ángulo de torsión (ϕ).

²⁸ Gere, James. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning, séptima edición, México D.F. 2009.

²⁹ Craig, Roy R. *Mecánica de Materiales*, Continental, segunda edición, México D.F. 2002

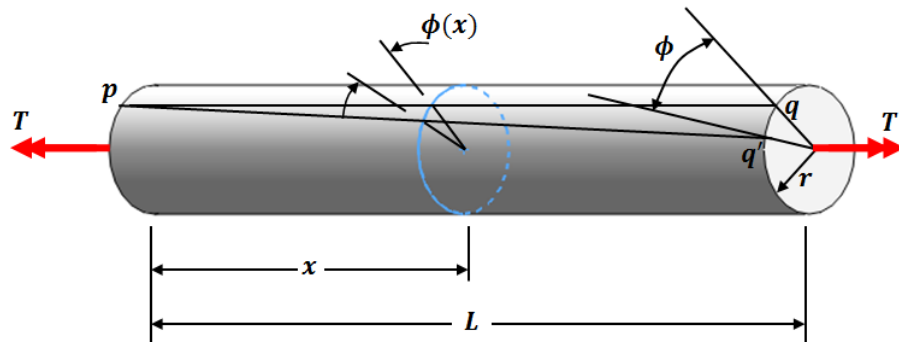


Figura. 1. Angulo de deformación en una barra circular

Propiedades del Aluminio: Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica. Tales como su baja densidad (2.700 kg/m³) y su alta resistencia a la corrosión. Usando aleaciones se puede aumentar su resistencia mecánica.

Tabla. 1 Propiedades del aluminio

Propiedades	Densidad	2.6989	g*cm ⁻³
	Módulo de Young	66.6	Gpa o KN*m ⁻¹
	Resistencia a tracción	230-570	Mpa
	Limite elástico	215-505	Mpa
	% Elongación	10-25	%
	Coefficiente de expansión entre 20°C y 100°C	185	%
	Módulo de Poisson	0.35	
	T^a de fusión	660.2	°C
	Calor la de fusión	390	KJ*Kg ⁻¹
	Energía de activación para la autodifusión	120	KJ*mol ⁻¹
	Conductividad eléctrica	37.67	m*Ω ⁻¹ *mm ⁻²
	Conductividad térmica	235	W*m ⁻¹ *K ⁻¹

- Deformación elástica: es aquella que permite que el material recupere su forma original al momento de retirar la fuerza que le causa la deformación, es decir que no hay deformación permanente cuando el material se encuentra dentro de este limite
- Deformación plástica: es aquella deformación que altera de manera permanente la forma del material, es decir que este no podrá recuperar su forma inicial. Todo esto sucede porque el material experimenta cambios termodinámicos irreversibles
- Puente de wheatstone: El puente de wheatstone es un circuito que se utiliza para medir el valor de una resistencia eléctrica mediante el equilibrio de los brazos del puente, en su configuración más común en forma de rombo (ver Figura 11), se compone de cuatro resistencias (R_1 , R_2 , R_3 , R_4) que forman un circuito cerrado siendo una de ellas la resistencia bajo medida.

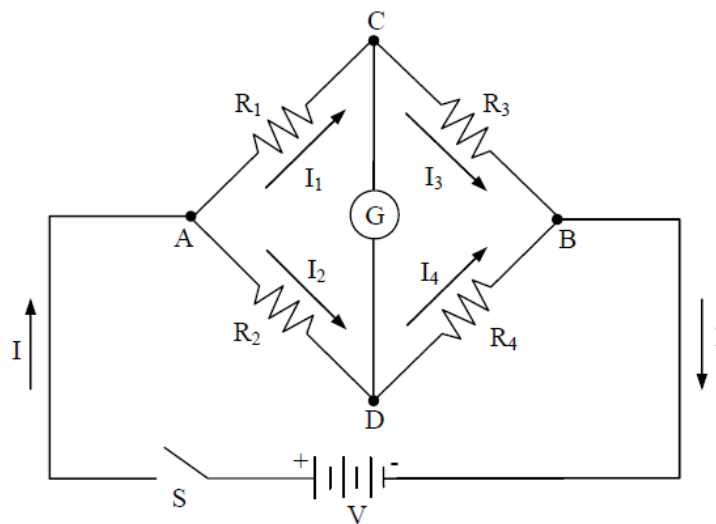


Figura. 2. Circuito denominado puente de wheatstone

PRINCIPIO DEL MÉTODO:

El ensayo consiste en calcular la deformación que presenta un eje tubular circular de aluminio fijado a una pared laminar. A dicho eje se le van a ejercer un par de fuerzas de torsión, mediante un sistema de pesas localizadas a extremo de una barra que se localiza en el extremo libre del eje

EQUIPO Y HERRAMIENTAS

- Banco de pruebas: Se Utiliza para realizar ensayos de torsión ejerciendo un par de fuerzas a una probeta de aluminio

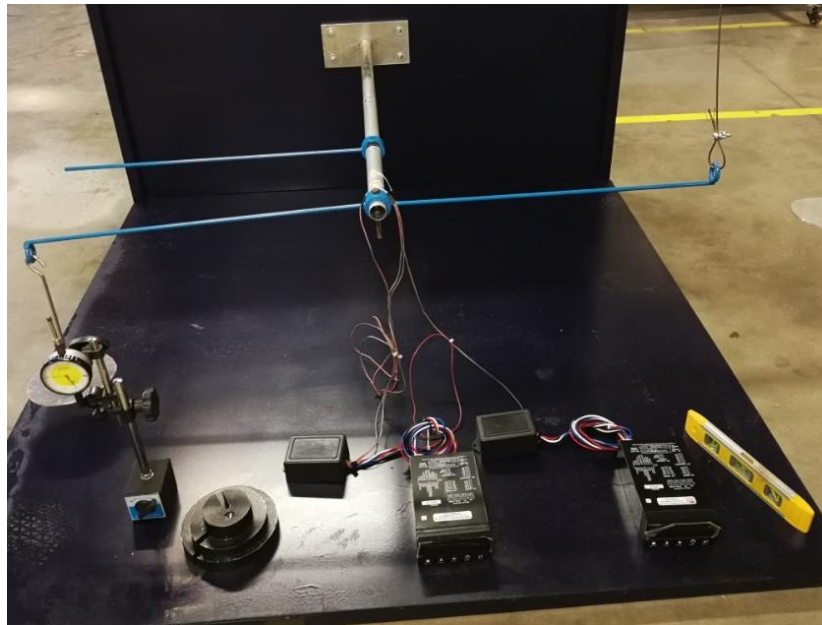


Figura. 3. Banco de pruebas, Componentes eléctricos y herramientas

- Probeta tubular de aluminio: la probeta que se utiliza en este ensayo tiene las siguientes dimensiones

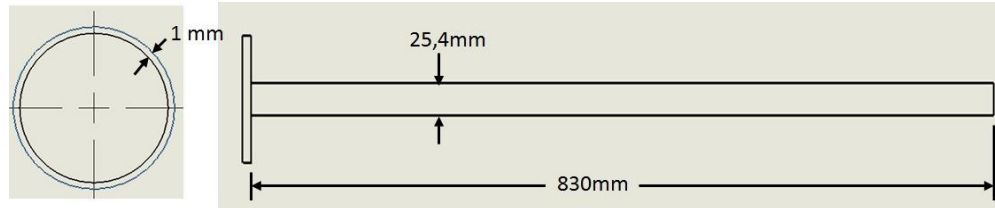


Figura. 4. Plano y dimensiones del eje

- Galgas extensiométricas: son las encargadas de detectar la deformación en el tubo mediante una variación en su resistencia. En el sistema se encuentran instaladas dos galgas representadas con dos números

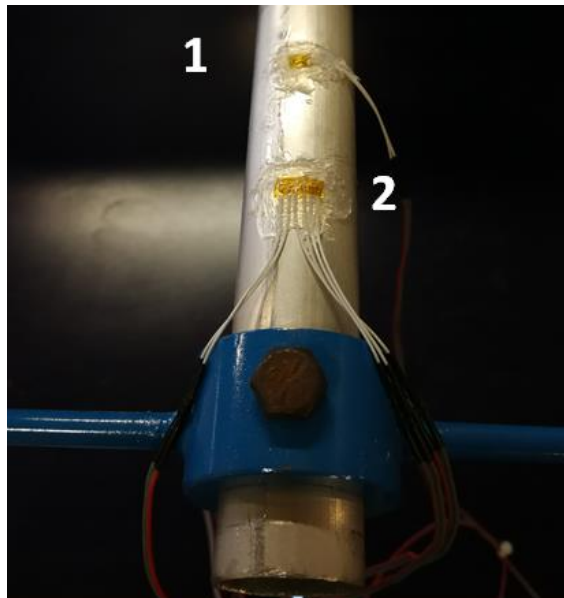


Figura. 5. Galgas extensiométricas

- Transductores: transforman la señal física en eléctrica, la señal ingresa como variación de resistencia y se expresa como variación de voltaje



Figura. 6. Transductor de señal

- Pesos : la variación de estos es directamente proporcional con la variación en los resultados de deformación en el eje

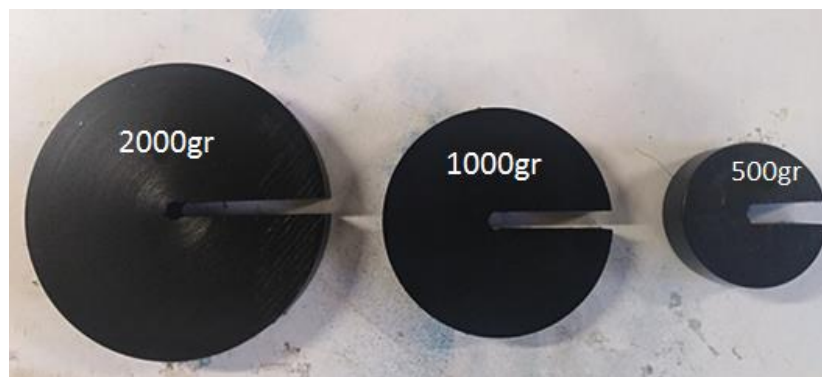


Figura. 7. Pesos utilizados para ejercer la fuerza al eje

- Comparador de caratula: este instrumento nos permite medir el ángulo de torsión del eje mediante su desplazamiento en forma vertical, y su lectura.



Figura. 8 Comparador de caratula

- Llave 7/16
- Calibrador

PROCEDIMIENTO

Antes de comenzar la práctica, revisar que todos los equipos se encuentren correctamente conectados con la supervisión del encargado del laboratorio.

1. Utilizando un metro, ubicar la barra B a 20 cm de la base.



Figura. 9. Posicionamiento de la barra de medición de desplazamiento vertical

2. Con la ayuda de un nivel, asegúrese que la barra se encuentre horizontalmente nivelada y fijarla con la llave 7/16.



Figura. 10. Nivelación y ajuste de la b barra de medición de desplazamiento vertical

3. Ubicar el comprador de caratula coincidiendo con el extremo de la barra B, asegurarlo magnéticamente y cerciorarse que la medida comience desde cero.



Figura. 11. Comprador de caratula ubicado bajo la barra de medición de desplazamiento vertical

4. Anotar el dato inicial de los dos transductores

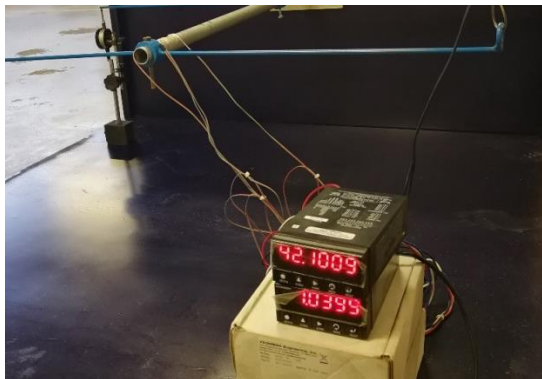


Figura. 12. Transductores realizando medición Inicial

5. Ubicar una de las pesas de 1000 gr en cada uno de los portapesas, contando cuantas vueltas realiza el comparador de caratula durante esta acción.
6. Tomar nota de los datos arrojados por los transductores después de haber ubicado el peso.
7. Realizar 3 veces este procedimiento con el mismo peso, con un intervalo de 2 minutos entre cada toma, ubicando siempre desde cero el comparador de caratula y anotando los valores; luego utilizar las pesas de 1500g y de 2000g para el mismo procedimiento.
8. Repetir los pasos anteriores con la barra B ubicada a 40cm y a 60 cm de la base.

Cálculos: Utilizar los siguientes datos para realizar los cálculos correspondientes

- Deformación Circunferencial:

$$\epsilon_{\theta} = \frac{4 * V_{vd}}{K * V_a}$$

Donde

K, es el factor de galga y tiene una magnitud de $1.93 \pm 1.5\%$,

V_a es el voltaje de alimentación del equipo y tiene un valor de 10 V

V_{vd} es el voltaje obtenido de la lectura de la galga.

- **Ángulo de Deformación:**

$$\tan \gamma = \frac{\epsilon_{\theta} * L_{galga}}{distancia}$$

- **Deformación unitaria galga 1**

$$\gamma * \frac{\pi}{180} (rad)$$

- **Esfuerzo Cortante:**

$$\tau = G * \gamma$$

- **Deformación Unitaria galga 2**

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_{45^\circ} - (\epsilon_x + \epsilon_y) = 2\epsilon = 2 * 9.31 * 10^{-5} = 1.863 * 10^{-4}$$

- **Esfuerzo cortante teórico**

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

- **Momento polar de Inercia**

$$J = \frac{\pi}{2} (r_{ext}^4 - r_{int}^4)$$

- **Angulo de giro (comparador de caratula)**

$$\tan \phi = \frac{\text{Desplazamiento Vertical (mm)}}{\text{Longitud de la barra (500mm)}}$$

- **Angulo de giro teórico**

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

Tabla. 2

1000 g						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 1						
PROMEDIO						

Tabla. 3

1000 gr						
	20 cm		40 cm		60 cm	
	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL	INICIAL	FINAL
GALGA 2						
PROMEDIO						

Tabla. 4

	GALGA 1	GALGA 2
PROMEDIO MEDICIÓN FINAL		
PROMEDIO MEDICIÓN INICIAL		
DIFERENCIA DE PROMEDIOS		

Las tablas 2, 3 y 4 se deben realizar para 1000 gr 1500 gr y 2000 gr

Tabla. 5

	1000 gr		
	20 cm	40 cm	60cm
COMPARADOR DE CARATULA			
PROMEDIO			

Tabla. 6

Ensayo	Esfuerzo Cortante Experimental (MPa)		Esfuerzo Cortante Teórico (MPa)	Porcentaje de error (%)	
	Galga 1	Galga 2		Galga 1	Galga 2
1					
2					
3					

Tabla. 7

Ensayo	Longitud (m)	Valor Experimental (°)	Valor Teórico (°)	Porcentaje de error (%)
1				
2				
3				

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- verificar que las galgas se encuentren correctamente adheridas al eje.
- Profundizar en los conceptos mencionados en la guía.
- Tener cuidado al momento de colocar los pesos, para aumentar la precisión en la toma de datos.
- Asegurarse de fijar con el imán el comparador de caratula.
- Antes de tomar la medida inicial, detener cualquier tipo de oscilación que presente la barra de pesos

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Beer F. P, *et al. Mecánica de Materiales*, Editorial Mc Graw Hill, sexta edición, México 2013.
- [2] Gere, james. Barry J. Goodno. *Mecánica de materiales*, Cengage Learning Editores, séptima edición, México D.F. 2009.
- [3] Doeblin E. E., *Sistemas de Medición e Instrumentación: Diseño y Aplicación*, editorial Mc Graw Hill, quinta edición, México 2005.
- [4] Floyd, Thomas L. *Principios de circuitos eléctricos*, Pearson Education, octava edición, México D.F. 2007.
- [5] Creus Solé, Antonio. *Instrumentación Industrial*, Grupo Editor Alfaomega, sexta edición, México D.F. 1999