



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE TORSIÓN
PARA ENSAYOS DE POLÍMEROS”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: BYRON GERMÁN BARRIGA MACHADO

MARCO ANTONIO SANTILLAN TASIGCHANA

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ANGEL ESCOBAR GUACHAMBALA

Riobamba-Ecuador

2020

©2020, Byron Germán Barriga Machado; & Marco Antonio Santillán Tasigchana

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Byron Germán Barriga Machado y Marco Antonio Santillán Tasigchana declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 05 de noviembre de 2020



Byron Germán Barriga Machado
060494729-1



Marco Antonio Santillán Tasigchana
060408549-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Proyecto Técnico denominado, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE TORSIÓN PARA ENSAYOS DE POLÍMEROS**, realizado por los señores: **BYRON GERMÁN BARRIGA MACHADO Y MARCO ANTONIO SANTILLÁN TASIGCHANA** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2020-08-25
Ing. Miguel Ángel Escobar Guachambala DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION	_____	2020-08-25
Ing. Msc. Jorge Isaías Caicedo Reyes MIEMBRO DE TRIBUNAL	_____	2020-08-25

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo de titulación a mi madre que me ha apoyado en las buenas y en las malas, con su esfuerzo y cariño me ha dado la seguridad necesaria para poder cumplir mis metas propuestas.

Marco

A Dios por la vida, salud y por las oportunidades. A mis padres Vicente y Lucrecia porque son mi ejemplo de superación, y por brindarme las herramientas necesarias para conseguir mis objetivos. A mi hermana Tatiana por apoyarme, animarme y por ser guía en mi niñez. A mi primo Lenin por su apoyo, consejos y toda la ayuda que me ha brindado.

Byron

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi mamá que siempre me brinda su apoyo y cariño, a mi papá que siempre me cuida, a mi hermano que ha estado en las buenas y en las malas, a mi segunda mamá por preocuparse de mí, a mi familia y amigos que me brindaron su tiempo y afecto, a los miembros del tribunal por la ayuda brindada y a la carrera de Ingeniería Mecánica por darme experiencias, logros y decepciones que me volvieron la persona que soy ahora.

Marco

A mi abuelita Zoila por su cariño, a mi tía Carmita por bendecirme siempre y a toda mi familia por el apoyo y preocupación. A Pablo y Annabell por ser mis compañeros y apoyarme incondicionalmente en todo lo que hago. A la carrera de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) por brindarme los conocimientos necesarios para mi formación académica. A todos los maestros por los conocimientos y experiencias compartidas.

Byron

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1	Antecedentes.....	3
1.2	Formulación del Problema.....	4
1.3	Justificación.....	4
1.3.1	<i>Justificación Teórica.....</i>	4
1.3.2	<i>Justificación Metodológica.....</i>	5
1.3.3	<i>Justificación Práctica.....</i>	5
1.4	Alcance.....	5
1.5	Objetivos.....	6
1.5.1	<i>Objetivo General.....</i>	6
1.5.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	6

CAPÍTULO II

2.	REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS.....	7
2.1	Máquina de Torsión.....	7
2.1.1	<i>Estado actual de las máquinas de torsión.....</i>	7

2.1.2	<i>Componentes principales de una máquina de torsión</i>	10
2.1.3	<i>Funcionamiento de la máquina de torsión</i>	11
2.2	Esfuerzo de torsión	11
2.2.1	<i>Ecuaciones aplicadas en el ensayo de torsión</i>	14
2.2.1.1	<i>Esfuerzo cortante</i>	14
2.2.1.2	<i>Ángulo de giro</i>	15
2.2.2	<i>Torsión inelástica</i>	15
2.3	Ensayo de torsión	19
2.3.1	<i>Procedimiento del ensayo de torsión</i>	19
2.3.2	<i>Resultados del ensayo de torsión</i>	19
2.3.3	<i>Aspectos importantes del ensayo de torsión</i>	19
2.3.3.1	<i>Tipos de fallas por esfuerzo a torsión</i>	20
2.3.3.2	<i>Ejes cilíndricos sólidos y huecos</i>	22
2.4	Normas en el ensayo de torsión	22
2.4.1	<i>ASTM D1043 – 16</i>	22
2.4.2	<i>ASTM E143-02</i>	23
2.4.3	<i>DIN 50125</i>	23
2.5	Polímeros	24
2.5.1	<i>Propiedades mecánicas de los polímeros</i>	26
2.5.2	<i>Materiales utilizados en el ensayo de torsión</i>	27
2.5.2.1	<i>Nylon (Poliamida)</i>	27
2.5.2.2	<i>Acrílico (Polimetacrilato)</i>	27
2.5.2.3	<i>PLA (Ácido Poliláctico)</i>	27
2.6	Metodología de diseño	28
2.6.1	<i>Etapas de la ingeniería concurrente</i>	29
2.7	Protocolos de pruebas sobre máquinas	30
2.7.1	<i>Medidas a tomar en los protocolos de pruebas</i>	30
2.8	<i>Fundamentos para la elaboración de la guía de laboratorio</i>	31
2.9	Validación de métodos de ensayo	31
2.9.1	<i>Teoría de errores</i>	32
2.9.1.1	<i>Error de medida</i>	32
2.9.1.2	<i>Valor verdadero</i>	32
2.9.1.3	<i>Desviación estándar (Error estadístico)</i>	32

2.9.1.4	<i>Error sistemático</i>	32
2.9.1.5	<i>Error efectivo</i>	33
2.9.1.6	<i>Error relativo y error relativo porcentual</i>	33
2.9.2	<i>Ajuste por mínimos cuadrados</i>	33
2.9.3	<i>Cálculo para el número de probetas</i>	34

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	35
3.1	Metodología de diseño	35
3.2	Definición del producto	36
3.2.1	<i>Desarrollo de la función de calidad QFD</i>	36
3.2.1.1	<i>Voz del usuario</i>	36
3.2.1.2	<i>Voz del ingeniero</i>	36
3.2.2	<i>Resultados de la casa de la calidad</i>	38
3.2.2.1	<i>Precio máximo</i>	38
3.2.2.2	<i>Ergonomía</i>	38
3.2.2.3	<i>Controlador</i>	38
3.2.2.4	<i>Visualización de resultados</i>	38
3.3	Diseño conceptual	38
3.3.1	<i>Análisis de la estructura funcional</i>	38
3.3.2	<i>Análisis de la estructura modular</i>	39
3.3.3	<i>Análisis de alternativas módulo 1</i>	40
3.3.3.1	<i>Movimiento mandril móvil</i>	41
3.3.3.2	<i>Fijación mandril móvil</i>	41
3.3.3.3	<i>Sujeción probeta</i>	42
3.3.4	<i>Evaluación de alternativas módulo 1</i>	42
3.3.5	<i>Análisis de alternativas módulo 2</i>	43
3.3.5.1	<i>Sistema de control</i>	44
3.3.5.2	<i>Ingreso de parámetros (HMI)</i>	45
3.3.5.3	<i>Sistema de movimiento</i>	46
3.3.5.4	<i>Reducción de velocidad</i>	46
3.3.5.5	<i>Controlador del motor</i>	46
3.3.6	<i>Evaluación de alternativas módulo 2</i>	47

3.3.7	<i>Análisis de alternativas módulo 3</i>	49
3.3.7.1	<i>Sensor de torsión</i>	50
3.3.7.2	<i>Sensor de deformación angular</i>	50
3.3.7.3	<i>Visualización de resultados</i>	51
3.3.8	<i>Evaluación de alternativas módulo 3</i>	51
3.4	Diseño de materialización	52
3.4.1	<i>Diseño del bastidor de la máquina</i>	53
3.4.1.1	<i>Análisis de la estructura mediante Ansys</i>	54
3.4.1.2	<i>Cálculo del coeficiente de seguridad en los elementos del bastidor</i>	55
3.4.2	<i>Diseño de Eje</i>	59
3.4.2.1	<i>Coeficiente de seguridad del eje</i>	59
3.4.2.2	<i>Cálculo del coeficiente de seguridad del eje mediante Ansys</i>	64
3.4.2.3	<i>Rigidez del eje</i>	65
3.4.2.4	<i>Diseño de chavetas del eje</i>	66
3.4.2.5	<i>Ajuste y tolerancias geométricas</i>	69
3.4.3	<i>Diseño de la brida de acople con el eje</i>	71
3.4.3.1	<i>Cálculo de coeficiente de seguridad de la brida de acople con el eje</i>	72
3.4.3.2	<i>Cálculo coeficiente seguridad de la brida de acople con el eje- Ansys</i>	74
3.4.3.3	<i>Cálculo del coeficiente de seguridad de pernos de la brida de acople con eje</i>	75
3.4.4	<i>Diseño de la brida de acople con el sensor</i>	76
3.4.4.1	<i>Cálculo de coeficiente de seguridad de la brida de acople con el sensor</i>	77
3.4.4.2	<i>Cálculo del coeficiente de seguridad de la brida sensor mediante Ansys</i>	78
3.4.4.3	<i>Cálculo del coeficiente de seguridad de pernos de la brida de acople con el sensor</i>	79
3.4.5	<i>Selección de compontes electrónicos</i>	81
3.4.6	<i>Selección del motor</i>	81
3.4.6.1	<i>Parámetros iniciales de diseño</i>	82
3.4.6.2	<i>Velocidad del tren de pulsos</i>	83
3.4.6.3	<i>Torque resistivo</i>	84
3.4.6.4	<i>Torque del motor</i>	86
3.4.7	<i>Sistema de Control y Programación</i>	88
3.4.7.1	<i>Arduino Mega y Arduino UNO</i>	90
3.4.8	<i>Pantalla Nextion NX8048T050</i>	92
3.4.8.1	<i>Conexión Arduino Mega - Excel</i>	95
3.5	Diseño de detalle	96
3.5.1	<i>Conexión Eléctrica</i>	96

3.5.2	<i>Elementos de Alimentación</i>	97
3.5.3	<i>Panel de Control</i>	97
3.5.4	<i>Microcontroladores</i>	98
3.5.5	<i>Sensores</i>	100
3.5.6	<i>Actuadores</i>	101
3.5.7	<i>Construcción de la máquina</i>	102
3.5.8	<i>Procesos de mecanizado y tiempos de construcción</i>	102
3.5.9	<i>Cursograma de montaje</i>	107
3.5.10	<i>Calibración de sensores</i>	109
3.5.10.1	<i>Sensor de torsión estático tipo doble brida Lorenz M-2396</i>	109
3.5.10.2	<i>Encoder incremental FC-03 (LM393)</i>	109
3.5.10.3	<i>Calibración del sensor de torsión estático tipo doble brida Lorenz M-2396</i>	111
3.5.10.4	<i>Calibración del Encoder incremental FC-03 (LM393)</i>	113
3.6	Análisis de costos	114
3.6.1	<i>Costos directos</i>	114
3.6.1.1	<i>Costos elementos mecánicos</i>	114
3.6.1.2	<i>Costo de Manufactura</i>	115
3.6.1.3	<i>Costo de mano de obra</i>	115
3.6.1.4	<i>Componentes eléctricos</i>	116
3.6.1.5	<i>Costo directo total</i>	116
3.6.2	<i>Costos Indirectos</i>	117
3.6.3	<i>Costo Total</i>	117

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	118
4.1	Plan de pruebas	118
4.1.1	<i>Plan de prueba en vacío</i>	118
4.1.2	<i>Plan de pruebas con carga</i>	119
4.2	Resultados	122
4.2.1	<i>Probeta de Nylon</i>	122
4.2.2	<i>Probeta de Acrílico</i>	125
4.2.3	<i>Probeta de PLA</i>	128
4.2.4	<i>Análisis de resultados</i>	131

4.2.5	<i>Cálculo del número de probetas para el ensayo de torsión</i>	136
4.3	Guía de ensayo	136
	CONCLUSIONES	143
	RECOMENDACIONES	145
	GLOSARIO	
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Dimensiones de probetas para ensayos de torsión.....	24
Tabla 2-2: Propiedades de los polímeros usados en el ensayo de torsión.....	28
Tabla 1-3: Alternativas para el movimiento mandril móvil.....	41
Tabla 2-3: Alternativas para fijación del mandril móvil.....	41
Tabla 3-3: Alternativas para sujeción probeta.	42
Tabla 4-3: Evaluación de criterios módulo 1.....	42
Tabla 5-3: Evaluación de criterios para costos.	43
Tabla 6-3: Evaluación de criterios para durabilidad.	43
Tabla 7-3: Evaluación de criterios para disponibilidad.....	43
Tabla 8-3: Conclusión evaluación de criterios de módulo 1.....	43
Tabla 9-3: Alternativas para sistema de control.....	45
Tabla 10-3: Alternativas para ingreso de parámetros (HMI).....	45
Tabla 11-3: Alternativas para sistema de movimiento.....	46
Tabla 12-3: Alternativas para reducción de velocidad.....	46
Tabla 13-3: Alternativas para controlador del motor.....	47
Tabla 14-3: Evaluación de criterios módulo 2.....	47
Tabla 15-3: Evaluación de criterios para lenguaje de programación.....	48
Tabla 16-3: Evaluación de criterios para costo.....	48
Tabla 17-3: Evaluación de criterios para adaptabilidad.....	48
Tabla 18-3: Evaluación de criterios para disponibilidad.....	48
Tabla 19-3: Evaluación de criterios para adaptabilidad para consumo energético.....	48
Tabla 20-3: Conclusión evaluación de criterios de módulo 2.....	49
Tabla 21-3: Alternativas para sensor de torsión.....	50
Tabla 22-3: Alternativas para sensor deformación angular.....	50

Tabla 23-3: Alternativas para visualización de resultados.....	51
Tabla 24-3: Evaluación de criterios módulo 3.....	51
Tabla 25-3: Evaluación de criterios para lenguaje de capacidad.....	52
Tabla 26-3: Evaluación de criterios para lenguaje de exactitud.....	52
Tabla 27-3: Evaluación de criterios para costo.....	52
Tabla 28-3: Conclusión evaluación de criterios del módulo 3.....	52
Tabla 29-3: Parámetros iniciales de diseño.....	82
Tabla 30-3: Eficiencia mecánica del reductor de velocidad NRV030.....	85
Tabla 31-3: Características del motor Nema 23.....	88
Tabla 32-3: Características de las placas Arduino UNO y Arduino Mega.....	89
Tabla 33-3: Funciones de los microcontroladores Arduino Mega y Uno.....	89
Tabla 34-3: Características Pantalla Nextion NX8048T050.....	92
Tabla 35-3: Elementos, procesos de mecanizado y tiempos de construcción.....	102
Tabla 36-3: Calibración y cálculo de error relativo para el sensor de torsión.....	111
Tabla 37-3: Cálculo de histéresis para el sensor de torsión.....	112
Tabla 38-3: Calibración y cálculo de error relativo para el sensor de ángulo de giro.....	113
Tabla 39-3: Costos elementos mecánicos.....	114
Tabla 40-3: Costo de manufactura.....	115
Tabla 41-3: Costo de mano de obra.....	115
Tabla 42-3: Costo de componentes eléctricos.....	116
Tabla 43-3: Costo directo total.....	116
Tabla 44-3: Costo indirectos.....	117
Tabla 45-3: Costo total.....	117
Tabla 1-4: Normas utilizadas en el plan de prueba en vacío.....	118
Tabla 2-4: Requerimientos por cumplir en la prueba sin carga.....	118
Tabla 3-4: Parámetros de entrada para la prueba sin carga.....	119
Tabla 4-4: Normas utilizadas en el plan de prueba con carga.....	120

Tabla 5-4: Requerimientos por cumplir en la prueba con carga.	120
Tabla 6-4: Probetas utilizadas en la prueba con carga.	121
Tabla 7-4: Parámetros de entrada para la prueba con carga.	121
Tabla 8-4: Parámetros de ingreso para la probeta de nylon.	122
Tabla 9-4: Parámetros de ingreso para la probeta de acrílico.	125
Tabla 10-4: Parámetros de ingreso para la probeta de PLA.	128
Tabla 11-4: Tiempo de ensayo, resistencia máxima y módulo de rigidez - Nylon.	134
Tabla 12-4: Tiempo de ensayo, resistencia máxima y módulo de rigidez - Acrílico.	134
Tabla 13-4: Tiempo ensayo, resistencia máxima y módulo rigidez - PLA.	134
Tabla 14-4: Desviación estándar en los valores de la resistencia a la torsión máxima.	135
Tabla 15-4: Desviación estándar en los valores del módulo de rigidez.	135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Máquina de ensayo de torsión.	7
Figura 2-2. Máquina para ensayo de torsión IBERTEST.	8
Figura 3-2. Máquina para el ensayo de torsión Tinius Olsen modelo 398.	8
Figura 4-2. Máquina para el ensayo de torsión de la serie NJS-Z.	9
Figura 5-2. Máquina para el ensayo de torsión de la serie MT de INSTRON.	9
Figura 6-2. Representación del par de torsión.	12
Figura 7-2. Efecto de un par de torsión T sobre un eje circular sólido.	12
Figura 8-2. Eje circular sólido fijo en un extremo y sometido a par de torsión en el otro.	13
Figura 9-2. Distribución de esfuerzos cortantes en un eje circular sólido y en eje tubular.	14
Figura 10-2. Diagrama esfuerzo - deformación a cortante de un material elastoplástico.	16
Figura 11-2. Distribución de esfuerzos cortantes.	16
Figura 12-2. Diagrama Torque - Ángulo de giro.	17
Figura 13-2. Diagrama esfuerzo - deformación a cortante.	18
Figura 14-2. Distribución de esfuerzos real y ficticio.	18
Figura 15-2. Elementos superficiales de un eje sometido a un par de torsión T.	20
Figura 16-2. Diagrama de cuerpo libre del elemento c.	21
Figura 17-2. Distribución del esfuerzo cortante en el plano radial y axial.	21
Figura 18-2. Tipos de falla por esfuerzo a torsión.	22
Figura 19-2. Configuración de probetas para ensayos de torsión.	24
Figura 20-2. Curva generalizada tensión - deformación para plásticos.	25
Figura 21-2. Curvas de tensión - deformación para varios tipos de materiales polímeros.	25
Figura 22-2. Gráficos Esfuerzo - Deformación para fibras, plásticos y elastómeros.	26
Figura 23-2. Ciclo básico de diseño.	29
Figura 1-3. Metodología diseño y construcción de la máquina de torsión.	35
Figura 2-3. Casa de la Calidad.	37

Figura 3-3. Estructura funcional.	39
Figura 4-3. Nivel 1 de la estructura modular.	39
Figura 5-3. Nivel 2 de la estructura modular.	40
Figura 6-3. Alternativas de solución del Módulo 1.....	40
Figura 7-3. Alternativas de solución del Módulo 2.....	44
Figura 8-3. Alternativas de solución del Módulo 3.....	49
Figura 9-3. Máquina de torsión.....	53
Figura 10-3. Estructura bastidor.....	53
Figura 11-3. Fuerzas que actúan sobre la estructura.	54
Figura 12-3. Análisis de fallo del bastidor por Von Mises.	54
Figura 13-3. Análisis deformación total del bastidor.....	55
Figura 14-3. Diagrama de cuerpo libre del tubo cuadrado 30x30x2mm.	55
Figura 15-3. Perfil Tubo Cuadrado.	56
Figura 16-3. Diagrama de esfuerzo cortante - Tubo cuadrado.....	57
Figura 17-3. Diagrama de Momento Flector - Tubo cuadrado.	57
Figura 18-3. Modelado del eje.	59
Figura 19-3. Diagrama de cuerpo libre del eje.....	59
Figura 20-3. Diagrama de momentos máximo y mínimo - Eje.....	60
Figura 21-3. Diagrama de momento amplitud - Eje.	61
Figura 22-3. Diagrama del momento torsor máximo - Eje.	61
Figura 23-3. Diagrama del momento torsor medio - Eje.	61
Figura 24-3. Modelado del eje en Ansys.	64
Figura 25-3. Coeficiente de seguridad del eje.....	64
Figura 26-3. Chaveta Eje - Reductor.	66
Figura 27-3. Esquema de chaveta Eje - Reductor.	66
Figura 28-3. Chaveta Eje - Brida.	68
Figura 29-3. Denominación del eje y agujero para ajustes.	69

Figura 30-3. Diagrama de tolerancias para el eje y chaveta.	71
Figura 31-3. Brida de acople con eje.	71
Figura 32-3. Representación de una brida y sus dimensiones.....	72
Figura 33-3. Modelado de la brida de acople con el eje - Ansys.	74
Figura 34-3. Coeficiente de seguridad de la brida de acople con el eje - Ansys.....	74
Figura 35-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el eje.....	75
Figura 36-3. Brida de acople con el sensor.	77
Figura 37-3. Modelado de la brida de acople con el sensor - Ansys.....	78
Figura 38-3. Coeficiente de seguridad de la brida de acople con el sensor - Ansys.	78
Figura 39-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el sensor.	79
Figura 40-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el mandril.....	80
Figura 41-3. Esquema del sistema de control.	90
Figura 42-3. Pantalla Nextion NX8048T050.	92
Figura 43-3. Página de Presentación de la pantalla.....	93
Figura 44-3. Página de Inicio de la pantalla.....	93
Figura 45-3. Página Principal de la pantalla.	94
Figura 46-3. Página de Ajustes de la pantalla.	94
Figura 47-3. Página de Diagrama de la pantalla.	95
Figura 48-3. Interfaz del programa de conexión Arduino - Excel.	96
Figura 49-3. Diagrama de conexión eléctrica.	97
Figura 50-3. Conexión - Elementos de alimentación.....	97
Figura 51-3. Conexión - Panel de Control.	98
Figura 52-3. Conexión - Pantalla Nextion NX8048T050.	98
Figura 53-3. Conexión - Arduino Mega.....	99
Figura 54-3. Conexión Arduino UNO.	99
Figura 55-3. Conexión - Sensor de torque y módulo Hx711.	100
Figura 56-3. Conexión - FC-03.....	100

Figura 57-3. Conexión - Motor NEMA 23 y Driver TB6600.....	101
Figura 58-3. Conexión - Ventilador.....	101
Figura 59-3. Máquina para ensayos de torsión.	102
Figura 60-3. Bastidor.	104
Figura 61-3. Tableros de madera.	105
Figura 62-3. Base para mordaza y sensor.	105
Figura 63-3. Base para reductor de velocidad.....	105
Figura 64-3. Placa base.	106
Figura 65-3. Eje de transmisión.	106
Figura 66-3. Brida de acople Eje - Mordaza.	106
Figura 67-3. Brida de acople Sensor - Mordaza.	107
Figura 68-3. Caja de control.	107
Figura 69-3. Cursograma de montaje.....	108
Figura 70-3. Sensor de torsión estática Lorenz M-2396.	109
Figura 71-3. Encoder Incremental.	110
Figura 72-3. Encoder incremental FC-03 (LM393).	110
Figura 1-4. Dimensiones de la probeta.	122
Figura 2-4. Probetas ensayadas de nylon.	125
Figura 3-4. Probetas ensayadas de acrílico.	128
Figura 4-4. Probetas ensayadas de PLA.....	131

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3. Factor de servicio (fs).....	84
Gráfico 2-3. Diagrama Velocidad de rotación vs Eficiencia dinámica.....	86
Gráfico 3-3. Curva del motor NEMA 23 -M1233061.....	87
Gráfico 4-3. Curva de histéresis para el sensor de torsión.	112
Gráfico 1-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de nylon.....	123
Gráfico 2-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de nylon.....	123
Gráfico 3-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de nylon.....	124
Gráfico 4-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de nylon.....	124
Gráfico 5-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de acrílico.....	126
Gráfico 6-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de acrílico.....	126
Gráfico 7-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de acrílico.....	127
Gráfico 8-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de acrílico.....	127
Gráfico 9-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de PLA.....	129
Gráfico 10-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de PLA.....	129
Gráfico 11-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de PLA.....	130
Gráfico 12-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de PLA.....	130
Gráfico 13-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación cortante de nylon acrílico y PLA.....	132
Gráfico 14-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de nylon.....	132
Gráfico 15-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de acrílico.....	133
Gráfico 16-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de PLA.....	133

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Propiedades de los aceros estructurales

ANEXO B: Propiedades mecánicas de aceros ASTM.

ANEXO C: Propiedades mecánicas medias de algunos aceros tratados térmicamente.

ANEXO D: Tolerancias de medida.

ANEXO E: Zonas de tolerancia recomendadas agujero único.

ANEXO F: Zonas de tolerancia recomendadas eje único.

ANEXO G: Chavetas paralelas serie normal.

ANEXO H: Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino.

ANEXO I: Clases métricas de propiedad mecánica de pernos, tornillos y birlas de acero.

ANEXO J: Programación de Arduino Mega.

ANEXO K: Programación de Arduino UNO.

ANEXO L: Programación de Visual Basic.

ANEXO M: Planos

RESUMEN

El presente proyecto técnico tuvo como objetivo diseñar y construir una máquina de ensayos de torsión en polímeros. La recopilación de material bibliográfico determinó los parámetros de diseño, principalmente la capacidad máxima establecida en 15 N.m. Se utilizó la metodología del diseño concurrente generando un análisis de selección de alternativas mediante la elaboración de la casa de la calidad. El sistema de control consta de microcontroladores Arduino Mega y Arduino UNO. El sistema de potencia está conformado por un motor NEMA 23 M1233061 y un reductor de velocidad NRV030. La medición de variables se realiza por medio de un encoder rotacional FC-03 y un sensor de torsión Lorentz tipo brida. La pantalla Nextion NX8048T050 permite la visualización de resultados. Los componentes mecánicos se diseñaron y calcularon teóricamente, complementados por la modelación en el software SolidWorks y con el análisis por el método de elementos finitos mediante ANSYS. A través del procedimiento para procesos de mecanizado y cursograma de montaje se procedió a la construcción del equipo. Con la calibración de los sensores se determinó un error relativo porcentual de 0,95% para el sensor de torsión y 0,35% para el sensor de deformación angular. Se realizaron tres ensayos sobre tres distintos materiales: nylon, acrílico y PLA determinando el esfuerzo máximo de torsión y el módulo de rigidez. El análisis del tipo de fractura comprueba si el material presenta un comportamiento dúctil o frágil. Se concluye que la metodología de diseño utilizada es válida puesto que presenta un procedimiento sistemático, buscando las mejores alternativas y optimizando los procesos requeridos. La máquina presenta resultados satisfactorios con una confiabilidad del 95%. Se recomienda que para un correcto funcionamiento de la máquina se haga uso de la guía de ensayo. Además, incursionar en investigaciones sobre ensayos virtuales y control de la máquina de forma remota.

Palabras clave: <ENSAYO DE TORSIÓN>, <MÁQUINA DE TORSIÓN>, <INGENIERÍA CONCURRENTE>, <POLÍMEROS>, <NYLON>, <ACRÍLICO>, <ÁCIDO POLILÁCTICO>, <MÓDULO DE RIGIDEZ>, <ESFUERZO DE TORSIÓN>.



19-11-2020

0450-DBRAI-UPT-2020

ABSTRACT

The objective of this technical project was to design and build a polymer torsion testing machine. The collection of bibliographic material determined the design parameters, mainly the maximum capacity established at 15 N.m. The concurrent design methodology was used, generating an analysis of selection of alternatives through the elaboration of the quality house. The control system consists of Arduino Mega and Arduino UNO microcontrollers. The power system consists of a NEMA 23 M1233061 motor and a NRV030 speed reducer. The measurement of variables is carried out by means of a rotational encoder FC-03 and a Lorentz flange-type torque sensor. The Nextion NX8048T050 screen allows viewing of results. The mechanical components were designed and calculated theoretically, complemented by modeling in SolidWorks software and with analysis by the finite element method using ANSYS. Through the procedure for machining processes and assembly course, the equipment was built. With the calibration of the sensors, a percentage relative error of 0.95% was determined for the torsion sensor and 0.35% for the angular deformation sensor. Three tests were carried out on three different materials: nylon, acrylic and PLA, determining the maximum torsional stress and the modulus of rigidity. The analysis of the type of fracture checks whether the material exhibits a ductile or brittle behavior. It is concluded that the design methodology used is valid since it presents a systematic procedure, looking for the best alternatives and optimizing the required processes. The machine presents satisfactory results with a reliability of 95%. It is recommended to use the test guide for a correct operation of the machine. Also, delve into research on virtual testing and remote machine control.

Keywords: <TORQUE TEST>, <TORQUE MACHINE>, <CONCURRENT ENGINEERING>, <POLYMERS>, <NYLON>, <ACRYLIC>, <POLYLACTIC ACID>, <RIGIDITY MODULE>, <TORQUE STRESS>.

INTRODUCCIÓN

El ensayo a torsión es muy significativo en la actualidad porque permite conocer la tendencia de un material a resistir las fuerzas de torsión antes de que empiece a romperse o agrietarse (Mir, Hassan, 2017). Este tipo de ensayo es aplicado en una gran diversidad de componentes mecánicos como árboles de transmisión, ejes, discos rotativos que están sometidos a un par de torsión (Ibrahim et al., 2014). La máquina de torsión permite realizar este ensayo verificando la fiabilidad y confiabilidad de los diversos componentes que serán utilizados en procesos industriales, mecánicos, etc. Se debe considerar que el material sea homogéneo caso contrario se produce una deformación no uniforme lo que concluirá en toma de datos erróneos (Patil, Gore, 2013). Las pruebas más comunes en el ensayo de torsión son: la prueba de falla (se tuerce el material) y la de prueba periódica (se aplica torque durante un período de tiempo hasta el fallo del material). En estos ensayos se observa cuál es el valor máximo de torque que soporta el material (Mir, Hassan, 2017).

Para la construcción de nuestro equipo se tomó como base los siguientes trabajos: “Diseño y construcción de un banco para ensayos de torsión”, en la ciudad de Loja indica cómo se efectúa el ensayo a torsión. Se basa en la prueba periódica que observa el comportamiento del material midiendo el ángulo de giro y el torque aplicado (Castillo Cuenca, 2011). El trabajo “Diseño y construcción de un banco para pruebas de torsión”, en el departamento de Bogotá presenta los criterios y parámetros para el diseño y selección de los componentes de la máquina (Garzón, Urrea, Ussa, 2019). El trabajo “Repotenciación del sistema de adquisición de datos de la máquina de torsión del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica”, en la ciudad de Riobamba da a conocer la norma aplicada en el ensayo la cual es ASTM E 143-02 Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature (Pillajo, Suárez, 2018). Esta norma es aplicada para aceros, pero se utilizará como referencia para la elaboración del ensayo en polímeros. Además, este trabajo manifiesta como realizar la adquisición de datos por medio de sensores su visualización mediante un HMI o la conexión directa a un computador.

En la ciudad de Riobamba, particularmente en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el grupo de investigación GIEBI se ha centrado en la aplicación de polímeros mediante exoesqueletos que permiten la rehabilitación de personas con problemas de movilidad. Se desea incursionar en este campo de los polímeros que en la actualidad está en auge y presenta una gran influencia en el mundo comercial sustituyendo otros materiales. Por tal motivo en este trabajo se diseñó y construyó una máquina de torsión exclusivamente para ensayos de

polímeros. Esta máquina permite conocer el comportamiento de este material cuando está sometido a torsión estableciendo sus características.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

En el campo ingenieril, el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales es de gran relevancia a la hora de realizar diseños de máquinas o sistemas. Al ser las propiedades mecánicas un parámetro cuantitativo, estas brindan información clara del comportamiento del material frente a distintos fenómenos físicos como, por ejemplo, la resistencia a la torsión. Su importancia radica en que permiten conocer la capacidad de resistencia del material cuando están expuestos a estos agentes externos que generalmente se presentan como esfuerzos y deformaciones. Además, se pueden realizar comparaciones entre distintos materiales para determinar cuál de ellos se desenvuelve mejor en las aplicaciones o requerimientos donde van a ser utilizados.

En el trabajo “Torsional Testing” se presenta los parámetros principales a considerar en un ensayo a torsión para determinar la calidad de ciertos materiales utilizados en la industria (Kanchwala et al., 2018).

En el estudio del trabajo “Review the Effect of Specimen Geometry on Torsion Test Results” se analizaron las diferentes geometrías en las probetas, las principales son las de sección sólida y tubular. Se identifica que las probetas tubulares presentan una mayor confiabilidad que aquellas de sección transversal sólida (Patil, Gore, 2013).

En el trabajo “Construction and validation tests of a torsion test machine” se analizan tres tipos de materiales: acero, aluminio y cobre, estudiando los efectos de porosidades, determinando que su presencia no es permitida en las probetas que se van a utilizar en el ensayo (Bressan, Unfer, 2006).

Por medio del trabajo “Diseño y construcción de una maquina básica de ensayos destructivos de tracción y torsión” y el trabajo “Repotenciación del sistema de adquisición de datos de la máquina de torsión del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Mecánica” se determina que para una óptima obtención de resultados el uso de sensores precisos es indispensable (Pillajo, Suárez, 2018). Además, el proceso de verificación de los datos obtenidos, evitando errores de medición que afecte los resultados del ensayo (Moreno, 2006).

El Grupo de Investigación y Estudio de Bioingeniería (GIEBI) perteneciente a la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) ha incursionado en el

campo de la bioingeniería y a la aplicación de los polímeros en ella. El grupo de investigación GIEBI ha desarrollado diversas investigaciones en el campo de la bioingeniería como, por ejemplo, prototipos de exoesqueletos para la rehabilitación de miembros inferiores, prótesis mecánicas para miembros superiores y el desarrollo de férulas, siendo todos estos tipos de prototipos desarrollados a base del material polimérico.

Para comprobar la resistencia mecánica de sus productos realizaron diferentes pruebas entre ellas ensayos de impacto en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) y ensayos de tracción en la Escuela Politécnica Nacional (EPN) obteniendo resultados satisfactorios, ya que sus equipos son de uso específico para polímeros. Uno de los inconvenientes es la falta de un equipo para realizar específicamente ensayos de torsión en polímeros, ya que se utilizan las máquinas para ensayos en materiales metálicos. El GIEBI tampoco dispone de una máquina para ensayos de torsión en polímeros, por tal motivo, han realizado pruebas en la máquina de torsión para metales que posee el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la ESPOCH.

1.2 Formulación del Problema

El Grupo de Investigación y Estudio de Bioingeniería (GIEBI) - ESPOCH incursiona en el desarrollo de temas que tienen beneficios tanto para los estudiantes como para sectores específicos de la sociedad. Sus trabajos involucran principalmente investigaciones en el campo de la bioingeniería y tienen como objetivo beneficiar a personas con movilidad reducida. Para solucionar los problemas a los que se ven enfrentados recurren al uso de diversos tipos de materiales, donde uno de los grupos más recurrentes son los polímeros debido a su versatilidad. El GIEBI hace uso frecuente de las impresiones 3D para generar sus prototipos, en ellos varían parámetros como el porcentaje y tipo de relleno y la altura de capa. Las impresiones en el material PLA pueden presentar diferentes combinaciones de los parámetros mencionados anteriormente, alterando sus propiedades mecánicas, por tal motivo, el grupo de investigación busca analizar y obtener las mejores propiedades posibles en este tipo de material. La máquina de torsión, que será destinada específicamente al ensayo de polímeros busca saciar esta necesidad, brindando de información importante acerca de los materiales que se usan comúnmente en sus prototipos como la impresión 3D, con el fin de optimizar sus diseños y funcionamiento.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

El presente proyecto busca mediante conceptos básicos de la literatura científica y diseño encontrar una óptima solución para la construcción de la máquina para ensayos de torsión de polímeros. La utilización de esta máquina está destinada para trabajos de investigación

experimentales. El presente trabajo se convierte en un modelo para la construcción de este tipo de máquinas utilizadas para materiales poliméricos. En el documento se presenta información detallada acerca del diseño y selección de los elementos mecánicos y electrónicos que componen la máquina. Además, posee información sobre las conexiones de los componentes electrónicos y el funcionamiento del sistema de control. La información presentada proporciona las propiedades mecánicas relacionadas a la torsión de distintos polímeros como nylon, acrílico e impresiones en 3D con PLA. Por lo tanto, el documento se convierte en una referencia útil para futuros trabajos e investigaciones que se centren en el diseño y construcción de este tipo de máquinas.

1.3.2 Justificación Metodológica

Para el diseño del proyecto se procederá al diseño concurrente el cual consiste en una metodología donde el diseño del producto está integrado en todos los procesos necesarios para fabricarlo. Se realizará una revisión bibliográfica recolectando información de artículos científicos, tesis y libros que establezcan la base y fundamentos para la realización del trabajo. Después se procederá con un estudio de los diversos componentes y elementos que se requieren para la constitución de la máquina. Esto se realiza con el fin de seleccionar la alternativa que mejor se adapte a las necesidades y cumpla con los requerimientos establecidos. Una vez realizado el diseño se procederá con la construcción de esta apoyados en las tecnologías CAE CAD CAM durante todo el proceso.

1.3.3 Justificación Práctica

En la actualidad el uso de los polímeros va en auge en el mercado, pero no es muy común encontrar una máquina que realice ensayos de torsión específicamente para este tipo de material. Esta máquina realizará ensayos exclusivamente para polímeros, como nylon, acrílico y PLA obteniendo como resultado las propiedades mecánicas referentes a la torsión, como por ejemplo las curvas de esfuerzo-deformación a cortante, el esfuerzo máximo de resistencia a la torsión y el módulo de rigidez del material. Además, esta máquina no presenta un costo muy elevado y proporciona resultados respecto al comportamiento que presentan los materiales al estar sometidos torsión. Los resultados que brinda el equipo presentan una gran utilidad para las investigaciones que realiza el GIEBI.

1.4 Alcance

El presente proyecto tiene como fin el diseño y construcción de una máquina de torsión para ensayos de polímeros. Esta máquina tiene una capacidad máxima de 15 N m, es automática y posee una pantalla para el ingreso de los parámetros del ensayo y la visualización de los resultados. Permite también la conexión con el computador para la transferencia de los datos

obtenidos durante la prueba. La máquina permite determinar las propiedades mecánicas tales como módulo de rigidez y resistencia a la torsión. Esta máquina se encuentra calibrada para realizar los ensayos, pero su certificación queda a consideración del grupo de investigación. Además, se dispondrá de una guía de operación y mantenimiento que asegure el correcto uso de la máquina.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar y construir una máquina para ensayo de torsión en polímeros.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de la literatura y fundamentos teóricos sobre el proceso para ensayos de torsión
- Determinar los parámetros funcionales y realizar el diseño de la máquina utilizando criterios de selección para cumplir con todos los requerimientos.
- Construir la máquina en base al diseño propuesto.
- Realizar las pruebas de funcionamiento de la máquina tanto en vacío como con carga.
- Elaborar una guía para el ensayo de torsión para polímeros.
- Realizar distintos ensayos con polímeros con el fin de analizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 Máquina de Torsión

La máquina de torsión tiene como finalidad realizar el ensayo a torsión en diversos materiales para lo cual se utiliza una probeta normalizada. Además, consta de sistemas de medición que determinan el ángulo de rotación como el momento o par de torsión que se genera durante el ensayo. Con el paso del tiempo las máquinas de torsión han ido progresando tecnológicamente logrando una mayor precisión y exactitud en los resultados generados (Ávila et al., 2017).

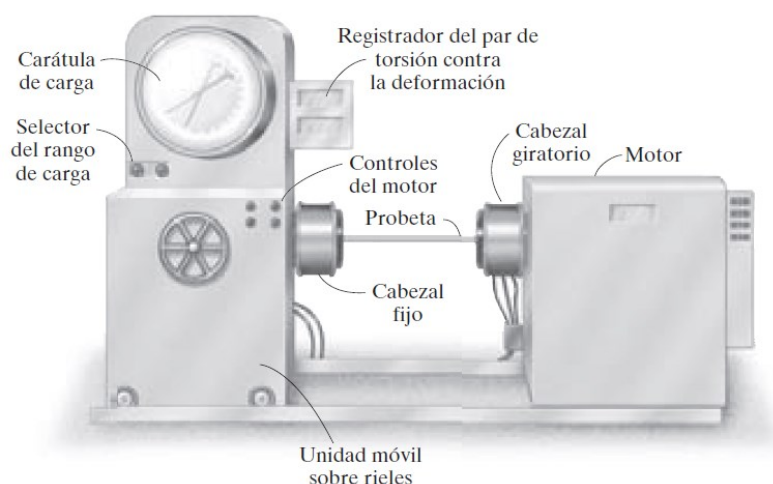


Figura 1-2. Máquina de ensayo de torsión.

Fuente: (Hibbeler, 2006, p. 202).

2.1.1 Estado actual de las máquinas de torsión

Al comienzo las máquinas de torsión tenían un funcionamiento de forma manual y la toma de datos se realizaba visualmente lo que generaba errores, propios de la forma de operación de la máquina. Un ejemplo de este tipo de equipos fue el de Riehle-Miller (Silva, Arroyave, 2016). Después mejoró su funcionamiento con la utilización de un motor eléctrico. Además, se incluyó la automatización completa con la adaptación de equipos electrónicos en el proceso de recolección de datos y obtención de resultados, logrando una mayor confiabilidad y precisión en ellos (Castillo Cuenca, 2011).

En la actualidad existen diversos equipos en el mercado para este tipo de ensayos. Describiremos las características de los equipos más reconocidos y que sirvieron de referencia para el diseño de la máquina de torsión para polímeros desarrollada en este documento.

Máquina para el ensayo de torsión de IBERTEST.

Esta máquina posee un sistema de mando computarizado, lo que dota al equipo una automatización completa. Posee un paquete de software llamado Wintest.tor que permite obtener informes completos sobre el ensayo con datos como: dimensiones de la probeta, sentido de giro, número de vueltas, velocidad (rpm), par máximo del ensayo (N.m) y tensión cortante (MPa). Su capacidad depende del modelo seleccionado, con un rango desde 10 N.m hasta 1000 N.m (IBERTEST, 2020).



Figura 2-2. Máquina para ensayo de torsión IBERTEST.

Fuente: (IBERTEST, 2020).

Máquina para el ensayo de torsión Tinius Olsen modelo 398.

Este equipo permite generar un alto torque, con una capacidad de hasta 300 000 lbf.in (30 000 N.m). Está dotado de un display digital, permite la aplicación del torque a velocidad variable y a dos direcciones, lo que permite realizar pruebas en condiciones de carga continua o intermitente en ambas direcciones. Posee un sensor de bandas extensiométricas con una precisión de $\pm 0.5\%$ del torque aplicado. Permite probetas que van desde 8 mm hasta 38 mm de diámetro con una longitud máxima de 45 cm (Tinius Olsen, 2020).



Figura 3-2. Máquina para el ensayo de torsión Tinius Olsen modelo 398.

Fuente: (Tinius Olsen, 2020).

Máquina para el ensayo de torsión de la serie NJS-Z.

Está diseñada y construida para realizar el ensayo de torsión tanto en materiales metálicos como no metálicos. La máquina posee un servomotor combinado con un reductor de velocidad. El ángulo de torsión y par de torsión se miden mediante un transductor de alta precisión. Posee un teclado digital y un display LCD que muestra los datos en tiempo real. Además, posee una micro impresora que entrega los resultados del ensayo (UnitedTest, 2020).



Figura 4-2. Máquina para el ensayo de torsión de la serie NJS-Z.

Fuente: (UnitedTest, 2020).

Máquina para el ensayo de torsión de la serie MT de INSTRON.

Este equipo está diseñado principalmente para pruebas de torsión de baja capacidad, con un torque máximo de 225 N.m. Posee una alta exactitud y está dotado de una celda de par conectado a la mordaza móvil, la cual se puede dejar libre o fija durante la realización del ensayo. El movimiento y par se genera mediante un servo motor. Además, la máquina posee un accionamiento electromecánico que es proporcionado por control electrónico y el uso del software Bluehill (INSTRON, 2020).



Figura 5-2. Máquina para el ensayo de torsión de la serie MT de INSTRON.

Fuente: (INSTRON, 2020).

2.1.2 Componentes principales de una máquina de torsión

La máquina de torsión posee una bancada en la cual se adecuan los diversos equipos como motor, una caja reductora si es necesario, mordazas de sujeción e instrumentos de medición. (Cautela, Moscianese, 2005)

- **Bancada:** Es la base de la máquina, en ella se acoplan los diversos componentes de esta y soportará los esfuerzos producidos por el ensayo de torsión. Debe ser construida de modo que permita tener una buena resistencia y rigidez.
- **Motor:** Es uno de los principales elementos de la máquina. Acoplado a uno de los extremos del equipo transforma la energía eléctrica en movimiento rotacional, transmitiendo a la mordaza de sujeción móvil el torque necesario para realizar el ensayo. Si el torque del motor no es suficientemente alto se puede utilizar una caja reductora.
- **Caja Reductora:** Es un elemento mecánico cuya función es incrementar el torque que proporciona el motor a costo de una reducción de su velocidad angular, logrando así la cantidad requerida de momento para el ensayo. Es muy común su uso en este tipo de máquinas puesto que no es necesario una gran velocidad, pero sí un alto torque. Se pueden encontrar en diversos tipos y con diferentes relaciones de transmisión, que van en el orden de 2:1 hasta 100:1, donde el primer número indica las revoluciones del motor mientras que el segundo las revoluciones a la salida de la caja reductora. Entre los diferentes tipos existen las cajas reductoras de engranajes rectos, cónicos o helicoidales, y aquellos que su función se basa en engranajes de tornillo sin fin, estos últimos son los más utilizados cuando se necesita una relación de transmisión elevada (Yeh, Wu, 2009).
- **Mordazas de sujeción:** Estos elementos permiten sujetar la probeta durante el ensayo. Deben poseer la fuerza de ajuste necesaria para evitar que la probeta se deslice durante la prueba (Feng et al., 2008). En la máquina de torsión existen dos mordazas, una de ellas debe permanecer fija y comúnmente instalada junto al sensor de torque; mientras que la otra se conecta al eje de salida del motor (o al eje de salida de la caja reductora, si es el caso) transmitiendo el movimiento de rotación hacia la probeta durante en el ensayo (Valera, 2012).
- **Instrumentos de medición:** Un instrumento de medición, como su palabra lo indica, es aquel que permite medir una magnitud física ya sea de un objeto o de un fenómeno físico que tenga lugar. En un ensayo de torsión las dos variables principales que deben ser medidas son el torque que se transmite hacia la probeta y la deformación angular que esta sufre durante el ensayo. El ángulo de giro se mide a través de un encoder rotacional incremental, cuyo funcionamiento está basado en el efecto de reflexión interna y que posee características como mayor resolución, buena precisión, tiempo de respuesta y menor tamaño (Tobita et al., 2005).

Para el caso del par de torsión las celdas de carga son altamente empleadas, estas convierten la variable física de fuerza en una señal análoga eléctrica. Su funcionamiento está basado en el puente de Wheatstone (Castro Perez, Espinosa Silva, 2005). Estos instrumentos poseen distintas características como precisión, exactitud, resolución, repetibilidad y sensibilidad (Solé, 2012).

2.1.3 Funcionamiento de la máquina de torsión

El principio de funcionamiento de una máquina para ensayos de torsión es sencillo, pues su función principal es transmitir el torque proporcionado desde una fuente de potencia (ya sea manual o mediante un motor) hacia la probeta a ensayar, produciendo una deformación angular en ella hasta que se produzca su ruptura. Para ello la máquina de torsión posee dos cabezales, uno móvil y otro fijo. Se coloca la probeta en las mordazas de fijación de ambos cabezales de modo que tengan una buena fuerza de sujeción que impida el deslizamiento de la probeta con relación a los dientes de las mordazas. Cuando se enciende el sistema el motor junto con la caja reductora transmiten el movimiento de rotación y el torque necesario para realizar el ensayo, produciendo la deformación angular en la probeta hasta que se genere la fractura de esta. Mientras se realiza el ensayo los instrumentos de medición registrarán los cambios en las variables de torque y desplazamiento angular, que pueden ser visualizados en un panel de control, o en una interfaz usuario-máquina. Al finalizar el ensayo se tendrá el registro de los valores tanto de torque aplicado como del ángulo de giro, que serán analizados posteriormente determinando las propiedades del material ensayado.

2.2 Esfuerzo de torsión

El esfuerzo de torsión es aquel que se produce cuando un momento o par de torsión es aplicado sobre un área de sección transversal provocando una deformación angular. “El par de torsión se trata de un momento que tiende a torcer un elemento sobre su eje longitudinal” (Hibbeler, 2006, p. 179).

Para (Ortiz Berrocal, 1991), “un prisma mecánico se encuentra sometido a torsión cuando tiene un momento en dirección del eje x (momento axial)”.

El par de torsión es una cantidad vectorial que se representa mediante flechas curvas (figura 6-2a) o por vectores de par (figura 6-2b).

Para mostrar cómo se produce la deformación angular sobre un elemento ilustraremos en la figura 7-2 el efecto que produce la torsión sobre un cuerpo cilíndrico. Al aplicar el par de torsión los círculos y las líneas longitudinales que forman la cuadrícula marcada en el eje en la figura 7-2a tienden a distorsionarse para formar el patrón mostrado en la figura 7-2b.

Como se puede observar “los círculos se conservan como círculos, y cada línea longitudinal de la cuadrícula se deforma en una hélice que interseca los círculos en ángulos iguales. Además, las líneas radiales se conservan rectas durante la deformación” (Hibbeler, 2006, p. 179).

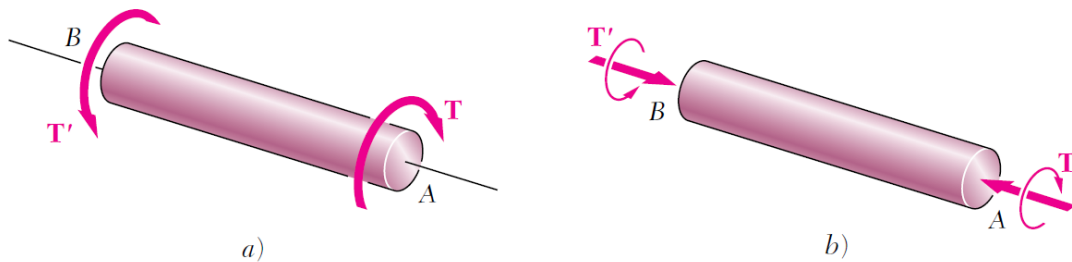


Figura 6-2. Representación del par de torsión.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 132).

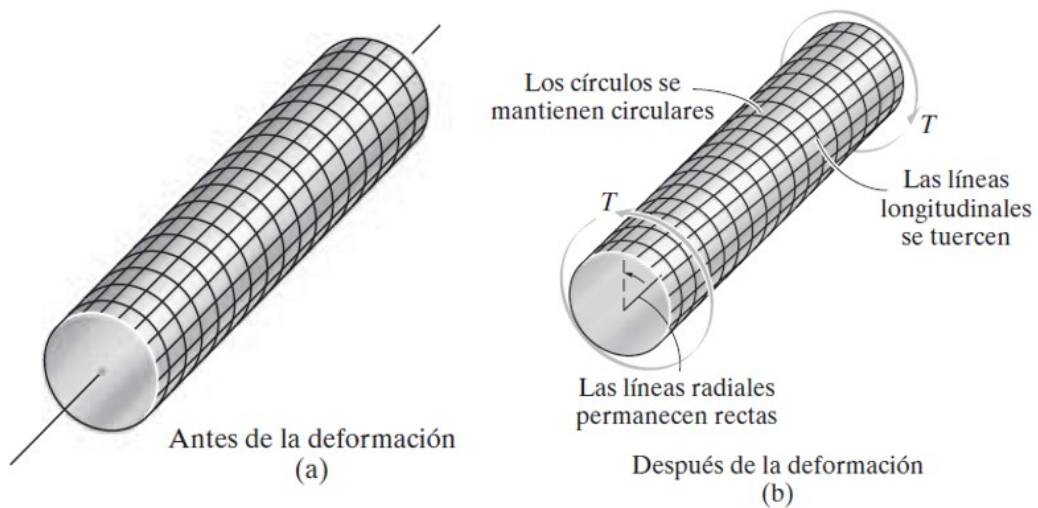


Figura 7-2. Efecto de un par de torsión T sobre un eje circular sólido.

Fuente: (Hibbeler, 2006, p. 180)

Dicho de otra manera, aunque las secciones transversales a lo largo del eje giran en distintos ángulos, cada sección gira como una placa sólida rígida. Con esta propiedad se determina la distribución de los esfuerzos cortantes sobre un eje circular. Además, establece que la deformación a cortante varía linealmente con la distancia desde el eje de la flecha (Beer et al., 2007, p. 133).

En la figura 8-2a podemos observar un eje de radio c y longitud L que está unido a un soporte fijo en uno de sus extremos y con un par de torsión aplicado al otro extremo. Esto produce que el eje gire en su extremo libre a través de un ángulo ϕ llamado ángulo de giro, el cual es proporcional a la longitud L , es decir, que mientras más largo sea el eje, mayor será el ángulo de giro.

En la figura 8-2b se ha desprendido del eje un cilindro de radio ρ y se observa la deformación unitaria cortante γ , que se mide por el cambio en los ángulos formados por los lados de un elemento, en este caso corresponde al ángulo entre las líneas AB y A'B' (Beer et al., 2007, p. 138-139).

La deformación a cortante γ es proporcional al ángulo de giro ϕ . Además, es proporcional a la distancia ρ desde el eje de la flecha hasta el punto bajo consideración respondiendo a la siguiente relación:

$$\gamma_{\text{máx}} = \frac{c \cdot \phi}{L} \quad (1)$$

Dónde:

$\gamma_{\text{máx}}$ = Deformación a cortante máximo (rad)

c = Radio exterior del eje (mm)

ϕ = Ángulo de giro (rad)

L = Longitud del eje (mm)

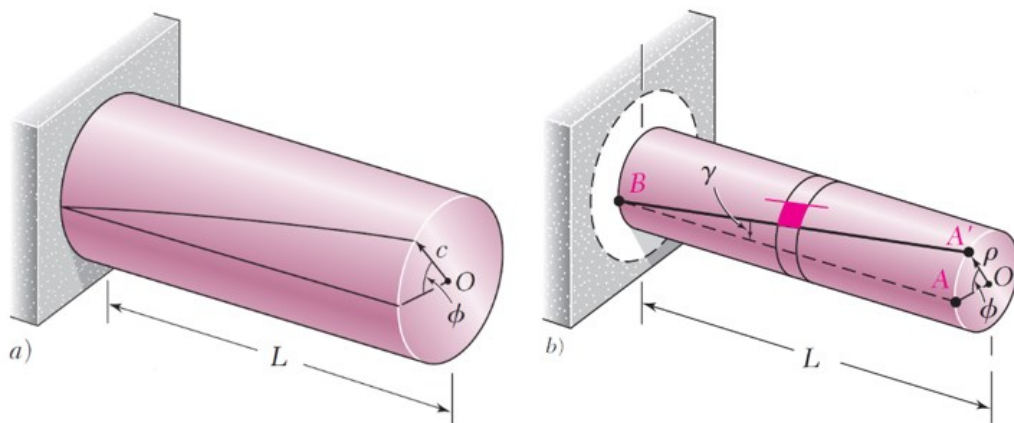


Figura 8-2. Eje circular sólido fijo en un extremo y sometido a par de torsión en el otro.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 138).

Esta variable γ (deformación a cortante) es de gran importancia al momento de deducir tanto la fórmula del esfuerzo a torsión como la del ángulo de giro aplicando la relación que establece la Ley de Hooke. Esta ley establece que la deformación elástica que experimenta un cuerpo es proporcional a la fuerza que la origina, mientras que no se exceda el límite de elasticidad (Sanger, 2005).

2.2.1 Ecuaciones aplicadas en el ensayo de torsión

2.2.1.1 Esfuerzo cortante

Si consideramos al material como elástico lineal, se puede aplicar la ley de Hooke $\tau = G\gamma$, lo que genera que cualquier variación lineal en la deformación cortante producirá una variación lineal en el esfuerzo cortante. Es decir, que la distribución del esfuerzo cortante es lineal variando desde 0 en el centro del eje hasta $\tau_{m\acute{a}x}$ en su extremo c para ejes s\u00f3lidos como se muestra en la figura 9-2a, y variando desde un valor de $\tau_{m\acute{i}n}$ en c_1 hasta un valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ en c_2 en el caso de ejes tubulares como se observa en la figura 9-2b.

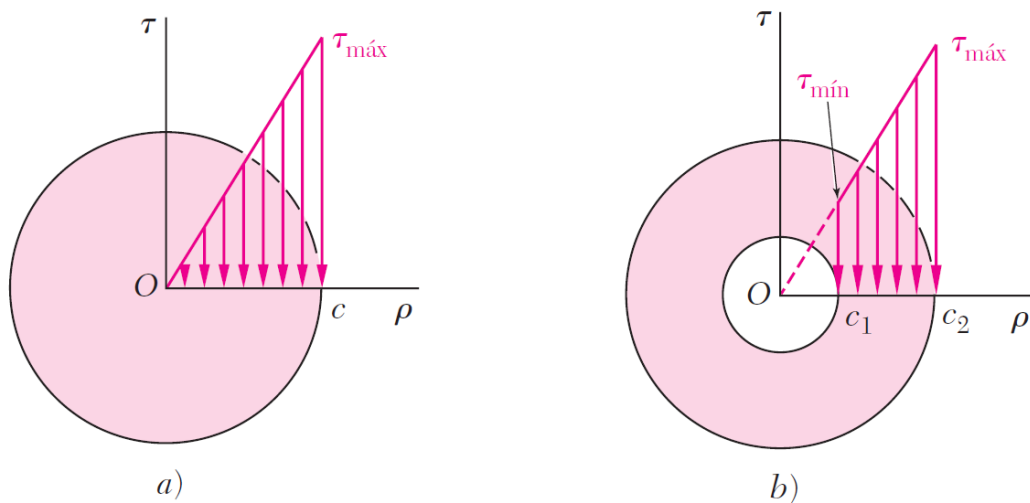


Figura 9-2. Distribuci\u00f3n de esfuerzos cortantes en un eje circular s\u00f3lido y en eje tubular.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 139).

La f\u00f3rmula para obtener el esfuerzo de torsi\u00f3n m\u00e1ximo en el rango el\u00e1stico es la siguiente:

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (2)$$

D\u00f3nde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo cortante m\u00e1ximo en el eje (MPa)

T = Par de torsi\u00f3n aplicado ($N \cdot mm$)

J = Momento polar de inercia (mm^4)

c = Radio exterior del eje (mm)

El momento polar de inercia depende de la geometr\u00eda de la secci\u00f3n transversal y siempre es positiva (Beer et al., 2011, p. 477 ; Loayza, 2016).

Para una sección transversal circular sólida de radio c el momento polar de inercia se calcula con la siguiente fórmula:

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (3)$$

Mientras que para una sección transversal circular hueca de radio interior c_1 y radio exterior c_2 tenemos la siguiente relación:

$$J = \frac{\pi}{2} (c_2^4 - c_1^4) \quad (4)$$

2.2.1.2 *Ángulo de giro*

Dentro del rango elástico el ángulo de giro ϕ es proporcional al par de torsión T aplicado al eje y responde a la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad (5)$$

Donde:

ϕ = Ángulo de giro (rad)

T = Par de torsión aplicado (N · mm)

L = Longitud del eje (mm)

G = Módulo de elasticidad cortante para el material (MPa)

J = Momento polar de inercia (mm⁴)

En el ensayo de torsión se busca determinar el Módulo de elasticidad cortante o Módulo de rigidez G , el cual se obtiene a partir de la ecuación 5, al conocer la longitud y diámetro de la probeta. Después, se mide el par de torsión T aplicado y el ángulo de giro ϕ , al graficar los puntos obtenidos se genera una línea recta cuando no se excede el esfuerzo de cedencia. Se recomienda hacer varios ensayos y obtener un valor de G promedio.

2.2.2 *Torsión inelástica*

Cuando el par de torsión que se aplica sobre el eje es excesivo el material puede presentar cedencia, lo que conlleva a realizar un “análisis plástico” para determinar la distribución del esfuerzo cortante y el ángulo de giro (Hibbeler, 2006, p. 237).

Consideramos un material que presenta un comportamiento elástico perfectamente plástico cuyo diagrama esfuerzo - deformación a cortante es como el que se muestra en la figura 10-2.

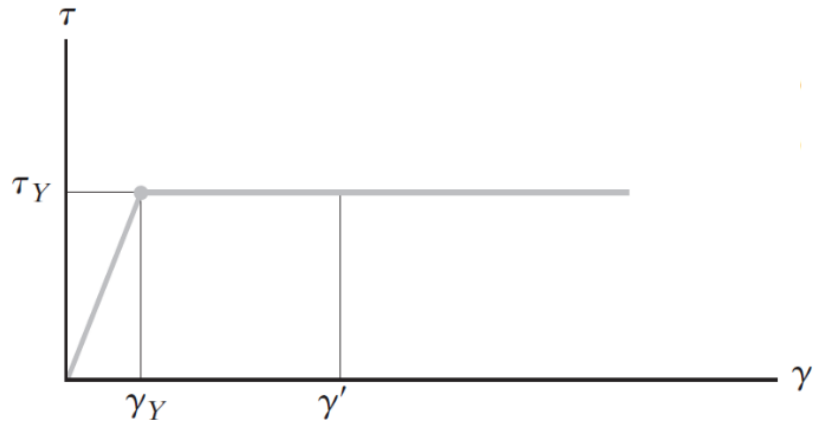


Figura 10-2. Diagrama esfuerzo - deformación a cortante de un material elastoplástico.

Fuente: (Hibbeler, 2006, p. 238).

En el diagrama se puede observar los puntos que identifican la resistencia de cedencia (τ_y) y deformación cortante elástica máxima (γ_y), las cuales se producen cuando se aplica el par de torsión máximo elástico (T_y). En ese punto la distribución de esfuerzos cortantes permanece lineal, tal como se muestra en la figura 11-2a. Al aumentar el par de torsión se desarrolla dos regiones en el eje, una región plástica que rodea un núcleo elástico de radio ρ_y (figura 11-2b). Si seguimos aumentando el par de torsión, la región plástica se expande hasta que, en el límite, la deformación es completamente plástica (figura 11-2c) y el par aplicado se conoce como par de torsión plástico (T_p) (Beer et al., 2007, p. 175).

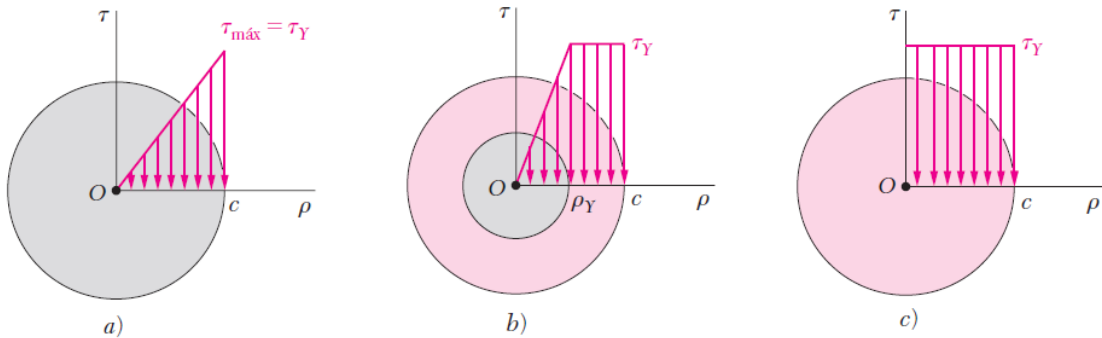


Figura 11-2. Distribución de esfuerzos cortantes.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 175).

El par de torsión plástico se calcula mediante la siguiente relación:

$$T_p = \frac{4}{3} T_y \quad (6)$$

Es decir, que el par de torsión plástico es 33% mayor que el par de torsión elástico máximo.

Al comparar el diagrama esfuerzo - deformación a cortante de la figura 10-2, con el diagrama torque - ángulo de giro de la figura 12-2 que se basaron en el mismo material elastoplástico ideal, se puede observar que difieren en gran medida. Como se sabe no se puede obtener el diagrama esfuerzo-deformación a cortante de un material real directamente a través de un ensayo de tensión aplicado a una varilla sólida circular. No obstante, se puede obtener un diagrama bastante exacto a partir de un ensayo de torsión si la probeta posee una región que consista en tubo circular delgado. Con el fin de minimizar la posibilidad de falla por pandeo, la longitud de la porción tubular no debe ser más larga que su diámetro. Es así como puede suponerse que el esfuerzo tiene un valor constante τ reduciendo la ecuación (2) a la siguiente:

$$\tau = \frac{T}{\rho \cdot A} \quad (7)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante en el eje (MPa)

T = Par de torsión aplicado (N · mm)

ρ = Radio promedio en el tubo (mm)

A = Área de sección transversal (mm²)

Por otra parte, los valores de la deformación a cortante γ pueden obtenerse de la ecuación (1) y de los valores de ϕ y L medidos en la porción tubular (Beer et al., 2007, p. 176).

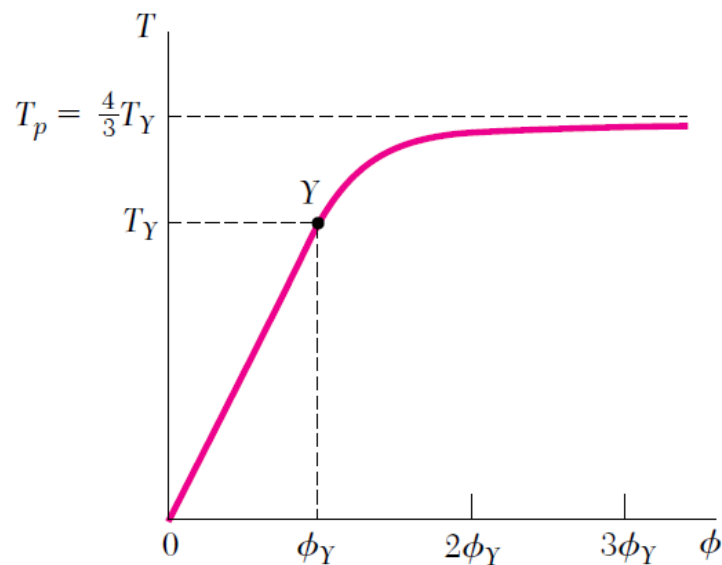


Figura 12-2. Diagrama Torque - Ángulo de giro.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 176).

La mayoría de los materiales utilizados en ingeniería describen un diagrama de esfuerzo-deformación cortante como el mostrado en la figura 13-2. En este diagrama se puede observar el punto máximo (τ_u, γ_u) que indica que se ha producido la falla del material.

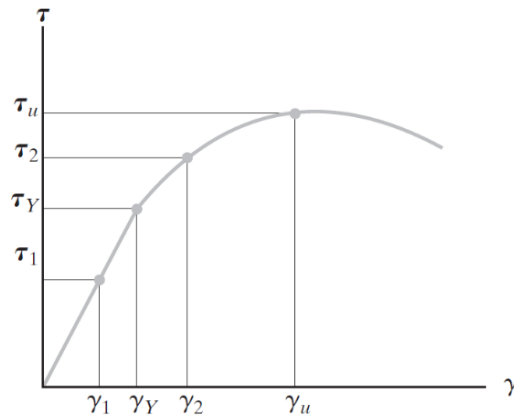


Figura 13-2. Diagrama esfuerzo - deformación a cortante.

Fuente: (Hibbeler, 2006, p. 241).

El par que causa la falla del eje se conoce como par último (T_U) el cual por conveniencia se determina experimentalmente, torciendo una probeta de un material dado hasta romperlo. Se debe suponer una distribución de esfuerzos lineal ficticia y mediante la ecuación (2) se determina el módulo de ruptura a torsión (R_T) de la siguiente manera:

$$R_T = \frac{T_U \cdot c}{J} \quad (8)$$

En la figura 14-2 se muestra la distribución de esfuerzos real y ficticia cuando se aplica T_U . Las áreas que delimitan las distribuciones deben poseer el mismo momento de inercia respecto al eje vertical por lo que se concluye que el módulo de ruptura (R_T) siempre será mayor que el valor real del esfuerzo cortante último (τ_U) (Beer et al., 2007, p. 173-174).

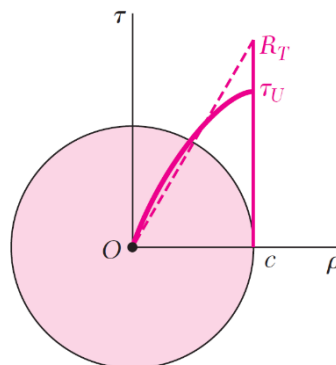


Figura 14-2. Distribución de esfuerzos real y ficticio.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 174).

2.3 Ensayo de torsión

El ensayo de torsión somete a una probeta a un momento o par de torsión aplicado a un extremo del eje mientras el otro extremo está fijo, lo que provoca en ella una deformación a cortante hasta llegar a la fractura o fallo. Por medio de este ensayo se determinan propiedades mecánicas principalmente el módulo de elasticidad cortante G y la curva esfuerzo - deformación a cortante donde se observa la respuesta del material frente a la aplicación del par de torsión. Los resultados obtenidos en el ensayo dan un claro panorama del comportamiento del material al estar sometido a un esfuerzo de torsión, datos muy útiles al momento diseñar elementos de máquinas y seleccionar materiales.

2.3.1 Procedimiento del ensayo de torsión

El procedimiento general para el ensayo de torsión se detalla a continuación:

- Medir el diámetro y la longitud de la probeta a ensayar.
- Sujetar y ajustar los extremos del espécimen a ensayar con las mordazas del equipo, asegurando que no exista deslizamiento entre las estas y la probeta.
- Ingresar los parámetros iniciales en el equipo.
- Iniciar el ensayo de torsión.
- Realizar la toma de datos mientras se desarrolla el ensayo hasta que se produzca la falla.
- Observar la deformación del material.
- Determinar la clase de material de acuerdo con el tipo de falla que se produjo.
- Analizar los datos obtenidos.

2.3.2 Resultados del ensayo de torsión

Los resultados que se obtiene del ensayo de torsión son:

- El módulo de rigidez o módulo de elasticidad cortante G promedio.
- Gráfica Par de torsión vs Ángulo de giro T vs ϕ .
- Gráfica Esfuerzo vs Deformación a cortante τ vs γ .

Además, por medio del análisis del tipo de falla que se produce podemos determinar si el material ensayado presenta un comportamiento dúctil o frágil.

2.3.3 Aspectos importantes del ensayo de torsión

En este apartado se analizará la forma de los tipos de fallas que se producen en el ensayo de torsión. Además, se realiza una comparación entre las probetas cilíndricas macizas y huecas.

2.3.3.1 Tipos de fallas por esfuerzo a torsión

Dependiendo de la orientación del elemento elegido, los esfuerzos normales, los esfuerzos cortantes o una combinación de ambos pueden encontrarse bajo la misma condición de carga. En la figura 15-2 podemos observar un eje sometido a un par de torsión T en los cuales seleccionamos dos elementos orientados de diferente manera. Las caras del elemento a son paralelas y perpendiculares al eje de la flecha. En este elemento solo actúan esfuerzos cortantes $\tau_{m\acute{a}x}$. El elemento c se ha girado 45° respecto al elemento a y para analizar que esfuerzos se producen en él utilizamos el análisis de cuerpo libre que se muestra en la figura 16-2.

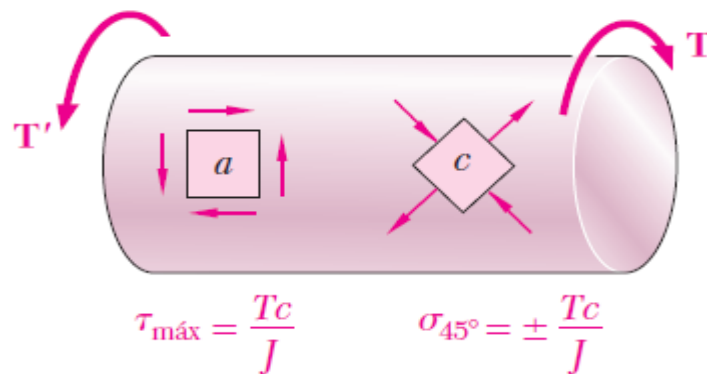


Figura 15-2. Elementos superficiales de un eje sometido a un par de torsión T .

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 142).

En la figura 16-2a los esfuerzos en las caras BC y BD son los esfuerzos cortantes $\tau_{m\acute{a}x}$ que al multiplicar por la cara donde actúan (A_o) se obtiene la fuerza cortante. En la cara DC se produce una fuerza F para cumplir con la ley de equilibrio. Se trata de una fuerza de tensión cuya magnitud es:

$$F = 2(\tau_{m\acute{a}x} \cdot A_o)\cos 45^\circ = \tau_{m\acute{a}x} \cdot A_o \cdot \sqrt{2} \quad (9)$$

Como el área en la que actúa la fuerza F es igual a $A = A_o \cdot \sqrt{2}$ el esfuerzo que se produce en la cara DC será:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\tau_{m\acute{a}x} \cdot A_o \cdot \sqrt{2}}{A_o \cdot \sqrt{2}} = \tau_{m\acute{a}x} \quad (10)$$

Si se realiza el mismo análisis en la figura 16-2b el esfuerzo sobre la cara BE es $\sigma = -\tau_{m\acute{a}x}$. Concluimos que los esfuerzos ejercidos sobre las caras de un elemento c a 45° al eje de la flecha son esfuerzos normales iguales a $\pm\tau_{m\acute{a}x}$. Entonces, mientras que el elemento a se encuentra sometido a cortante puro, el elemento c está sometido a esfuerzos de tensión en dos de sus caras, y a un esfuerzo de compresión en las otras dos.

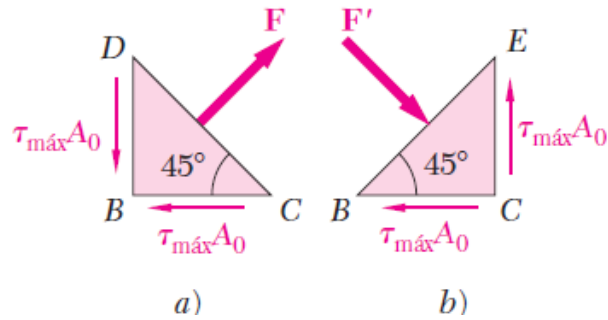


Figura 16-2. Diagrama de cuerpo libre del elemento c.

Fuente: (Beer et al., 2007, p. 142).

Los materiales dúctiles generalmente fallan a cortante, por lo tanto, una probeta hecha de ese material se rompe a lo largo de un plano perpendicular a su eje longitudinal (figura 18-2a). Por otro lado, los materiales frágiles son más débiles a tensión que a corte. Por ello, si se trata de un material frágil este se fracturará a lo largo de superficies perpendiculares a la dirección en que la tensión es máxima, es decir, de superficies que forman un ángulo de 45° con el eje de la flecha (figura 18-2b) (Beer et al., 2007, p. 142).

Se demostró que el esfuerzo cortante varía linealmente a lo largo de cada línea radial de la sección transversal del eje. Pero al aislar un elemento de esta sección, como se muestra en la figura 17-2, debido a la propiedad complementaria de la fuerza cortante, aparecen esfuerzos cortantes iguales que actúan sobre cuatro de sus caras adyacentes. Es decir, que también se desarrolla una distribución del esfuerzo cortante asociada a lo largo de un plano axial.

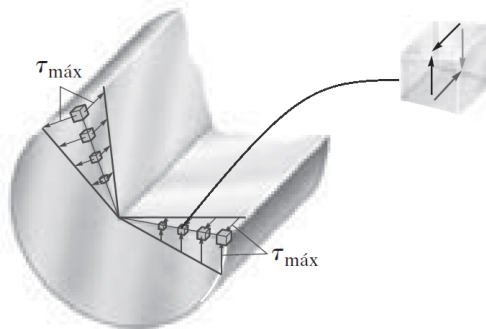


Figura 17-2. Distribución del esfuerzo cortante en el plano radial y axial.

Fuente: (Hibbeler, 2006, p. 184).

Debido a esto los materiales anisotrópicos como la madera tienden a partirse a lo largo del plano axial (figura 18-2c) debido a que su resistencia paralela a sus fibras, dirigida a lo largo de la línea central del eje, es mucho menor que su resistencia perpendicular a las fibras, dirigida a lo largo del plano de la sección transversal (Hibbeler, 2006, p. 184).

Los tubos de paredes delgadas fallan a compresión o estabilidad (figura 18-2d). Para cargas de torsión repetidas o cíclicas aplicadas a materiales dúctiles se presentan grietas debido a la fatiga (figura 18-2e) (Ramírez, 2004).

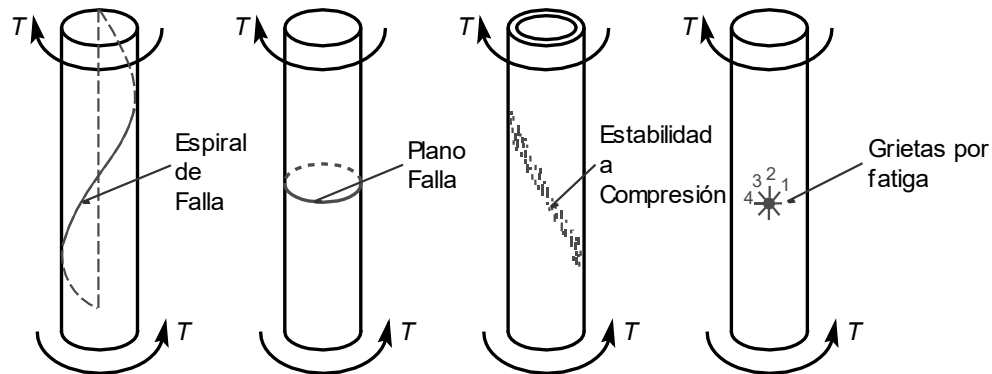


Figura 18-2. Tipos de falla por esfuerzo a torsión.

Fuente: (Ramírez, 2004).

2.3.3.2 Ejes cilíndricos sólidos y huecos

Al hacer una comparación, los ejes cilíndricos macizos generan una menor precisión de la resistencia de cedencia (τ_y) y del esfuerzo cortante último (τ_u) debido a que la distribución de esfuerzos hace que el núcleo siga manteniendo un comportamiento plástico a pesar de que en el exterior se producen una deformación plástica. En cambio, los cilindros huecos tienen una distribución de tensiones más uniforme y el esfuerzo producido en ellas se puede calcular con la ecuación 7 como se vio anteriormente (Ramírez, 2004).

2.4 Normas en el ensayo de torsión

Las normas permiten que los ensayos a materiales posean un grado de estandarización, al establecer, por ejemplo, el procedimiento que se debe llevar, las dimensiones y geometría que debe tener las probetas, los parámetros que deben ser utilizados en el ensayo, y otras consideraciones. Específicamente para el ensayo de torsión hemos utilizado las siguientes normas:

2.4.1 ASTM D1043 – 16

Esta norma es utilizada para determinar los cambios que se producen en la rigidez de los polímeros dentro de un rango de temperaturas. Para este tipo de pruebas se utiliza una geometría rectangular en una máquina que ejerza torsión entre un rango de 5 a 100° de arco. Para realizar este tipo de ensayo se debe verificar que la probeta esté bien ajustada en las abrazaderas y que su termómetro posea la medición correcta. Esta norma sirve como referencia para realizar la calibración de la máquina mediante un procedimiento de prueba error agregando y quitando

cargas en la máquina y comprobando que los resultados teóricos sean similares a los resultados experimentales.

2.4.2 *ASTM E143-02*

Esta norma es utilizada en probetas cilíndricas o tubulares para establecer el módulo de corte en materiales estructurales. Realizando el ensayo mediante esta norma se puede determinar las propiedades mecánicas del elemento ensayado y generar la gráfica de esfuerzo deformación y además de determinar el tipo de falla del elemento. La norma establece parámetros que debe cumplir el equipo y el procedimiento que se debe llevar a cabo.

El equipo utilizado debe ser calibrado de acuerdo con el rango de torque que se vaya a utilizar. Las mordazas de sujeción deben sujetar al espécimen de prueba con firmeza, evitando deslizamientos. En el caso de que la probeta sea tubular, pueden utilizarse acoples rígidos permitiendo sujetar la probeta sin que esta se rompa. Las mordazas deben presentar alineación axial con el fin de evitar la aplicación de momentos flectores. El desplazamiento de rotación puede medirse por medios mecánicos, ópticos o eléctricos.

El procedimiento del ensayo establece primero la correcta medición del diámetro de espécimen de prueba para una determinación precisa del momento polar de inercia. Se debe tener cuidado con la alineación axial de la probeta para evitar esfuerzo de flexión. La medición del torque y del ángulo de giro deben tomarse simultáneamente. En cuanto a la velocidad de rotación debe mantenerse lo más elevada posible para eliminar la deformación por fluencia lenta (creep). La norma recomienda evitar cambios de temperatura durante el ensayo.

Para la determinación del módulo de rigidez se debe graficar el esfuerzo de torsión producido vs la deformación a cortante. Dentro de la zona elástica, el módulo de rigidez se puede determinar ajustando gráficamente una línea recta a los puntos apropiados. El mejor ajuste de una línea recta para la porción lineal inicial de la curva se puede obtener mediante el método de mínimos cuadrados (ASTM, 2008).

2.4.3 *DIN 50125*

Esta norma establece especificaciones para piezas de prueba que se pueden usar para ensayos de tracción de materiales de acuerdo con DIN EN ISO 6892-1. Este tipo de probetas se puede utilizar también para el ensayo de torsión. La estandarización permite facilitar la fabricación de piezas de prueba en la fábrica o taller (DIN, 2016).

En la figura 19-2 se muestra la configuración de las probetas y en la tabla 1-2 se presentan los valores para cada una de las distintas configuraciones.

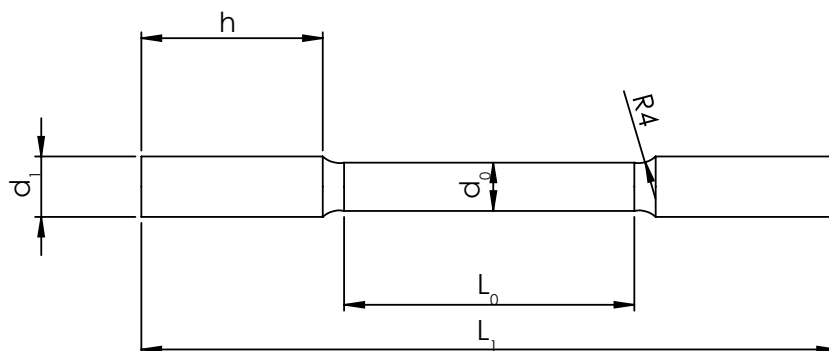


Figura 19-2. Configuración de probetas para ensayos de torsión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 1-2: Dimensiones de probetas para ensayos de torsión.

d_0 (mm)	d_1 (mm)	L_0 (mm)	h (mm)	L_1 (mm)
4	5	24	16	65
5	6	30	20	80
6	8	36	25	95
8	10	48	30	115
10	12	60	35	140
12	15	72	40	160
14	17	84	45	185

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

2.5 Polímeros

La máquina para ensayos de torsión se diseñó específicamente para realizar pruebas a materiales poliméricos. Según (Billmeyer, 1975, p. 3) “un polímero es una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples que en algunos casos es lineal y en otros forman cadenas ramificadas”. La unidad repetitiva que conforma al polímero se conoce como monómero.

A los polímeros se les puede realizar distintos tipos de ensayos físicos. Entre los principales se encuentra el ensayo de tensión, cizalladura, compresión, flexión, fatiga y torsión. La prueba que generalmente se practica es la de tensión, pues es uno de los ensayos que más información suministra. En la figura 20-2 se puede observar la curva tensión deformación generalizada para

polímeros. Esta curva depende del tipo de material que se analice, y básicamente está ligado a características como ductilidad, fragilidad, tenacidad y dureza como se indica en la figura 21-2. Esta curva, además, presenta semejanza con la que se obtiene al realizar un ensayo de torsión (figura 13-2).

Dependiendo del tipo de esfuerzo al que esté sometido, la respuesta de un material puede ser muy diferente. Para caracterizar un material para una aplicación determinada es conveniente estudiar específicamente el comportamiento frente al tipo de esfuerzo al que va a hacer sometido. Además, no se recomienda extrapolar los resultados de un tipo de ensayo a otro (Marcilla, 2012, p. 30).

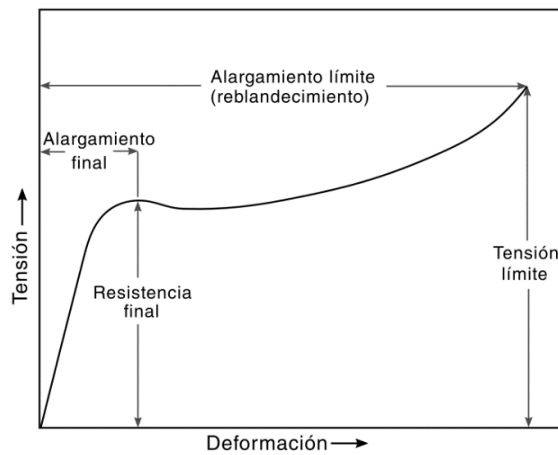


Figura 20-2. Curva generalizada tensión - deformación para plásticos.

Fuente: (Winding, Hiatt, 1961).

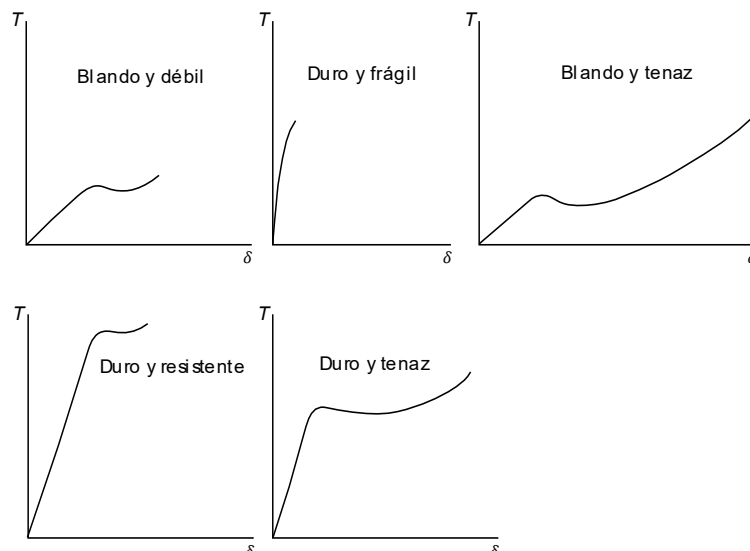


Figura 21-2. Curvas de tensión - deformación para varios tipos de materiales polímeros.

Fuente: (Winding, Hiatt, 1961).

2.5.1 Propiedades mecánicas de los polímeros

En general los polímeros poseen una alta relación resistencia mecánica/densidad, pero esto depende específicamente del polímero que se esté analizando. Para analizar las propiedades mecánicas de los polímeros es conveniente dividirlos en grupos y basarse en el diagrama esfuerzo - deformación (figura 22-2) que brinda información del comportamiento del material al estar expuesto a esfuerzos externos, específicamente tracción (Brindis, 2002).

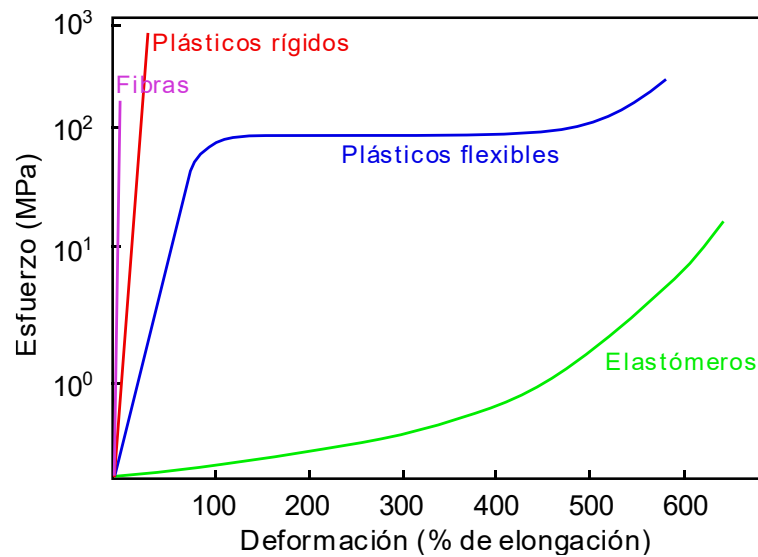


Figura 22-2. Gráficos Esfuerzo - Deformación para fibras, plásticos y elastómeros.

Fuente: (Coreño, Mendez, 2010).

Los elastómeros como el poliisopreno, el polibutadieno y el poliisobutileno, presentan cadenas muy flexibles que los hacen fácilmente deformables, por lo que pueden ser estiradas en altas proporciones como se puede ver en la gráfica. Al retirar la fuerza que origina la deformación, los elastómeros regresan a sus dimensiones originales. Aunque poseen gran elasticidad, su módulo de elasticidad es bajo (Coreño, Mendez, 2010).

Los plásticos flexibles como el polietileno, polipropileno, policarbonato, y el nylon poseen un bajo módulo de elasticidad bajo (150 - 3500 MPa) y baja resistencia a la tensión (15 - 70 MPa). Un porcentaje de elongación que va desde el 20% al 800% (Coreño, Mendez, 2010).

Los plásticos rígidos como el poliestireno y el polimetacrilato (acrílico) poseen un alto módulo de elasticidad (700 - 3500 MPa) y una moderada resistencia a la tensión (30 - 85 MPa). En contraste con estas características tienen baja flexibilidad, pues su elongación va de un 0.5 - 3% lo que hace que el material sea frágil (Coreño, Mendez, 2010).

Po último, las fibras son polímeros con buena resistencia a la tensión y sufren poca deformación (10 - 50%). La cadena de polímeros está alineada a lo largo de la fibra, presentando mejores propiedades mecánicas en esta dirección que perpendicular a esta. El kevlar es un ejemplo de este tipo de material (Coreño, Mendez, 2010).

2.5.2 Materiales utilizados en el ensayo de torsión

Debido a la disponibilidad y la facilidad de su mecanizado o fabricación de probetas, se han escogido tres materiales para la realización del ensayo: nylon (poliamida), acrílico (polimetacrilato) y PLA (ácido poliláctico).

2.5.2.1 Nylon (Poliamida)

El nylon es un polímero sintético fuerte y ligero que tiene un uso muy variado en el mercado. Presenta buenas características como ser resistente y duradero. Su mayor ventaja radica en que es un material muy económico. El nylon se usa con frecuencia para reemplazar los cojinetes y bujes metálicos, lo que a menudo elimina la necesidad de lubricación externa. Otros beneficios incluyen una reducción en el peso de la pieza, menos ruido de operación y un menor desgaste en las piezas de acoplamiento (Curbell Plastics, 2020).

2.5.2.2 Acrílico (Polimetacrilato)

El acrílico es un material plástico transparente con excelente resistencia, rigidez y claridad óptica. Es fácil de fabricar y termoformar. Posee una buena resistencia a la intemperie en comparación con otros plásticos transparentes. Exhibe cualidades similares a las del vidrio en cuanto a claridad, transparencia y resistencia al impacto, con la ventaja de su reducido peso. Brinda mucha versatilidad, durabilidad y cualidades estéticas sobresalientes (Curbell Plastics, 2020).

2.5.2.3 PLA (Ácido Poliláctico)

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico. Su principal propiedad es la biodegradabilidad, debido a eso es ampliamente utilizado en las industrias alimenticia, química, farmacéutica, del plástico, textil y en la impresión 3D (Serna et al., 2003). En el campo de la impresión 3D, el PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, y permite la creación de piezas de alta resolución (Ultimaker, 2017).

En la tabla 2-2 se muestran las propiedades de los polímeros utilizados para el ensayo de torsión.

Tabla 2-2: Propiedades de los polímeros usados en el ensayo de torsión.

Propiedades	Unidad	Nylon	Acrílico	PLA
Densidad	kg/m ³	1140	1190	1240
Módulo de Elasticidad	GPa	3,2	2,8	3,4
Resistencia a Tracción	MPa	86,0	70,0	60,0
Elongación	%	90,0	4,5	4,5
Dureza	-	Shore D80	Rockwell M95	Shore D63
Máxima Temperatura de Servicio	°C	100	70	50

Nota. Los valores fueron convertidos para expresarlos de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Fuente: (Curbell Plastics, 2020).

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

2.6 Metodología de diseño

El diseño es una parte fundamental en la construcción de una máquina, permite la elaboración de métodos buscando satisfacer las necesidades originando ciertas soluciones a las diversas alternativas que se generan. Para realizar un diseño óptimo se debe plantear una metodología de diseño pertinente que estudie un proceso óptimo y abarque de forma general y detallada un proceso de diseño que influya de manera concisa y genere resultados buenos tanto para el consumidor y proveedor.

La metodología de diseño más enfocada sería la ingeniería concurrente la cual se basa en un ciclo básico de diseño que por medio de pasos se resuelve un problema establecido para obtener un diseño admitido. Este ciclo de diseño empieza con de un análisis en donde se examina de forma minuciosa los problemas y que especificaciones tiene el proyecto, después sigue la síntesis en donde se plantea soluciones al problema y abarque alternativas para las especificaciones requeridas, después se procede con la simulación, en este proceso se obtiene el comportamiento de las alternativas dadas para la solución del problema, consecuentemente sigue la evaluación que comprueba la eficiencia y calidad de las alternativas planteadas y por último se tiene la decisión que verifica el grado de aceptabilidad de la evaluación realizada y se selecciona la mejor alternativa permitiendo tener una fiabilidad en el producto.

Una parte importante es el enfoque de la ingeniería concurrente que permite aclarar ciertas dudas al realizar esta metodología respecto a cómo se debe ir efectuando, mediante las

diferentes disciplinas utilizadas se reducen procesos, se optimiza el tiempo y se obtiene productos de buena calidad y confiabilidad.

A continuación, en la figura 23-2 se detalla el orden de las fases del ciclo básico.

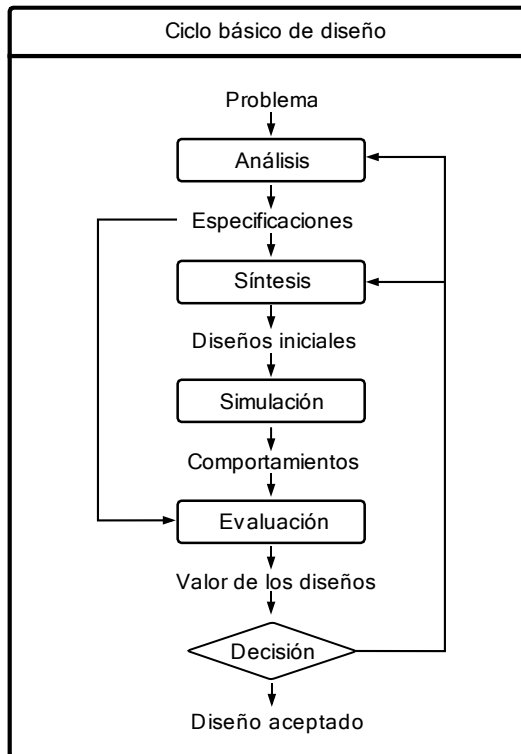


Figura 23-2. Ciclo básico de diseño.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

2.6.1 Etapas de la ingeniería concurrente

Las etapas utilizadas en el diseño concurrente son 4 etapas y se las detalla a continuación:

La etapa 1 es la definición del producto, por medio de una recopilación de información se trata de proponer y buscar soluciones a los problemas que se presentan en el producto. Por tal motivo se utiliza el QFD el cual toma en cuenta las necesidades del usuario (voz del usuario) y un criterio ingenieril (voz del ingeniero) para realizar un análisis de estos requerimientos que se deben dar al producto y obtener cuales serían los que se debe enfocar el diseño.

La etapa 2 es el diseño conceptual del producto, primero se genera un análisis funcional en el cual se visualiza de forma general el procedimiento del producto para después ir a un análisis modular el cual se subdivide en módulos para ir analizando de una forma más específica las acciones que tiene el producto y generar alternativas que den solución a estos módulos y seleccionar la solución más adecuada y precisa.

La etapa 3 es el diseño de materialización en donde se procede a la validación de los elementos del producto mediante los cálculos respectivos y a su vez su simulación respectiva, además se da alternativas para la construcción y modelado.

La etapa 4 es el diseño de detalle en donde se detalla de forma más precisa los elementos y se genera los planos de cada uno de ellos para proceder con la construcción de la máquina.

2.7 Protocolos de pruebas sobre máquinas

Para verificar el funcionamiento de una máquina y cerciorarse de que esta cumple con los requerimientos establecidos es necesario la implementación de un protocolo de pruebas, que se trata de un programa sistemático de verificación e inspección del equipo.

Los protocolos de pruebas varían de acuerdo con el equipo a ser examinado. Para la máquina de torsión se implementa el protocolo de pruebas en vacío y carga. La primera busca examinar el equipo cuando este no está sujeto a las aplicaciones reales de carga o de trabajo, observando el desempeño de la máquina y asegurando que todo el sistema no presenta fallas. En cuanto al segundo, evalúa las condiciones de la máquina en una situación real de trabajo, verificando que todos y cada uno de los componentes cumplan con la función para la que fueron diseñadas (Lara, 2014).

El protocolo de pruebas para máquinas generalmente se divide en tres áreas de control, estas son:

- Pruebas mecánicas
- Pruebas eléctricas y electrónicas
- Pruebas de máquina en funcionamiento.

2.7.1 Medidas a tomar en los protocolos de pruebas

El protocolo de pruebas debe estar bien estructurado de modo que asegure que todos los componentes del sistema sean probados. Entre las medidas que deben ser consideradas tenemos:

- Desarrollo de un conjunto de criterios que componen la prueba.
- Objetivos del plan de pruebas
- Normativa en el caso de ser necesaria
- Encargados de realizar el procedimiento
- Requerimientos por cumplir y criterios de aceptación
- Parámetros de ingreso para la realización de la prueba
- Observaciones

2.8 Fundamentos para la elaboración de la guía de laboratorio

La guía de laboratorio para el ensayo de torsión en materiales poliméricos tiene como objetivo crear un procedimiento que regule el ensayo de torsión para la obtención de resultados experimentales y a su vez facilite el uso de la máquina en el grupo de investigación GIEBI. La referencia utilizada para este documento es la guía utilizada para ensayos de torsión en elementos mecánicos manejada en el laboratorio de Resistencia de Materiales. El contenido de la guía presenta el siguiente orden:

- Resumen
- Palabras claves
- Objetivos
- Equipos y materiales
- Materiales
- Procedimiento
- Técnica Experimental
- Resultados
- Discusión y análisis
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía

Esta guía contiene el dimensionamiento de las probetas de distintos materiales utilizados en el ensayo que son nylon, acrílico y PLA, se tiene un procedimiento óptimo y rápido que facilite la comprensión del ensayo y para el análisis de los resultados se considera que propiedades mecánicas se deben evaluar en este ensayo. Los resultados de esta guía se obtienen mediante elementos electrónicos que tienen su calibración apropiada y permitir que el grupo de investigación use esta máquina para investigaciones con resultados experimentales.

2.9 Validación de métodos de ensayo

La validación es un proceso que tiene como objetivo establecer que un proceso específico, en este caso un ensayo, produce consistentemente resultados que cumplen con las especificaciones y características de calidad predeterminados. Para la realización de un ensayo se debe hacer uso de la normativa adecuada, ya sea para el procedimiento del ensayo, como para la configuración de los especímenes de muestreo. Para el caso de metodologías de calibración desarrolladas en el laboratorio se debe hacer uso de métodos adecuados que permitan dar fiabilidad a los resultados obtenidos.

La validación es un proceso que consiste en tres pasos:

- Establecimiento de las condiciones por un cumplir.
- Determinación de los parámetros estadísticos del procedimiento
- Evaluación de los resultados obtenidos mediante comparación y tomo de decisión sobre la validez del procedimiento.

Las especificaciones deben estar establecidos ya sea por una norma o una instancia oficial. Si este no es el caso el responsable del ensayo debe establecerlas de una manera confiable y científica.

2.9.1 Teoría de errores

Las magnitudes físicas que son determinadas experimentalmente por medidas o por la combinación de ellas son susceptibles de errores que generan lo que se conoce como incertidumbre. La teoría de errores tiene como objetivo identificar las fuentes que generan estos errores en la medición y determinar el valor verdadero de las magnitudes físicas medidas.

2.9.1.1 Error de medida

Se trata de la diferencia entre el valor obtenido y el valor verdadero de la magnitud medida.

2.9.1.2 Valor verdadero

El valor verdadero es aquel que se obtendría si la medición se realiza con equipos perfectos, lo que no es posible en la práctica. Sin embargo, se considera existente al aumentar a la medida un error Δx de la siguiente manera $x = \bar{x} \pm \Delta x$.

2.9.1.3 Desviación estándar (Error estadístico)

La desviación estándar es una idea de cuan dispersos están los datos de x respecto del promedio \bar{x} . Este error se genera al realizar dos o más mediciones de una magnitud física. Se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_n = \Delta x_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (11)$$

2.9.1.4 Error sistemático

Este error está presente en todo instrumento de medición. Es producto de la lectura mínima que posee el equipo. Se determina con la siguiente expresión:

$$\Delta x_s = \frac{\text{Lectura mínima}}{2} \quad (12)$$

2.9.1.5 Error efectivo

La combinación de errores sistemático y estadístico se conoce como error efectivo y se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_s^2 + \Delta x_e^2} \quad (13)$$

2.9.1.6 Error relativo y error relativo porcentual

El error relativo es el cociente entre el error efectivo y el valor medio. Para una mejor interpretación de los resultados se hace uso del error relativo porcentual, que responde a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_x \% = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (14)$$

2.9.2 Ajuste por mínimos cuadrados

Dependiendo del sistema estudiado existen magnitudes físicas donde su relación se realiza a través de una ecuación lineal. Para este estudio específicamente, dentro de la región elástica el esfuerzo de torsión es directamente proporcional a la deformación a cortante. Cuando los datos son obtenidos experimentalmente debido a su susceptibilidad a errores no siempre están perfectamente alineados, para ello se utiliza el método de mínimos cuadrados (Torre la Vega, 2014). Este método permite determinar los parámetros a y b de la ecuación lineal $y = ax + b$ que mejor se ajusta a los datos experimentales mediante las siguientes expresiones:

$$a = \frac{n(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (15)$$

$$b = \frac{(\sum y_i) - a(\sum x_i)}{n} \quad (16)$$

Para determinar que tan bien se ajusta la recta a los datos experimentales existe el coeficiente de determinación (R cuadrado). Este valor oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca esté de 1 este valor mayor será el ajuste del modelo a los datos registrados. Mientras que si el valor esté más cerca de 0 menos fiable será el modelo. Un valor aceptable para el valor de R cuadrado es 0,95 o mayor, ese valor presenta una alta confiabilidad en el ajuste de la curva.

Mediante el software Excel se puede determinar directamente estos parámetros una vez ingresados los datos obtenidos experimentalmente y graficados en una curva de dispersión de datos. Agregando la línea de tendencia Excel presenta la ecuación lineal y el valor de R cuadrado en el gráfico.

2.9.3 Cálculo para el número de probetas

Para determinar el número de probetas que se necesitan para realizar un ensayo y que los resultados obtenidos sean fiables debe hacerse uso de un cálculo estadístico el cual relaciona el nivel de confianza que se espera obtener en los resultados y la varianza que esta presenta.

Para el cálculo de la desviación estándar es necesario realizar un plan piloto de nueve ensayos, donde se toma como referencia el valor de esfuerzo de resistencia máximo (Pacheco, 2019). Una vez calculado la desviación estándar se determina el número de probetas mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2}{E} \quad (17)$$

Donde:

n = Número de probetas (Adimensional)

σ = Desviación estándar (Adimensional)

Z = Grado de confianza tabulado (Adimensional)

E = Nivel deseado de confianza (Adimensional)

El nivel deseado de confianza es el valor de desviaciones estándar que se pueden dispersar los resultados respecto a la media. Por ejemplo, para un nivel de confianza de 99,7% $E = \sigma$, con un nivel de confianza del 95% $E = 2\sigma$, que es el más utilizado, y con 68% $E = 3\sigma$.

El valor de Z es un valor de prueba estadístico que se encuentra tabulado y también depende del valor del nivel de confianza que se requiera. Por ejemplo, si el nivel de confianza es 99,7% el valor de $Z = 3,08$. Para 95% $Z = 1,96$ y para 68% $Z = 1,0$.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Metodología de diseño

En este capítulo se tomará como punto de partida la ingeniería concurrente la cual permite obtener un producto óptimo y eficaz mediante la utilización de 4 etapas que son la definición del producto, diseño conceptual, diseño de materialización y el diseño de detalle. A continuación, se presenta un esquema en la figura 1-3 con la metodología utilizada para el diseño y construcción de la máquina de torsión.

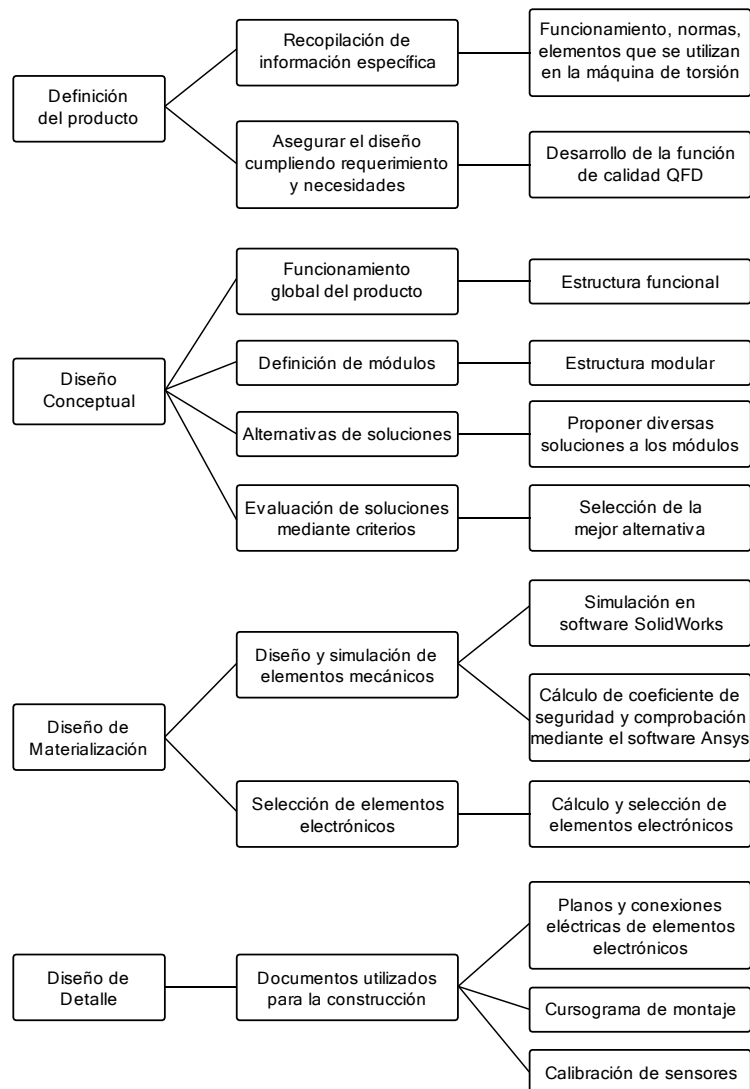


Figura 1-3. Metodología diseño y construcción de la máquina de torsión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.2 Definición del producto

Se realizó una revisión bibliográfica en el capítulo 2 de este documento donde se especifica diversas máquinas de torsión que sirven como referencia para el diseño y construcción de esta, a su vez de como es el funcionamiento de este tipo de equipo. No existe una norma establecida para el ensayo de torsión en polímeros, pero se utilizó dos normas como referencia para proceder el ensayo las cuales son ASTM E143-02 y DIN 50125. Con esta información recopilada se procede al desarrollo de la función de calidad

3.2.1 *Desarrollo de la función de calidad QFD*

Se utiliza este método porque permite un análisis de los problemas que tiene el consumidor y las posibles soluciones que se pueden generar con un criterio ingenieril creando un nuevo producto innovador y que se ajuste a las demandas del consumidor (Riba, 2002).

3.2.1.1 Voz del usuario

A continuación, se identifica las necesidades del cliente:

Demandas Unidimensionales y Estimulantes

- Liviana
- Compacta
- Facilidad de obtención de resultados
- Capacidad
- Movilidad
- Espacio Requerido

Demandas Básicas (no las exige el cliente)

- Economía
- Seguridad
- Facilidad de uso de la maquina
- Facilidad de mantenimiento

3.2.1.2 Voz del ingeniero

Las necesidades que el cliente nos proyecta se traducen en las siguientes características técnicas:

- Precio máximo
- Ergonomía
- Dimensiones y peso de la máquina
- Controlador

- Sensores de torsión y deformación angular
- Torque máximo
- Dimensión de la probeta
- Visualización de resultados
- Tiempo de duración del ensayo

La casa de la calidad permite hacer un análisis de las necesidades del consumidor con los criterios del ingeniero y a su vez asegurarnos de cumplir las expectativas que tiene el cliente sobre el equipo finalizado. En la figura 2-3 se presenta la casa de la calidad.

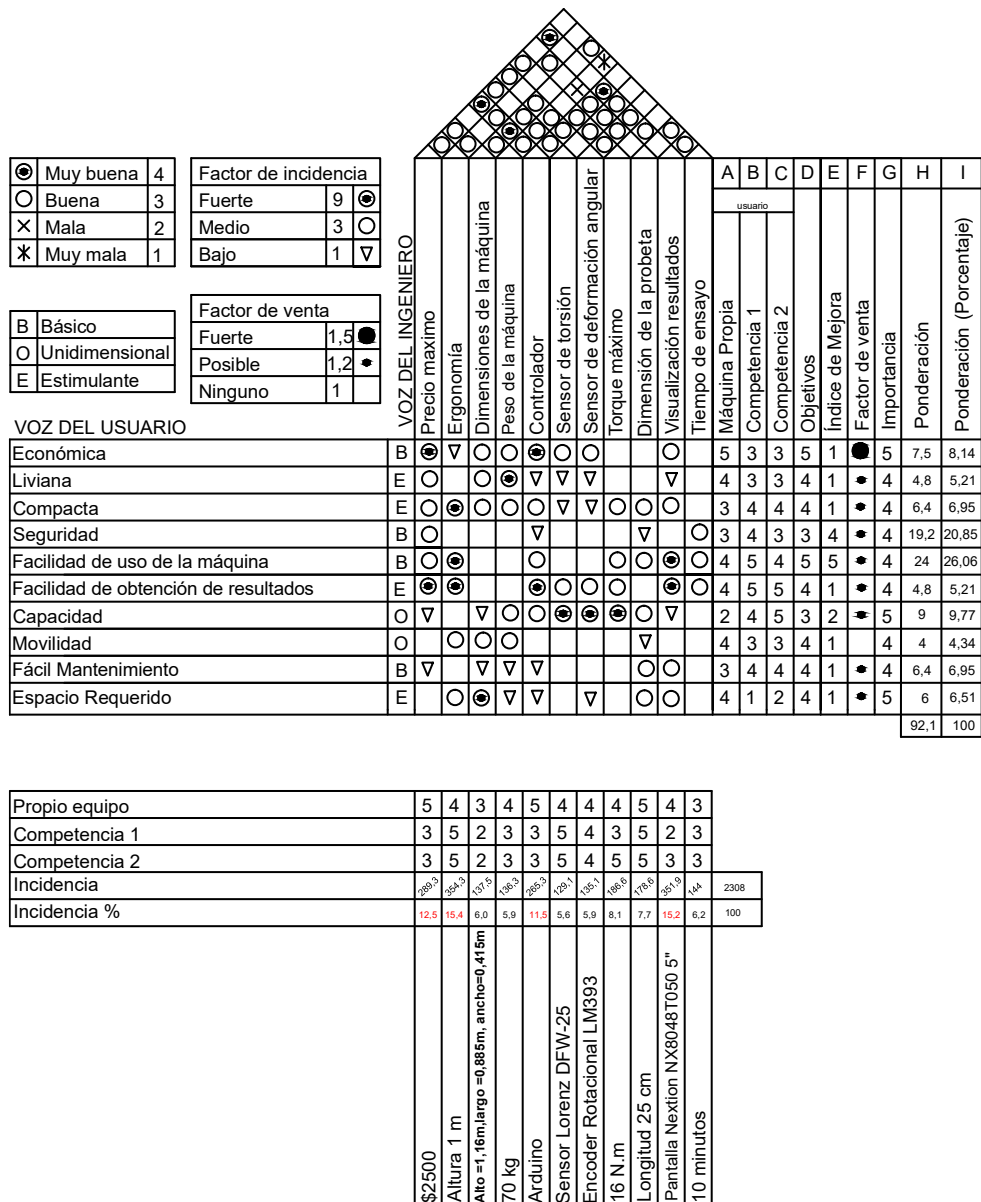


Figura 2-3. Casa de la Calidad.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.2.2 Resultados de la casa de la calidad

Por medio del estudio realizado en la casa de la calidad se identifican las especificaciones con mayor relevancia que influenciarán en el diseño y que se presentan a continuación:

3.2.2.1 Precio máximo

El costo de la máquina es accesible debido a su óptimo diseño y la correcta selección de los componentes. Esto presenta una gran ventaja frente a otras máquinas existentes en el mercado.

3.2.2.2 Ergonomía

La ergonomía es una característica primordial que debe poseer la máquina porque mejora el desempeño del operador al sentirse cómodo en su zona de trabajo.

3.2.2.3 Controlador

El microcontrolador Arduino presenta muchas ventajas en la máquina como, por ejemplo, el bajo precio comparado con otros controladores, el espacio que requiere, así como también su fácil programación. Además, su compatibilidad con los diversos sensores y dispositivos de la máquina permiten el buen desempeño de este microcontrolador.

3.2.2.4 Visualización de resultados

La visualización de resultados se presenta una pantalla HMI de la serie Nextion. Este dispositivo permite tanto controlar el ensayo como observar los datos registrados durante este. Además, al finalizar el ensayo permite la transmisión de estos datos hacia el computador.

3.3 Diseño conceptual

En esta etapa se utiliza el diseño conceptual que se centra en la especificación y genera soluciones a las alternativas propuestas realizando un análisis de la solución más conveniente mediante criterios ponderados. Se divide en estructura funcional y estructura modular.

3.3.1 Análisis de la estructura funcional

El análisis de la estructura funcional permite conocer de forma general el proceso que realiza la máquina determinando que entradas se tiene y que salidas nos proporciona, esta estructura es la base fundamental para realizar el análisis de la estructura modular. A continuación, se detalla el contenido de la estructura funcional.

Estructura funcional

En la estructura funcional se presenta de forma global que función desempeña la máquina de torsión, como entradas tenemos probeta de polímero y energía eléctrica para poder realizar el

ensayo de torsión y como salida tenemos los resultados obtenidos del ensayo. A continuación, se muestra el esquema del nivel cero:

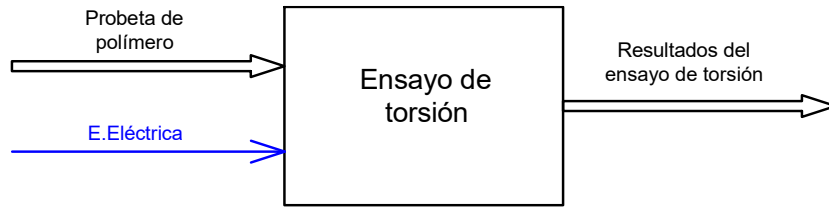


Figura 3-3. Estructura funcional.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.2 *Análisis de la estructura modular*

El análisis de la estructura modular permite conocer de una manera más detallada los procesos existentes en la máquina de torsión dividiendo en distintos módulos. Se puede realizar un nivel uno de la estructura modular donde se puntualice de una forma no muy precisa los procesos de la máquina y después crear un módulo 2 en donde se detalle de forma concreta y específica los módulos a utilizar en la máquina de torsión para después realizar una solución de alternativas para estos módulos.

Nivel 1

El nivel 1 presenta de forma no tan detallada el proceso que realiza la máquina de torsión. En la figura 4-3 se ilustra este nivel.

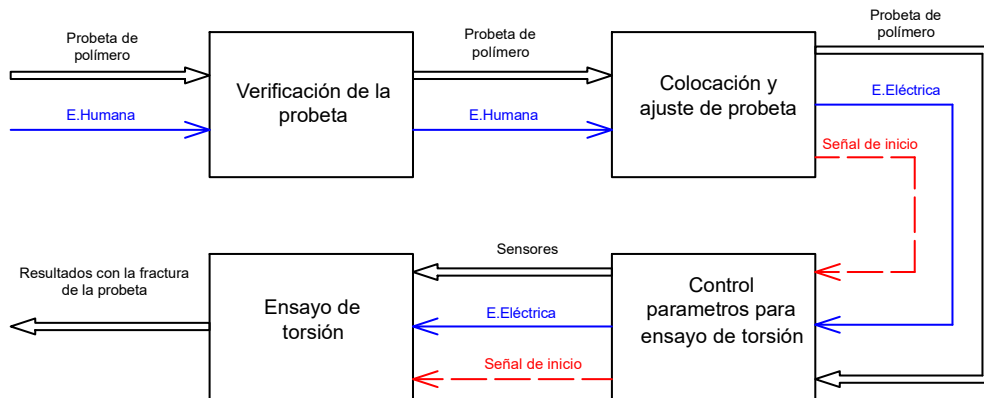


Figura 4-3. Nivel 1 de la estructura modular.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Nivel 2

En este nivel se presenta las operaciones de la máquina de torsión de una forma más precisa. Este nivel se divide en tres módulos para facilitar el análisis posterior y elegir que alternativa de solución más la óptima para la máquina.

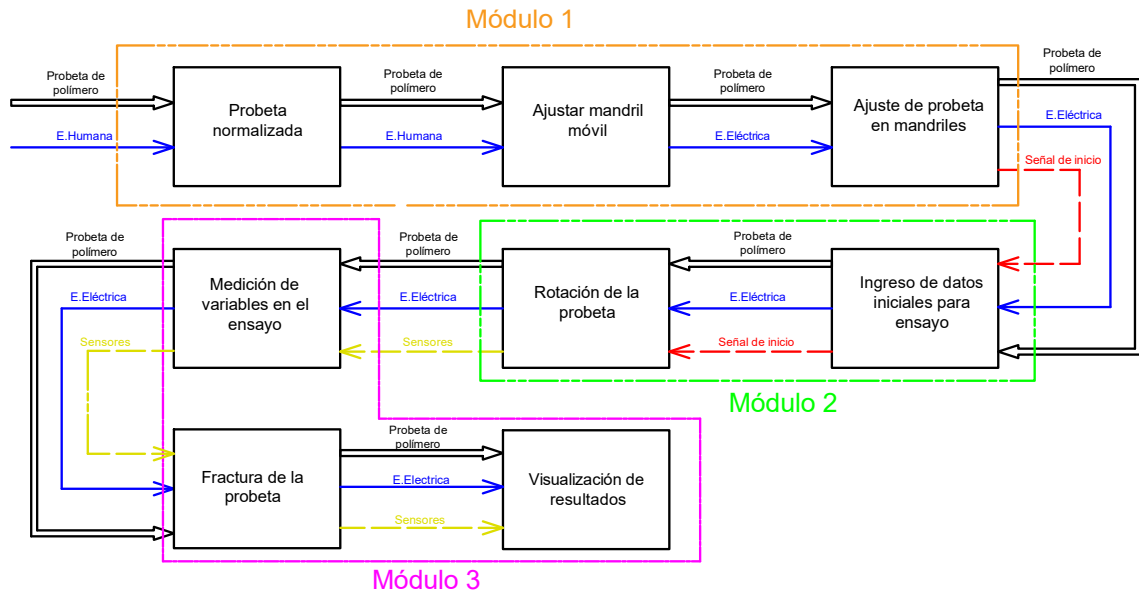


Figura 5-3. Nivel 2 de la estructura modular.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.3 Análisis de alternativas módulo 1

El módulo 1 corresponde a la fase inicial que realiza la máquina en el ensayo a torsión. Se consideraron tres parámetros importantes en esta fase: posicionamiento del mandril móvil, fijación de este, y ajuste de la probeta. Por medio del análisis QFD se optimizan los elementos que debe tener el equipo. En la figura 6-3 se detallan las actividades que se realizan en este módulo y se presentan las alternativas de solución que se las analizara individualmente.

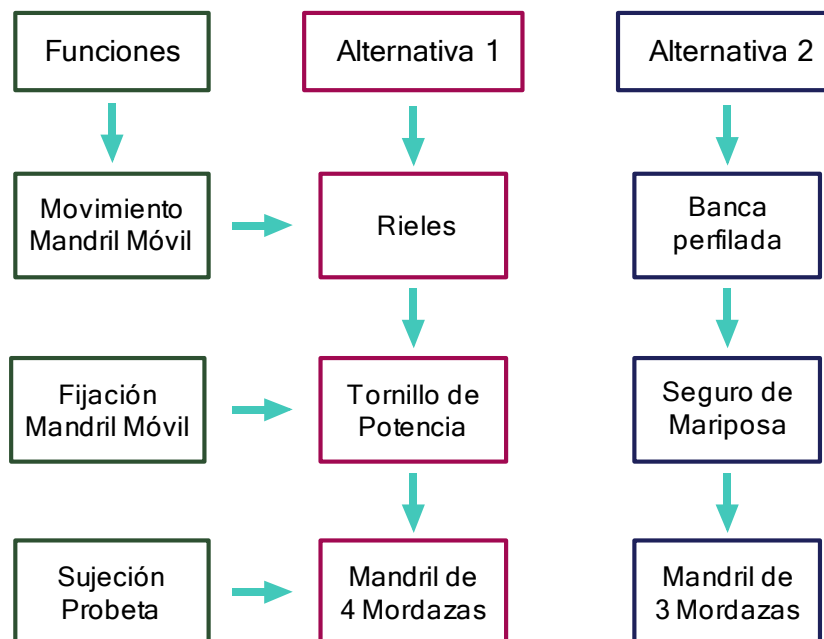


Figura 6-3. Alternativas de solución del Módulo 1.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.3.1 *Movimiento mandril móvil*

El movimiento del mandril móvil es de suma importancia para el área de trabajo en el ensayo. En la tabla 1-3 se presenta las ventajas y desventajas de las dos alternativas.

Tabla 1-3: Alternativas para el movimiento mandril móvil.

Movimiento mandril móvil	Rieles	Ventajas	Normalizas Fácil utilización Seguridad
		Desventajas	Construcción
	Banca Perfilada	Ventajas	Capacidad Mantenimiento
		Desventajas	Mecanizado Costos Peso

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.3.2 *Fijación mandril móvil*

La fijación del mandril móvil permite que el sistema sea seguro y a su vez que el ensayo no exista ningún error. En la tabla 2-3 se muestra las alternativas para este proceso.

Tabla 2-3: Alternativas para fijación del mandril móvil.

Fijación del mandril móvil	Tornillo de potencia	Ventajas	Seguridad Costo Normalizado
		Desventajas	Adaptación Peso
	Seguro de mariposa	Ventajas	Peso Facilidad de uso
		Desventajas	Mecanizado Costo

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.3.3 Sujeción probeta

La sujeción de la probeta es primordial en el proceso del ensayo para lo cual en la tabla 3-3 se dan las alternativas para realizar esta actividad.

Tabla 3-3: Alternativas para sujeción probeta.

Sujeción probeta	Mandril de 4 mordazas	Ventajas	Costo Tamaño Mayor sujeción
		Desventajas	Disponibilidad
	Mandril de 3 mordazas	Ventajas	Fácil sujeción Costo
		Desventajas	Tamaño Disponibilidad

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.4 Evaluación de alternativas módulo 1

Obtenido las alternativas de solución para el módulo 1 se procede con su evaluación respectiva considerando los siguientes criterios:

- Costo
- Durabilidad
- Disponibilidad

En la tabla 4-3 hasta la tabla 8-3 se presentan la evaluación de criterios y una comparación entre las dos alternativas de solución.

Tabla 4-3: Evaluación de criterios módulo 1.

	Costos	Durabilidad	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Costos		0,5	1,0	2,5	0,417
Durabilidad	0,5		0,0	1,5	0,250
Disponibilidad	1,0	0,0		2,0	0,333
			Total	6,0	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 5-3: Evaluación de criterios para costos.

Costos	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 6-3: Evaluación de criterios para durabilidad.

Durabilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	1,5	0,500
Solución 2	0,5		1,5	0,500
		Total	3,0	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 7-3: Evaluación de criterios para disponibilidad.

Disponibilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Tabla 8-3: Conclusión evaluación de criterios de módulo 1.

Conclusión	Costos	Durabilidad	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	0,238	0,125	0,190	1,554	0,518
Solución 2	0,178	0,125	0,143	1,446	0,482
		Total		3,000	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Mediante el análisis de la tabla 8-3, se determina que la opción más viable para la construcción del equipo es la solución 1.

3.3.5 *Análisis de alternativas módulo 2*

El módulo 2 abarca el procedimiento inicial del ensayo de torsión, para ello se consideró el control e ingreso de los parámetros iniciales como punto principal. Las funciones que se consideran en este módulo son el tipo de controlador, ingreso de parámetros iniciales, sistema de movimiento, reducción de velocidad y el controlador del motor. En la figura 7-3 se presentan

las alternativas de solución de este módulo para después analizar las ventajas y desventajas que presentan estas alternativas.

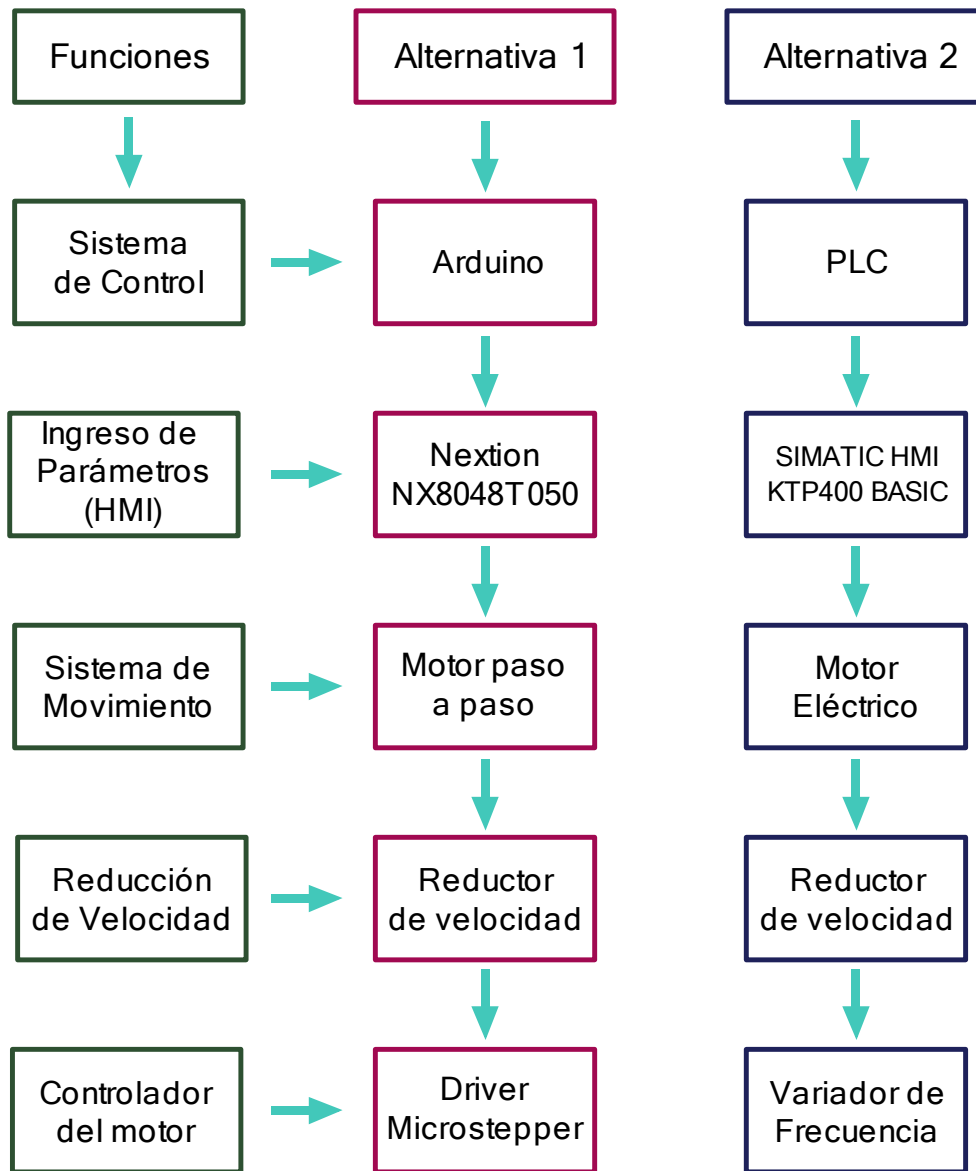


Figura 7-3. Alternativas de solución del Módulo 2.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.5.1 Sistema de control

El sistema de control de la máquina permite la realización del ensayo por tal motivo se debe analizar cual alternativa es la más conveniente para este caso. En la tabla 9-3 se presenta las alternativas de solución.

Tabla 9-3: Alternativas para sistema de control.

Sistema de control	Arduino	Ventajas	Costo Tamaño Lenguaje de programación Librerías
		Desventajas	Capacidad
	PLC	Ventajas	Capacidad Librerías
		Desventajas	Costo Adaptabilidad Lenguaje de programación

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.5.2 Ingreso de parámetros (HMI)

El ingreso de parámetros permite la comunicación máquina-operario y en la tabla 10-3 se presenta las alternativas de solución para este proceso.

Tabla 10-3: Alternativas para ingreso de parámetros (HMI).

Ingreso de parámetros (HMI)	Nextion NX8048T050	Ventajas	Interfaz amigable Costo Adaptabilidad
		Desventajas	Controlador independiente
	SIMATIC HMI KTP400 BASIC	Ventajas	Adaptabilidad Capacidad
		Desventajas	Costo Disponibilidad Necesita más elementos electrónicos

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.5.3 Sistema de movimiento

El sistema de movimiento permite a la probeta rotar en el momento del ensayo, en la tabla 11-3 se establece las alternativas para esta actividad.

Tabla 11-3: Alternativas para sistema de movimiento.

Sistema de movimiento	Motor paso a paso	Ventajas	Costo Compatibilidad Control de velocidad Tamaño
		Desventajas	Fuente de alimentación
	Motor eléctrico	Ventajas	Capacidad Fuente de alimentación
		Desventajas	Tamaño Variador de frecuencia

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.5.4 Reducción de velocidad

En este caso se presenta una sola alternativa debido que no existe otra alternativa posible para realizar este procedimiento y en la tabla 12-3 se presenta sus ventajas y desventajas.

Tabla 12-3: Alternativas para reducción de velocidad.

Reducción de velocidad	Reductor de velocidad	Ventajas	Disponibilidad Compatibilidad Costo
		Desventajas	Adaptabilidad Eficiencia

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.5.5 Controlador del motor

El controlador del motor permite la comunicación del motor con el sistema de control y que se realice la rotación necesaria en el motor, en la tabla 13-3 se presenta las alternativas de este procedimiento.

Tabla 13-3: Alternativas para controlador del motor.

Controlador del motor	Driver microstepper	Ventajas	Costo Compatibilidad Tamaño
		Desventajas	Controlador independiente
	Variador de frecuencia	Ventajas	Adaptabilidad
		Desventajas	Costo Disponibilidad

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.6 Evaluación de alternativas módulo 2

Para el análisis de alternativas del Módulo 2 se procede con su evaluación y se tomaron los siguientes criterios:

- Lenguaje de programación
- Costo
- Adaptabilidad
- Disponibilidad
- Consumo energético

En la tabla 14-3 hasta la tabla 20-3 se presentan la evaluación de criterios y una comparación entre las dos alternativas de solución. Esta comparación permite ver las diferencias entre ambas alternativas presentado sus ventajas y desventajas, pero de una forma cuantitativa lo que brinda lo posibilidad de escoger una opción objetivamente.

Tabla 14-3: Evaluación de criterios módulo 2.

	Lenguaje de programación	Costo	Adaptabilidad	Disponibilidad	Consumo energético	$\Sigma+1$	Ponderación
Lenguaje de programación		0,0	0,5	0,5	0,0	2,0	0,125
Costo	0,5		1,0	1,0	1,0	4,5	0,281
Adaptabilidad	0,5	0,5		0,5	0,5	3,0	0,188
Disponibilidad	0,5	1,0	0,5		0,5	3,5	0,219
Consumo energético	0,0	1	0,5	0,5		3,0	0,188
					Total	16,0	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 15-3: Evaluación de criterios para lenguaje de programación.

Lenguaje de programación	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 16-3: Evaluación de criterios para costo.

Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 17-3: Evaluación de criterios para adaptabilidad.

Adaptabilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 18-3: Evaluación de criterios para disponibilidad.

Disponibilidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 19-3: Evaluación de criterios para adaptabilidad para consumo energético.

Consumo energético	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 20-3: Conclusión evaluación de criterios de módulo 2.

Conclusión	Costos	Durabilidad	Adaptabilidad	Disponibilidad	Consumo energético	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	0,071	0,161	0,107	0,125	0,107	1,571	0,524
Solución 2	0,054	0,121	0,080	0,094	0,080	1,429	0,476
					Total	3,000	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Mediante el análisis de la tabla 20-3, se determina que la opción más viable para la construcción del equipo es la solución 1.

3.3.7 Análisis de alternativas módulo 3

En el módulo 3 se analiza el proceso del ensayo a torsión y la visualización de los resultados. Este módulo presenta la lectura de datos del entorno y la forma de presentarlos hacia el usuario. Se han seleccionado tres funciones principales para este módulo que se presentan a continuación:

- Sensor de torsión
- Sensor de deformación angular
- Visualización de resultados

En la figura 8-3 se presentan las alternativas de solución de este módulo y proceder con los análisis respectivos de cada solución.

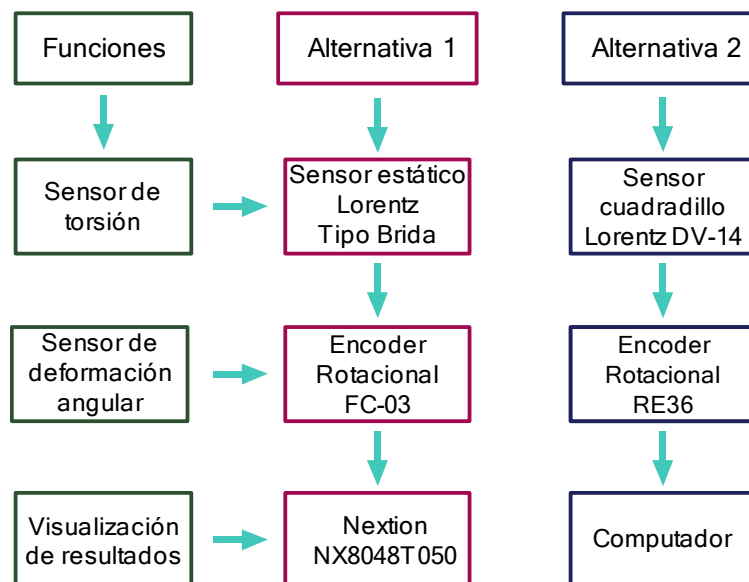


Figura 8-3. Alternativas de solución del Módulo 3.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.7.1 Sensor de torsión

Para la medición de datos se utiliza un sensor de torsión, se presenta dos alternativas en la tabla 21-3.

Tabla 21-3: Alternativas para sensor de torsión.

Sensor de torsión	Sensor estático Lorentz Tipo brida	Ventajas	Costo Capacidad Adaptabilidad
		Desventajas	Disponibilidad
	Sensor cuadradillo Lorentz DV-14	Ventajas	Costo Tamaño
		Desventajas	Adaptabilidad Disponibilidad

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.7.2 Sensor de deformación angular

Otra variable por medir es la deformación angular por tal motivo se utiliza un sensor que mida el ángulo de giro. En la tabla 22-3 se presenta las dos alternativas para este procedimiento.

Tabla 22-3: Alternativas para sensor deformación angular.

Sensor de deformación angular	Encoder rotacional FC-03	Ventajas	Costo Tamaño Capacidad
		Desventajas	Programación
	Encoder rotacional RE36	Ventajas	Tamaño Capacidad
		Desventajas	Costo Disponibilidad

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.7.3 Visualización de resultados

La visualización de resultados es una parte primordial para la obtención y análisis de resultados por tal razón se debe considerar la mejor alternativa, en la tabla 23-3 se presenta estas alternativas con sus ventajas y desventajas.

Tabla 23-3: Alternativas para visualización de resultados.

Visualización de resultados	Nextion NX8048T050	Ventajas	Costo Tamaño Adaptabilidad
		Desventajas	Controlador independiente
	Computador	Ventajas	Capacidad Adaptabilidad
		Desventajas	Costo Dependencia con el sistema Tamaño

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.3.8 Evaluación de alternativas módulo 3

Para el análisis de alternativas del Módulo 3 se procede con su evaluación y se tomaron los siguientes criterios:

- Capacidad
- Exactitud
- Costo

En la tabla 24-3 hasta la tabla 28-3 se presentan la evaluación de criterios y una comparación entre las dos alternativas de solución.

Tabla 24-3: Evaluación de criterios módulo 3.

	Capacidad	Exactitud	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Capacidad		0,0	1,0	2,0	0,333
Exactitud	0,0		0,5	1,5	0,250
Costo	1,0	0,5		2,5	0,417
			Total	6,0	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 25-3: Evaluación de criterios para lenguaje de capacidad.

Capacidad	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 26-3: Evaluación de criterios para lenguaje de exactitud.

Exactitud	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,500
Solución 2	1,0		2,0	0,500
		Total	4,0	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 27-3: Evaluación de criterios para costo.

Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1,0	2,0	0,571
Solución 2	0,5		1,5	0,429
		Total	3,5	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 28-3: Conclusión evaluación de criterios del módulo 3.

Conclusión	Capacidad	Exactitud	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	0,190	0,125	0,238	1,554	0,518
Solución 2	0,143	0,125	0,179	1,446	0,482
		Total		3,000	1,000

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Mediante el análisis de la tabla 28-3, se determina que la opción más viable para la construcción del equipo es la solución 1.

3.4 Diseño de materialización

En esta etapa de diseño se realiza un modelo del esquema general de la máquina de torsión presentada en la figura 9-3, para después ir realizando el modelado respectivo de cada elemento

para realizar sus cálculos y comprobación respectiva en el software Ansys, además en esta etapa se presenta la selección de los componentes electrónicos establecidos en el capítulo anterior.

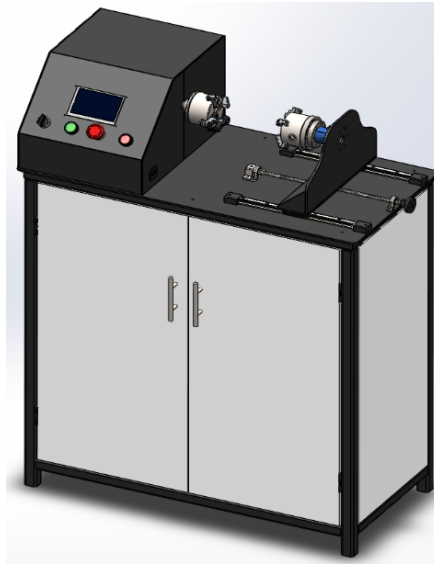


Figura 9-3. Máquina de torsión

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.1 *Diseño del bastidor de la máquina*

El bastidor de la máquina es el elemento que soporta todos los componentes y su peso. Debido a que las fuerzas que se producen son bajas, al igual que el peso de los elementos se ha escogido un tubo cuadrado de 30x30x2mm para la estructura y sobre ella se asienta una plancha de acero de 5 mm de espesor.



Figura 10-3. Estructura bastidor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.1.1 Análisis de la estructura mediante Ansys

Para el análisis de cargas de la estructura se utilizó el método de elementos finitos. Se consideró las fuerzas que interactúan en la superficie de la bancada en dos puntos específicos, dichas fuerzas son de 42,18 N y 65,72 N.

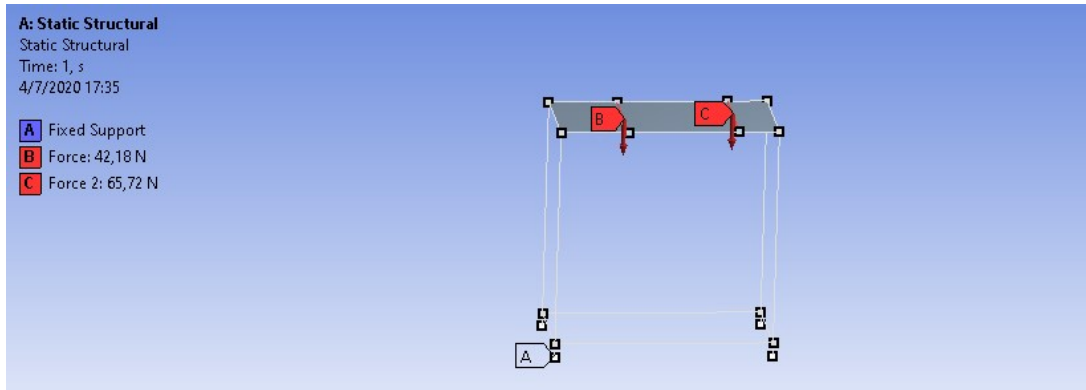


Figura 11-3. Fuerzas que actúan sobre la estructura.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

El análisis se basa en la teoría de Von Mises, que se trata de un criterio de falla en elementos estáticos. El límite elástico del acero es de 250 MPa y el obtenido mediante la simulación es de 0,16 MPa. Evidentemente este resultado está muy por debajo del límite elástico del material, lo que asegura que el elemento soporta las cargas previamente establecidas.

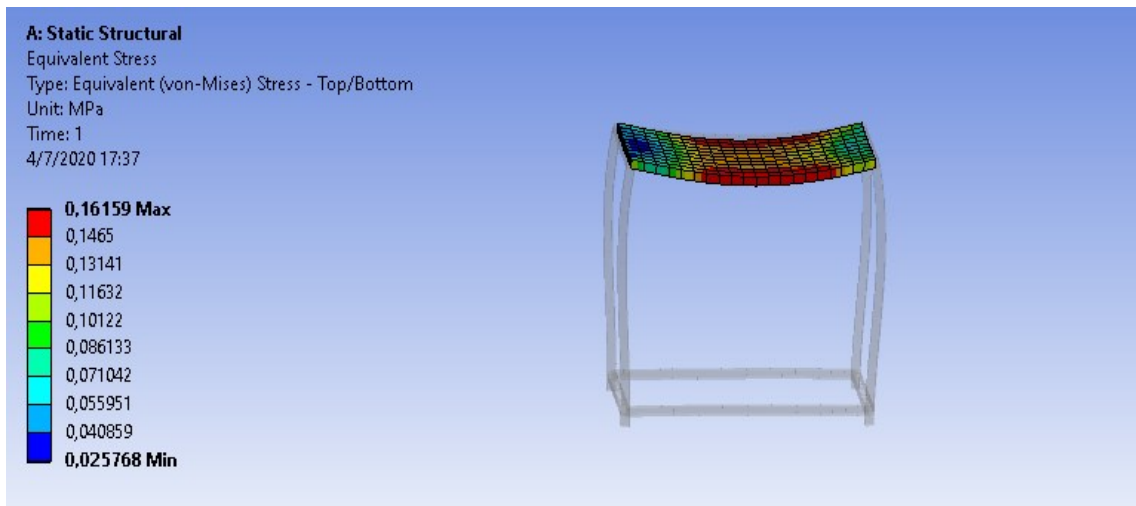


Figura 12-3. Análisis de fallo del bastidor por Von Mises.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

A continuación, se realiza el análisis de deformación total en los elementos que componen la bancada o bastidor. La simulación permite observar la deformación de los elementos y verificar su rigidez. Se presenta una deformación máxima de 0,00457 mm en el centro de la placa de

acero, mientras que en los extremos en dirección transversal se observa una deformación de 0,00356 mm. Los valores son obtenidos son bastante bajos por lo que la estructura puede considerarse como rígida.

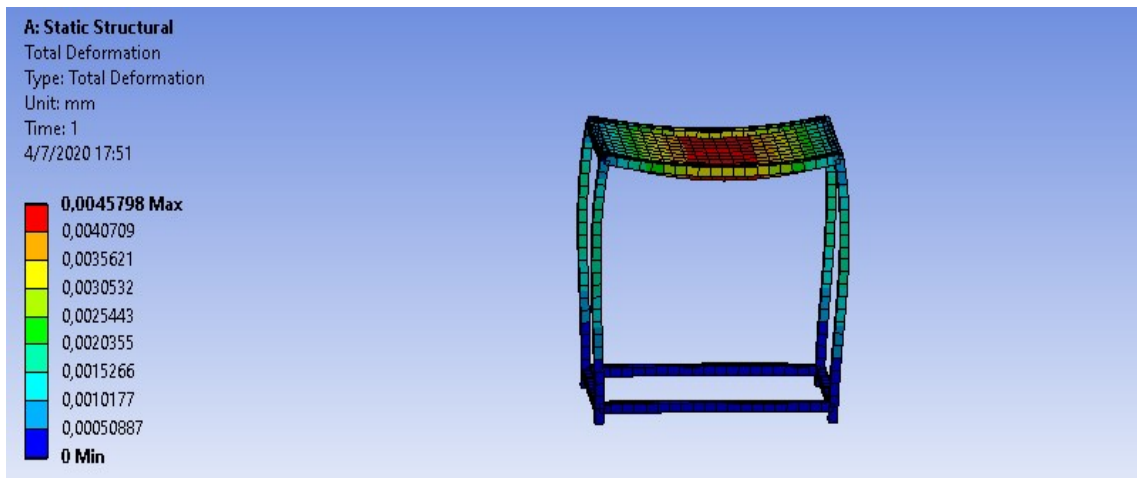


Figura III13-3. Análisis deformación total del bastidor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.1.2 Cálculo del coeficiente de seguridad en los elementos del bastidor.

Los elementos críticos que se deben considerar para el análisis son los dos tubos cuadrados de longitud de 820 mm (posición longitudinal) debido a que ellos son los elementos que presentan mayor carga y deformación. En la figura 14-3 se observa el diagrama de cuerpo libre del elemento y la fuerza aplicada de 108N.

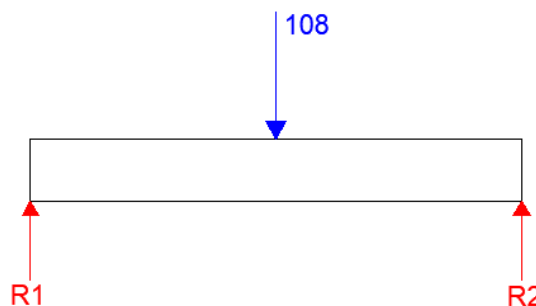


Figura 14-3. Diagrama de cuerpo libre del tubo cuadrado 30x30x2mm.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

$$\sum F = 0 \tag{18}$$

$$-R_1 - R_2 + 108 = 0$$

$$\sum M = 0 \quad (19)$$

$$-R_1(0) - R_2(0,82) + 108(0,41) = 0$$

$$R_1 = 54 \text{ N}$$

$$R_2 = 54 \text{ N}$$

Este perfil se lo toma como una viga empotrada y para determinar el momento flector máximo se aplica la siguiente formula:

$$M = \frac{Q \cdot L}{8} \quad (20)$$

Dónde:

M: Momento flector máximo (Nm)

Q: Carga que soporta la viga (N)

L: Longitud de la viga (m)

$$M_1 = -\frac{54 \cdot 0,82}{8} = -5,53 \text{ N m}$$

$$M_p = \frac{54 \cdot 0,82}{8} = 5,53 \text{ N m}$$

$$M_2 = -\frac{54 \cdot 0,82}{8} = -5,53 \text{ N m}$$

El perfil usado es un tubo cuadrado como se muestra a continuación:

DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A mm	ESPEJOR mm	PESO Kg/m	AREA cm2	I cm4	W cm3	i cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97

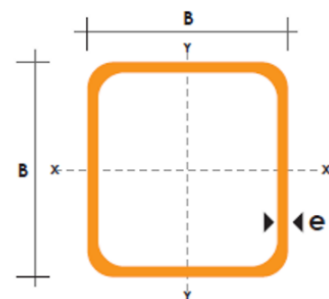


Figura 15-3. Perfil Tubo Cuadrado.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Además, se presenta los diagramas de cortante y momento flector.

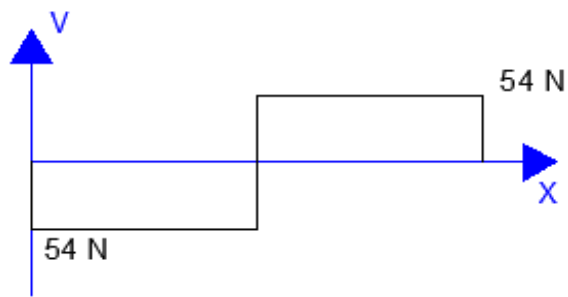


Figura 16-3. Diagrama de esfuerzo cortante - Tubo cuadrado.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

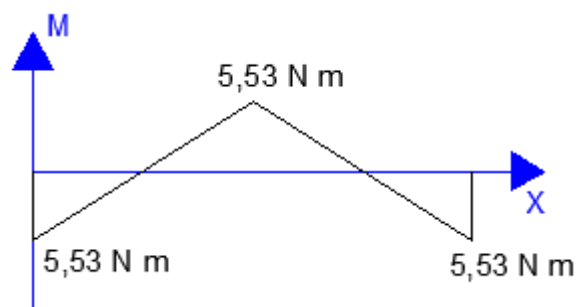


Figura 17-3. Diagrama de Momento Flector - Tubo cuadrado.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Con estos valores se calcula el esfuerzo cortante y de flexión para determinar el factor de seguridad.

Esfuerzo de flexión

$$\sigma_{Max} = \frac{M_{max}}{S} \tag{21}$$

Dónde:

σ_{Max} : Esfuerzo flector máximo (Pa)

M_{max} : Momento máximo (N · m)

S : Módulo sección (m^3)

$$S = \frac{C - C_1}{6 C} \tag{22}$$

$$S = \frac{0,03^4 - 0,026^4}{6 \cdot 0,03} = 1,96 \times 10^{-6} m^3$$

$$\sigma_{Max} = \frac{5,53 \text{ N m}}{1,96 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 2,82 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Esfuerzo Cortante

$$\tau_{Max} = \frac{V \cdot S}{I \cdot b} \quad (23)$$

Dónde:

τ_{Max} : Esfuerzo cortante máximo (Pa)

V : Fuerza cortante (N)

S : Módulo sección (m^3)

I : Momento de inercia (m^4)

b : Espesor de la sección transversal (m)

$$\tau_{Max} = \frac{54 \text{ N} \cdot 1,96 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{2,71 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \cdot 0,05 \text{ m}}$$

$$\tau_{Max} = 78,11 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Para calcular el coeficiente se aplica la teoría de Von Mises que se detalla a continuación:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau_{xy}^2} \quad (24)$$

Dónde:

σ' : Esfuerzo de Von Mises (MPa)

σ : Esfuerzo principal a flexión (MPa)

τ_{xy} : Esfuerzo principal a corte (MPa)

$$\sigma' = \sqrt{2,82 \times 10^6{}^2 + 3 \cdot (78,11 \times 10^3)^2}$$

$$\sigma' = 2,823 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Con este valor se calcula el coeficiente de seguridad:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (25)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

S_y : Esfuerzo de fluencia del material(MPa)

σ' : Esfuerzo de Von Mises (MPa)

El S_y se obtiene del Anexo A.

$$n = \frac{250 \text{ MPa}}{2,823 \text{ MPa}}$$

$$n = 88,5$$

3.4.2 Diseño de Eje

El eje es el elemento que sirve como conector entre la brida y el reductor de velocidad generando la rotación del mandril.

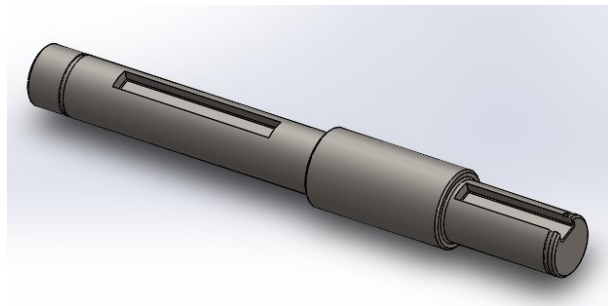


Figura 18-3. Modelado del eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.2.1 Coeficiente de seguridad del eje

Para el cálculo del coeficiente de seguridad del eje se lo analiza como una viga en voladizo con la aplicación de su carga crítica. En el diagrama de cuerpo libre la carga aplicada en el eje es de $W = 3 \text{ kg} = 29,4 \text{ N}$ con un momento de torsión $T = 15 \text{ N.m} = 15000 \text{ N.mm}$.

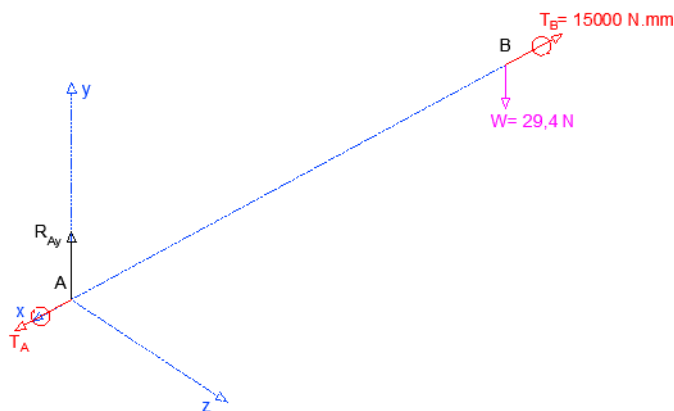


Figura 19-3. Diagrama de cuerpo libre del eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Para determinar el coeficiente de seguridad en el eje se utiliza el criterio de ASME B106.1M cuya ecuación se muestra a continuación:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{k_f \cdot Ma}{Se} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot Ta}{Se} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_f \cdot Mm}{Se} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot Tm}{Se} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (26)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

d : Diametro del eje (mm)

k_f : Factor Concentración de esfuerzo por fatiga de esfuerzo de la flexion (Adimensional)

k_{fs} : Factor Concentración de esfuerzo por fatiga de esfuerzo de la torsión (Adimensional)

Ma : Momento equivalente amplitud (MPa)

Mm : Momento equivalente medio (MPa)

Ta : Esfuerzo equivalente amplitud (MPa)

Tm : Esfuerzo equivalente medio (MPa)

Se : Límite a la fatiga (MPa)

Se calcula los momentos y esfuerzos que influyen en el eje.

$$M_{max} = W \cdot L \quad (27)$$

Dónde:

M_{max} : Momento Máximo (N · mm)

W : Carga (N)

L : Longitud (mm)

$$W = 29,4 \text{ N}$$

$$M_{max} = W \cdot L = 29,4 \text{ N} \cdot 60 \text{ mm} = 1764 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

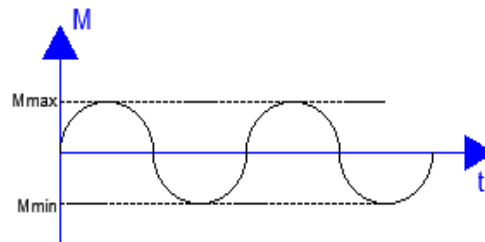


Figura 20-3. Diagrama de momentos máximo y mínimo - Eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Por medio del diagrama de momentos se puede determinar que el momento medio es $M_m = 0$ y el momento amplitud $M_a = 1764 \text{ N}\cdot\text{mm}$.

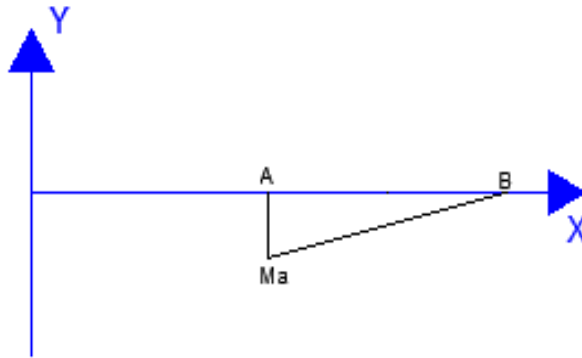


Figura 21-3. Diagrama de momento amplitud - Eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

El momento torsor que el eje soporta es de $15000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ el cual se representa de la siguiente manera:

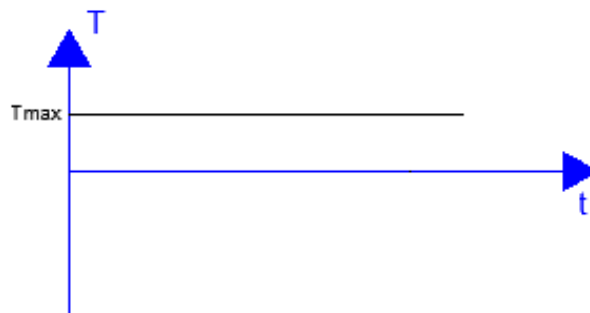


Figura 22-3. Diagrama del momento torsor máximo - Eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Con este valor se calcula los momentos torsesos medio y amplitud. El momento torsor medio equivale a $T_m = 15000 \text{ N}\cdot\text{mm}$ y el momento torsor amplitud $T_a = 0$.

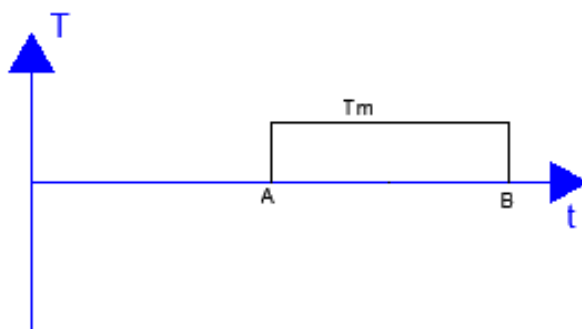


Figura 23-3. Diagrama del momento torsor medio - Eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Se puede observar en el diagrama de cuerpo libre del eje que el punto crítico es el punto A, con los valores previamente calculados se determina el coeficiente de seguridad

Punto Crítico A

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{k_f \cdot Ma}{Se} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot Ta}{Se} \right)^2 + 4 \left(\frac{k_f \cdot Mm}{Se} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot Tm}{Se} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{k_f \cdot Ma}{Se} \right)^2 + 3 \left(\frac{k_{fs} \cdot Tm}{Se} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$k_f = 1,7$$

$$k_{fs} = 1,6$$

$$k_{total} = 0,6$$

$$d = 14 \text{ mm}$$

Para asegurar el coeficiente de seguridad se selecciona diversos materiales para asegurar que el eje soporte las cargas analizadas.

Primero se analiza un Acero 1020 cuyas características $S_y = 207 \text{ MPa}$ y $S_{ut} = 379 \text{ MPa}$ obtenidas del Anexo B, para determinar el S_e se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_e = S_e' \cdot k_{total} \quad (28)$$

Dónde:

S_e : Límite de la Fatiga (MPa)

S_e' : Límite de la Fatiga de la probeta prueba (MPa)

k_{total} : Factor de concentración de esfuerzo (Adimensional)

Para determinar el límite de la fatiga de la probeta prueba se aplica la siguiente formula:

$$S_e' = 0,29 \cdot S_{ut} \text{ (Torsión)} \quad (29)$$

Dónde:

S_e' : Límite de la Fatiga de la probeta prueba (MPa)

S_{ut} : Esfuerzo ultimo (MPa)

$$S_e' = 0,29 \cdot 379 \text{ MPa} = 109,91 \text{ MPa}$$

$$S_e = 109,91 \text{ MPa} \cdot 0,6 = 65,946 \text{ MPa}$$

Con estos valores calculados se procede con el cálculo del coeficiente de seguridad.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi \cdot 14^3} \left[4 \left(\frac{1,7 \cdot 1764}{65,946} \right)^2 + 3 \left(\frac{1,6 \cdot 15000}{65,946} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$n = 0,84$$

Este valor es demasiado bajo por lo que se elige otro tipo de material.

Se escoge el acero 4140 cuyas características son: $S_y = 655 \text{ MPa}$ y $S_{ut} = 1020 \text{ MPa}$ obtenidas del Anexo C. A continuación, se determina el límite de fatiga y el coeficiente de seguridad.

$$S_e = S_{e'} \cdot k_{total}$$

$$S_{e'} = 0,29 \cdot S_{ut} = 0,29 \cdot 1020 = 295,8 \text{ MPa}$$

$$S_e = 295,8 \cdot 0,6 = 177,48 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi \cdot 14^3} \left[4 \left(\frac{1,7 \cdot 1764}{177,48} \right)^2 + 3 \left(\frac{1,6 \cdot 15000}{177,48} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$n = 2,27$$

Por lo tanto, se tiene un coeficiente de seguridad de $n = 2,27$, que es un valor aceptable, pero para brindar más confiabilidad al diseño se elige otro material.

El acero 4340 templado y recocido presenta las siguientes propiedades: $S_y = 1590 \text{ MPa}$ y $S_{ut} = 1720 \text{ MPa}$ obtenidas del Anexo C.

Se calcula su límite de fatiga para obtener su coeficiente de seguridad.

$$S_e = S_{e'} \cdot k_{total}$$

$$S_{e'} = 0,29 \cdot S_{ut} = 0,29 \cdot 1720 = 498,8 \text{ MPa}$$

$$S_e = 498,8 \cdot 0,6 = 299,28 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi \cdot 14^3} \left[4 \left(\frac{1,7 \cdot 1764}{299,28} \right)^2 + 3 \left(\frac{1,6 \cdot 15000}{299,28} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$n = 3,84$$

Este acero presenta un coeficiente de seguridad de 3,84 que brinda la confiabilidad necesaria al diseño.

3.4.2.2 Cálculo del coeficiente de seguridad del eje mediante Ansys

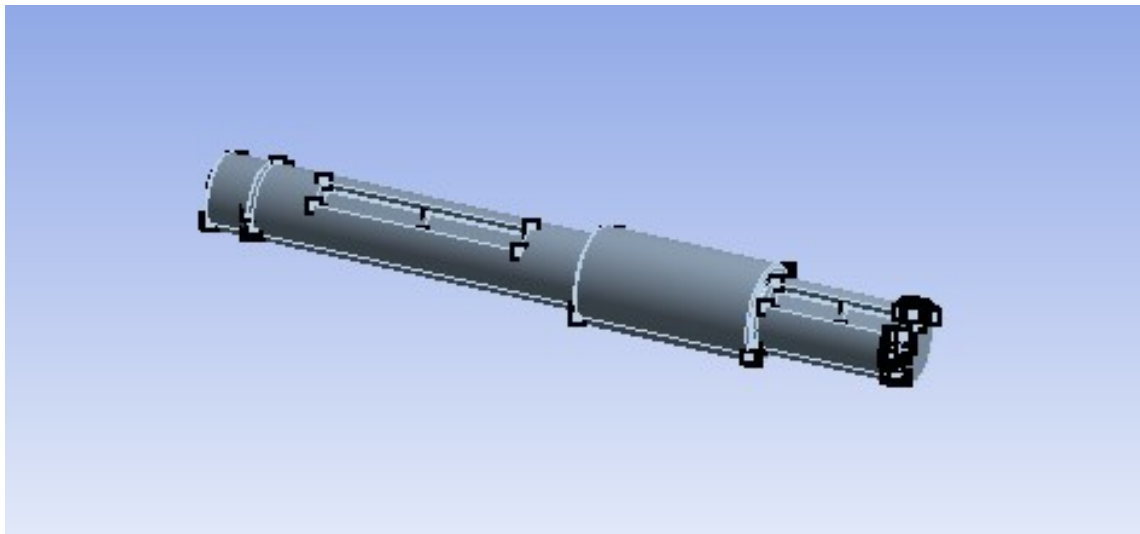


Figura 24-3. Modelado del eje en Ansys.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Por medio de elementos finitos que proporciona el software Ansys se determina el coeficiente de seguridad, el eje soporta una carga de 24,9 N y un momento torsor de 15000 N.mm, con estos valores se procede al análisis del eje.

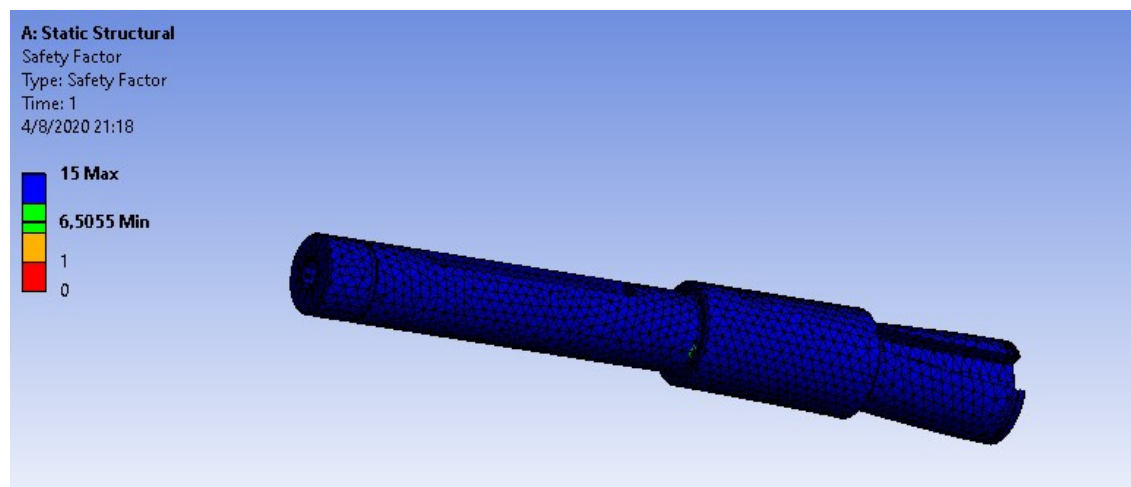


Figura 25-3. Coeficiente de seguridad del eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

El software Ansys nos proporciona un análisis más real del elemento al aplicar las cargas. Se observa un coeficiente de seguridad de 6,50, este valor nos asegura que el eje si va a resistir las cargas aplicadas.

3.4.2.3 Rigidez del eje

Es importante realizar el análisis de rigidez a torsión para determinar si el elemento cumple con las necesidades establecidas. Para realizar este análisis se debe calcular el ángulo de torsión y compararlo con el ángulo recomendable.

$$\theta = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad (30)$$

Dónde:

θ = Ángulo de torsión (rad)

T = Par de torsión (N.mm)

L = Longitud del eje (mm)

G = Módulo de rigidez (MPa)

J = Módulo polar de inercia (mm⁴)

A continuación, se presentan cada uno de los valores que son empleados para el análisis de rigidez del eje de transmisión.

$$T = 15000 \text{ N mm}$$

$$L = 123 \text{ mm}$$

$$G = 79460 \text{ MPa}$$

$$J = \frac{1}{2} \pi 7^4 = 3771,48 \text{ mm}^4$$

$$\theta = \frac{15000 \cdot 123}{79460 \cdot 3771,48} = 6,126 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\theta = 0,352^\circ$$

Para calcular la deformación angular máxima recomendada se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{1^\circ}{1 \text{ ft}} \cdot \frac{1 \text{ ft}}{304,8 \text{ mm}} = 3,28 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{mm}$$

$$3,28 \times 10^{-3} \frac{^\circ}{\text{mm}} \cdot 123 \text{ mm} = 0,4034^\circ$$

$$0,352^\circ < 0,4034^\circ$$

Se observa que la deformación angular es menor al recomendado, por lo que se concluye que el eje cumple con las necesidades de rigidez.

3.4.2.4 Diseño de chavetas del eje

Chaveta Eje - Reductor

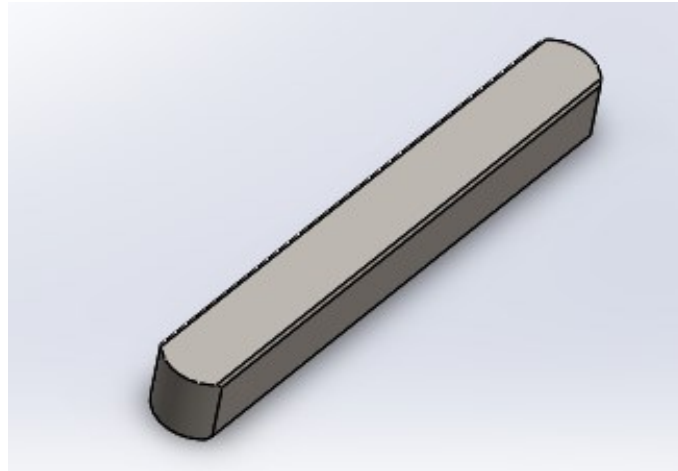


Figura 26-3. Chaveta Eje - Reductor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Esta chaveta proporciona seguridad y a su vez impide el deslizamiento de los elementos a quienes acopla, en este caso el eje y el reductor de velocidad. Para su análisis se debe basar en un esquema que permite calcular el coeficiente de seguridad para verificar si resiste las fuerzas aplicadas.

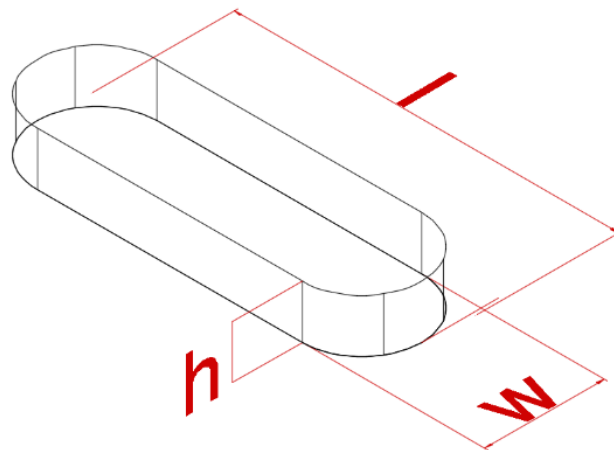


Figura 27-3. Esquema de chaveta Eje - Reductor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Las dimensiones de la chaveta son $l = 40 \text{ mm}$, $w = 5 \text{ mm}$ y $h = 5 \text{ mm}$.

Para la determinación del coeficiente de seguridad se deben realizar dos tipos de análisis. Falla a corte y falla a compresión.

Falla a Corte

Para este análisis se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{2 T}{d \cdot w \cdot l} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (31)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

T : Momento Torsor (N · mm)

d : diámetro (mm)

w : ancho (mm)

l : largo (mm)

S_{sy} : Esfuerzo de fluencia medio (MPa)

La fórmula para calcular el esfuerzo de fluencia medio es $S_{sy} = S_y \cdot 0,5$

El material usado en esta chaveta es Acero 1045 y tiene un $S_y = 310 \text{ MPa}$, obtenido del Anexo C.

$$\frac{2 \cdot 15000}{14 \cdot 5 \cdot 40} = \frac{0,5 \cdot 310}{n}$$
$$n = 14,46$$

Falla a Compresión

La fórmula para la falla a compresión es la siguiente:

$$\frac{4 T}{d \cdot l \cdot h} = \frac{S_y}{n} \quad (32)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

T : Momento Torsor (N · mm)

d : diámetro (mm)

h : altura (mm)

l : largo (mm)

S_y : Esfuerzo de fluencia (MPa)

$$\frac{4 \cdot 15000}{14 \cdot 40 \cdot 5} = \frac{310}{n}$$

$$n = 14,46$$

Los coeficientes de seguridad por falla a corte y falla compresión son de 14,46 asegurando la confiabilidad de la chaveta.

Chaveta Eje - Brida

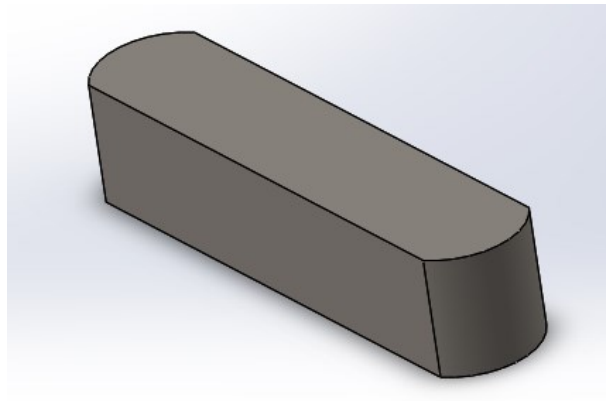


Figura 28-3. Chaveta Eje - Brida.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Esta chaveta se coloca entre el eje y la brida para la transmisión de torque y evitar que exista deslizamiento. La configuración de esta chaveta es la misma que la anterior pero diferentes dimensiones, estas son $l = 21 \text{ mm}$, $w = 5 \text{ mm}$ y $h = 5 \text{ mm}$.

El material usado es un Acero 1045 con un $S_y = 310 \text{ MPa}$ obtenido del Anexo C. Para el análisis de los coeficientes se utilizan las fórmulas previamente indicadas para el cálculo de falla a corte y compresión

Falla a Corte

$$\frac{2T}{d \cdot w \cdot l} = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$\frac{2 \cdot 15000}{14 \cdot 5 \cdot 23} = \frac{0,5 \cdot 310}{n}$$

$$n = 8,31$$

Falla a Compresión

$$\frac{4T}{d \cdot l \cdot h} = \frac{S_y}{n}$$

$$\frac{4 \cdot 50000}{14 \cdot 23 \cdot 5} = \frac{310}{n}$$

$$n = 8,31$$

En este caso se obtiene un coeficiente de seguridad de 8,31 para la falla a corte y falla de compresión.

3.4.2.5 Ajuste y tolerancias geométricas

La tolerancia geométrica permite conocer la desviación permisible en la medida que tiene las piezas. Además, es fundamental su uso para la normalización de los elementos, en caso de necesitar un reemplazo las tolerancias dimensionales nos dan un rango en el que las dimensiones de las piezas pueden diferir. En cuanto al ajuste permite que las piezas se acoplen de una manera correcta de acuerdo con los requerimientos del sistema. En la figura 29-3 se muestra las denominaciones utilizadas para ejes y agujeros.

Tolerancias y ajustes eje y agujero

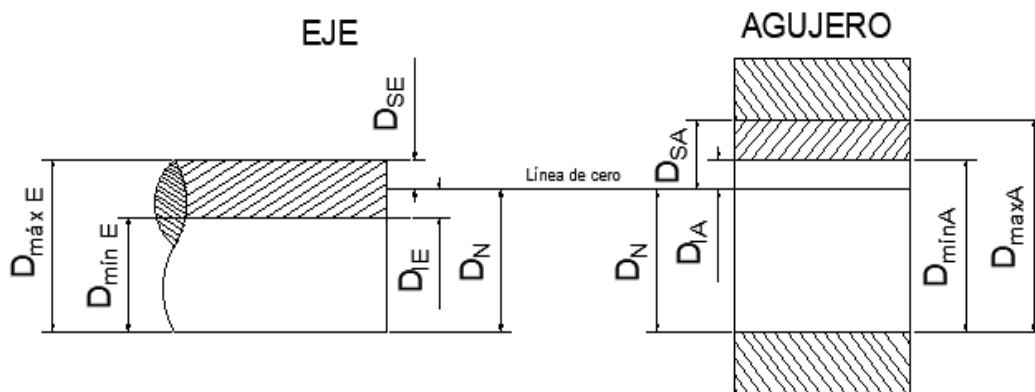


Figura 29-3. Denominación del eje y agujero para ajustes.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

A continuación, se detallan los significados de las denominaciones para ajustes:

D_N = Diámetro nominal

$D_{máx E}$ = Diámetro máximo eje

$D_{mín E}$ = Diámetro mínimo eje

$D_{I E}$ = Desviación inferior eje

$D_{S E}$ = Desviación superior eje

$D_{máx A}$ = Diámetro máximo agujero

$D_{mín A}$ = Diámetro mínimo agujero

$D_{I A}$ = Desviación inferior agujero

$D_{S A}$ = Desviación superior agujero

El eje tiene un diámetro nominal de 14 mm con una zona de tolerancia IT8, IT9 (Anexo D) la cual determina la calidad de manufactura o proceso de mecanizado, en este caso torneado. Además, se necesita un ajuste para el agujero que se lo determina mediante la tabla 7.8 y para el eje la tabla 8.8 del prontuario de máquinas de Larburu (Anexo E y Anexo F). Se necesita un ajuste deslizante lo que significa una tolerancia para el agujero H8 y para el eje h9. Con esto se determina el juego máximo y mínimo necesario entre el eje y agujero para que exista un correcto ensamble del acople. Los cálculos realizados se detallan a continuación:

$$D_{\max A} = D_N + D_{S A} \quad (33)$$

$$D_{\min A} = D_N + D_{I A} \quad (34)$$

$$D_{\max E} = D_N + D_{S E} \quad (35)$$

$$D_{\min E} = D_N + D_{I E} \quad (36)$$

$$J_{\max} = D_{\max A} - D_{\min E} \quad (37)$$

$$J_{\min} = D_{\min A} - D_{\max E} \quad (38)$$

Dónde:

J_{\max} : Juego máximo

J_{\min} : Juego mínimo

La representación del ajuste se realiza entonces de la siguiente manera:

$$14 \frac{h9}{H8}$$

Para el cálculo del diámetro máximo y mínimo del eje se tiene:

$$\text{Tolerancia } h9 \quad 14_{-0,043}^0$$

$$D_{\max E} = 14 + 0 = 14 \text{ mm}$$

$$D_{\min E} = 14 - 0,043 = 13,957 \text{ mm}$$

Para el cálculo del diámetro máximo y mínimo del agujero se tiene:

$$\text{Tolerancia } H8 \quad 14^{+0,027}_0$$

$$D_{\max A} = 14 + 0,027 = 14,027 \text{ mm}$$

$$D_{\min A} = 14 + 0 = 14 \text{ mm}$$

El cálculo del juego máximo y juego mínimo se presenta a continuación:

$$J_{\max} = 14,027 - 13,957 = 0,07 \text{ mm}$$

$$J_{\min} = 14 - 14 = 0 \text{ mm}$$

Tolerancias y ajustes chavetas

La tolerancia y ajuste utilizados en ambas chavetas del eje se determina por medio de la tabla 18.13 del prontuario de máquinas de Larburu (Anexo G). Se utiliza un ajuste normal con una tolerancia para el eje N9 y el cubo Js9. En la figura 30-3 se muestra un esquema de las tolerancias.

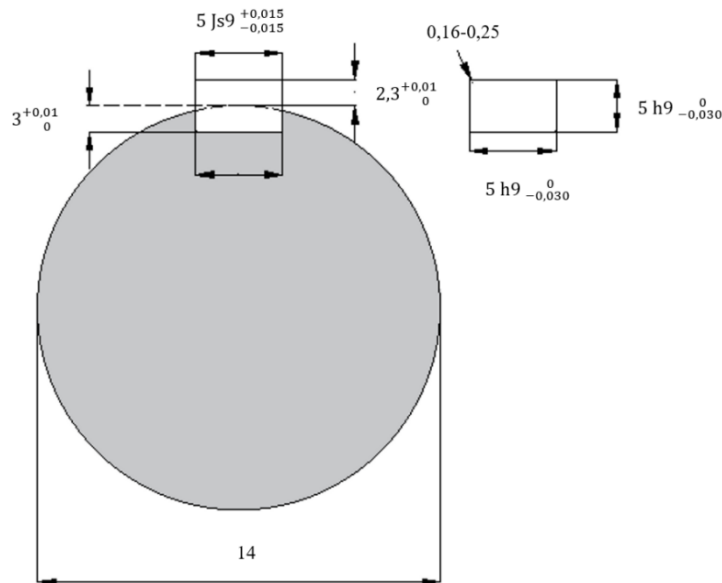


Figura 30-3. Diagrama de tolerancias para el eje y chaveta.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Por medio del Anexo G se determina las dimensiones necesarias de las chavetas. La primera chaveta tiene una configuración de 5x5x40mm. En cuanto a la segunda tiene una configuración de 5x5x23mm.

3.4.3 Diseño de la brida de acople con el eje

El diseño de esta brida permite conectar el eje con el mandril móvil, la carga que recibe este elemento es la torsión de 15000 N.mm.

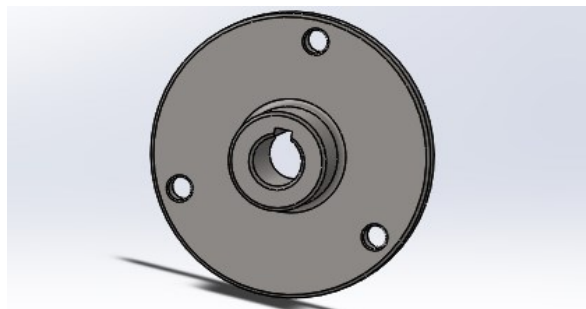


Figura 31-3. Brida de acople con eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.3.1 Cálculo de coeficiente de seguridad de la brida de acople con el eje

Antes del cálculo del factor de seguridad se presenta un esquema de representación de la brida en la figura 32-3.

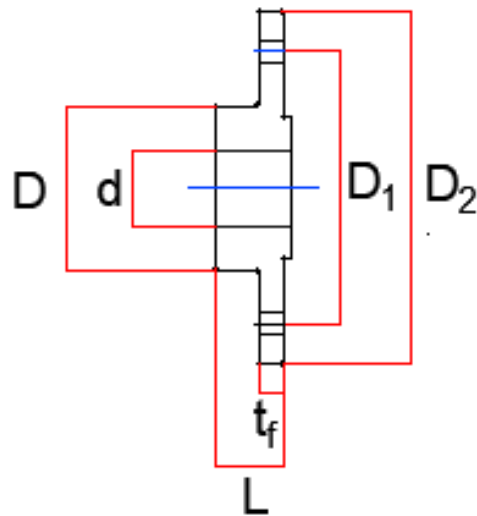


Figura 32-3. Representación de una brida y sus dimensiones.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Las dimensiones de la brida son las siguientes:

$$d = 14 \text{ mm}$$

$$D = 2d = 28 \text{ mm}$$

$$\# \text{ Pernos} = 3$$

$$D_1 = 66 \text{ mm}$$

$$D_2 = 80 \text{ mm}$$

$$L = 1,5 d = 21 \text{ mm}$$

$$t_f = 0,5 d = 7 \text{ mm}$$

Para el cálculo del coeficiente de seguridad se hace un análisis en base al esfuerzo de torsión y al esfuerzo cortante.

Esfuerzo a Torsión

Para este análisis se utiliza la siguiente formula:

$$\frac{16 \cdot T \cdot D}{\pi (D^4 - d^4)} = \frac{S_{ut}}{2 \cdot \eta} \quad (39)$$

Dónde:

η : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

T : Momento Torsor (N · mm)

D : Diámetro de brida (mm)

d : Diametro del eje (mm)

Sut : Resistencia de Fluencia (MPa)

Se ha seleccionado el acero 1020 con la propiedad $Sut = 379 \text{ MPa}$ obtenido Anexo B.

$$\frac{16 \cdot 15000 \cdot 28}{\pi (28^4 - 14^4)} = \frac{379}{2\eta}$$

$$2,49 \times 10^{-4} = \frac{379}{2\eta}$$

$$\eta = 51,05$$

Esfuerzo Corte

Para el análisis de esfuerzo a corte se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{2 \cdot T}{\pi \cdot D^2 \cdot t_f} = \frac{Sut}{2 \cdot \eta} \quad (40)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

T : Momento Torsor (N · mm)

D : Diámetro brida (mm)

t_f : *Espesor brida (mm)*

Sut : Resistencia de Fluencia (MPa)

$$\frac{2 \cdot 15000}{\pi \cdot 28^2 \cdot 7} = \frac{379}{2 \cdot \eta}$$

$$\eta = 108,90$$

Los coeficientes de seguridad son muy elevados, lo que indica un sobredimensionamiento del elemento, pero se utiliza esta configuración por razones funcionales y además los agujeros de los pernos pueden comportarse como concentradores de esfuerzo. Por ello se ha optado por la complementación del cálculo mediante el software Ansys.

3.4.3.2 Cálculo coeficiente seguridad de la brida de acople con el eje- Ansys.

El software Ansys nos permite determinar el coeficiente de seguridad de una forma más real considerando los pernos y sus agujeros.

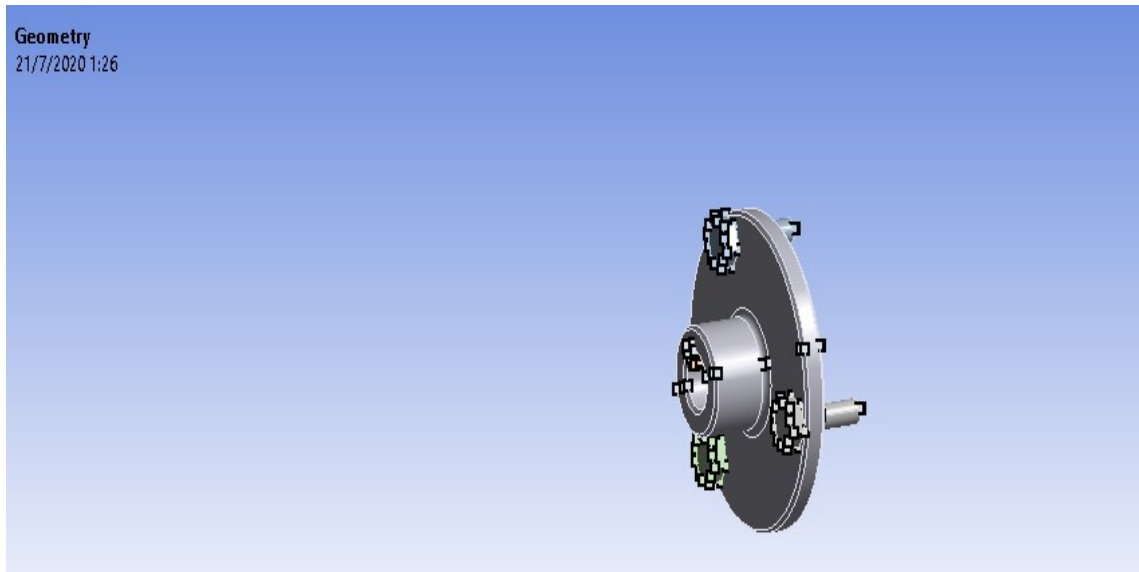


Figura 33-3. Modelado de la brida de acople con el eje - Ansys.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

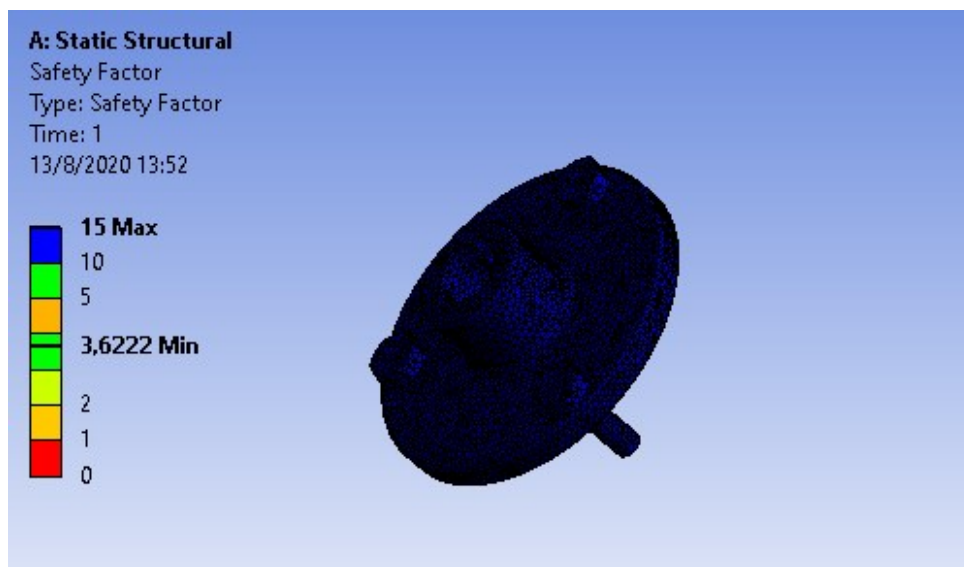


Figura 34-3. Coeficiente de seguridad de la brida de acople con el eje - Ansys.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Este análisis revela que la zona crítica efectivamente se presenta en el agujero de los pernos, pero el coeficiente de seguridad de 3,62 es más que aceptable pues brinda confiabilidad al elemento.

3.4.3.3 Cálculo del coeficiente de seguridad de pernos de la brida de acople con eje.

Los tres pernos que acoplan la brida con el mandril rotatorio están sometidos a un momento torsor de 15000 N.mm. En la figura 35-3 se presenta de fuerzas a las que se encuentran sometidos los pernos.

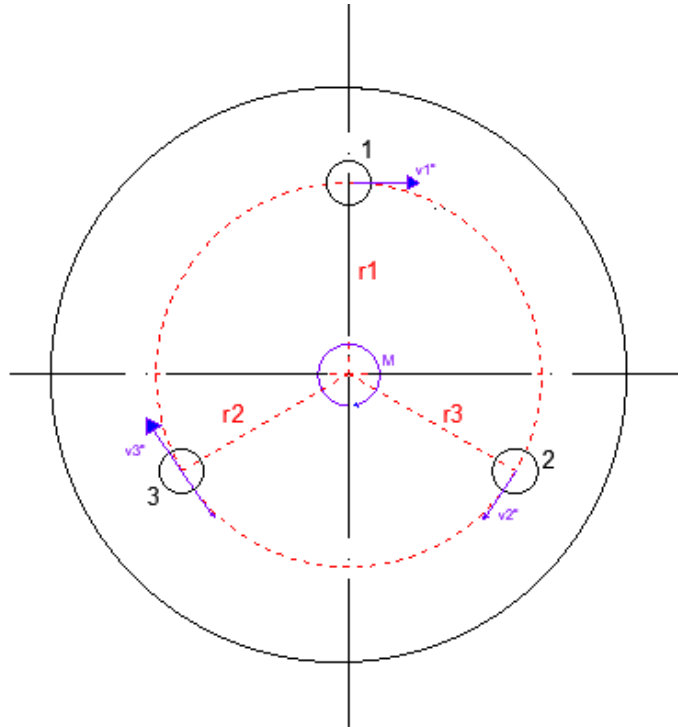


Figura 35-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el eje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

EL esquema presentado revela que se debe realizar análisis correspondiente a un esfuerzo cortante secundario, que actúa sobre cada uno de los pernos. Para este análisis nos basamos de la siguiente ecuación:

$$V_i'' = \frac{T \cdot r_i}{\sum r^2} \quad (41)$$

Dónde:

V_i'' : Corte Secundario (N)

T : Momento torsor (N · mm)

r_i : Distancias de los pernos al centro del elemento (mm)

$\sum r^2$: Sumatoria al cuadrado de las distancias de los pernos (mm²)

$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 33 \text{ mm}$

$$\sum r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 = 3267 \text{ mm}^2$$

$$V_i'' = \frac{15000 \cdot 33}{3267} = 151,52 \text{ N}$$

Para el cálculo del coeficiente de seguridad se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{V_i}{A_r} = \frac{S_{sy}}{\eta} \quad (42)$$

Dónde:

n : Coeficiente de seguridad (Adimensional)

V_i : Esfuerzo Corte (N)

A_r : Área diseño corte (mm^2)

S_{sy} : Resistencia minima a la fluencia (MPa)

Para el cálculo del S_{sy} se utiliza la siguiente expresión: $S_{sy} = 0,5 S_y$

Se tiene un perno M6 y en la tabla 8-1 (Anexo H) de (Budynas, Nisbett, 2012) se obtiene el valor de A_r que es igual a $17,9 \text{ mm}^2$. Los pernos son de grado 4,6 con este parámetro se obtiene de la tabla 8-11 de (Budynas, Nisbett, 2012) el valor de $S_y = 240 \text{ MPa}$ obtenido Anexo I.

$$V_i = V_i'' = 151,52 \text{ N}$$

$$A_r = 17,9 \text{ mm}^2$$

$$S_{sy} = 0,5 (240) = 120 \text{ MPa}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación de coeficiente de seguridad se obtiene:

$$\frac{151,52}{17,9} = \frac{120}{n}$$

$$n = 14,18$$

El coeficiente de seguridad calculado es de 14,18 valor que representa una alta confiabilidad y verifica que los pernos no presentarán fallo por cizalladura.

3.4.4 Diseño de la brida de acople con el sensor

Este elemento permite el acople entre el sensor de torsión y el mandril no rotatorio. La carga aplicada a este elemento es igual al que se aplicó en la brida anterior, un momento torsor con un valor de 15000 N.mm. En la figura 36-3 se presenta el elemento modelado mediante el software SolidWorks.

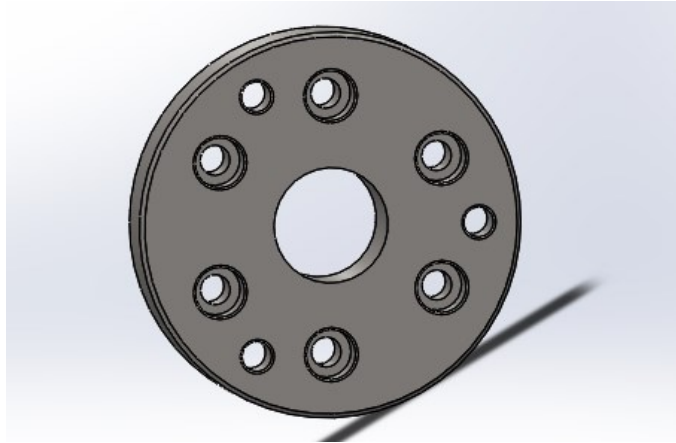


Figura 36-3. Brida de acople con el sensor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.4.1 *Cálculo de coeficiente de seguridad de la brida de acople con el sensor.*

Antes del cálculo del factor de seguridad nos basamos en el esquema presentado anteriormente en la figura 32-3. Las dimensiones para la brida de acople con el sensor son las siguientes:

$$d = 14 \text{ mm}$$

$$D = 2d = 28 \text{ mm}$$

$$\# \text{ Pernos} = 6$$

$$D_1 = 66 \text{ mm}$$

$$D_2 = 80 \text{ mm}$$

$$L = 1,5 d = 21 \text{ mm}$$

$$t_f = 0,5 d = 7 \text{ mm}$$

Para el cálculo del coeficiente de seguridad se hace un análisis en base al esfuerzo de torsión y al esfuerzo cortante.

Esfuerzo a Torsión

Se utiliza la misma fórmula de esfuerzo a torsión aplicada para el caso de la brida de acople con el eje. El material utilizado es un Acero 1020 que tiene un $S_{ut} = 379 \text{ MPa}$.

$$\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D^3} = \frac{S_{ut}}{2 \cdot \eta} \quad (43)$$

$$\frac{16 \cdot 15000}{\pi \cdot 28^3} = \frac{379}{2\eta}$$

$$\eta = 54,45$$

Esfuerzo Corte

Para el análisis de esfuerzo a corte se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{2 \cdot T}{\pi \cdot D^2 \cdot t_f} = \frac{S_{ut}}{2 \cdot \eta} \quad (44)$$

$$\frac{2 \cdot 50000}{\pi \cdot 28^2 \cdot 7} = \frac{379}{2 \eta}$$

$$\eta = 108,90$$

Los coeficientes de seguridad son muy elevados, pero se utiliza esta configuración por razones funcionales y nuevamente se debe complementar el cálculo mediante el software Ansys por la presencia de los agujeros de los pernos pueden comportarse como concentradores de esfuerzo.

3.4.4.2 Cálculo del coeficiente de seguridad de la brida sensor mediante Ansys

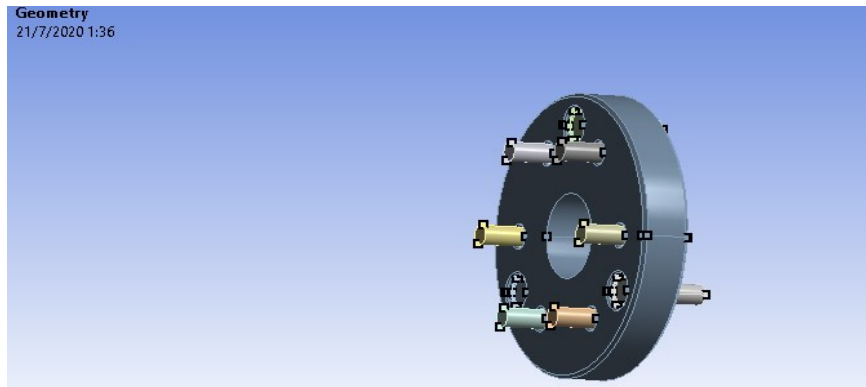


Figura 37-3. Modelado de la brida de acople con el sensor - Ansys.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Para el análisis de esta brida se toma en cuenta el momento torsor de 15000 N.mm. Además de las conexiones de los pernos que están presentes para tener una simulación más real.

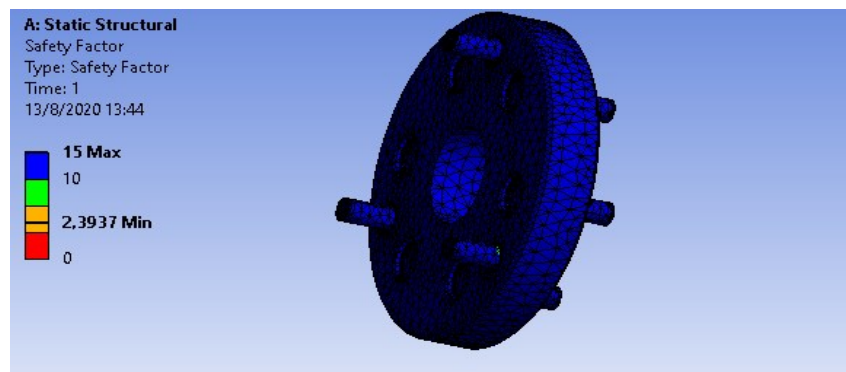


Figura 38-3. Coeficiente de seguridad de la brida de acople con el sensor - Ansys.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Este análisis revela que la zona crítica efectivamente se presenta en el agujero de los pernos, pero el coeficiente de seguridad de 2,39 es aceptable pues brinda confiabilidad al elemento.

3.4.4.3 Cálculo del coeficiente de seguridad de pernos de la brida de acople con el sensor

Para el cálculo del coeficiente de seguridad de esta brida se realiza dos análisis por separado de los pernos para determinar su comportamiento. Primero realizamos el análisis de los pernos que acopla el sensor con la brida.

En la figura 39-3 se muestra el comportamiento de los pernos y las fuerzas a las que están sometidos cuando el momento torsor es aplicado, lo que provoca un esfuerzo cortante secundario. Por lo tanto, se obtiene un corte secundario y se aplica la siguiente fórmula:

$$V_i'' = \frac{T \cdot r_i}{\sum r^2} \quad (45)$$

Dónde:

V_i'' : Corte Secundario (N)

T : Momento torsor (N · mm)

r_i : Distancias de los pernos al centro del elemento (mm)

$\sum r^2$: Sumatoria al cuadrado de las distancias de los pernos (mm²)

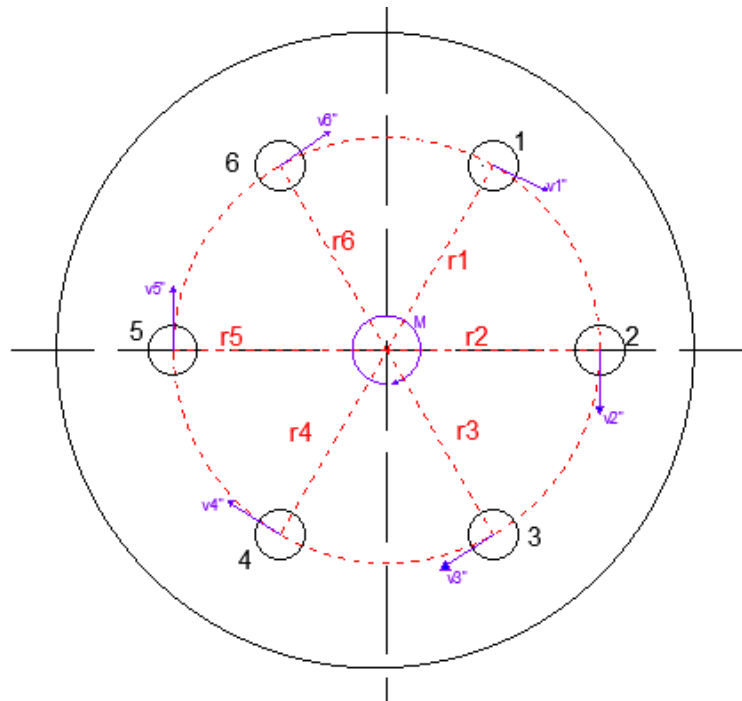


Figura 39-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el sensor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Al realizar los cálculos respectivos obtenemos:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 28,5 \text{ mm}$$

$$\sum r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2 + r_5^2 + r_6^2 = 4873,5 \text{ mm}^2$$

$$V_i'' = \frac{15000 \cdot 28,5}{4873,5} = 87,72 \text{ N}$$

Para el cálculo del coeficiente de seguridad se utiliza la expresión mencionada anteriormente:

$$\frac{V_i}{A_r} = \frac{S_{sy}}{\eta} \quad (46)$$

Previamente se indicó de donde se obtienen estos valores. Al reemplazarlos en las ecuaciones obtenemos el siguiente resultado del coeficiente de seguridad.

$$V_i = V_i'' = 292,4 \text{ N}$$

$$A_r = 17,9 \text{ mm}^2$$

$$S_{sy} = 0,5 (240) = 120 \text{ MPa}$$

$$\frac{87,72}{17,9} = \frac{120}{\eta}$$

$$\eta = 24,48$$

El resultado obtenido es de 24,48 valor que representa una alta confiabilidad y verifica que los pernos no presentarán fallo por cizalladura.

Finalmente se analiza los pernos de acople del mandril no rotatorio con la brida.

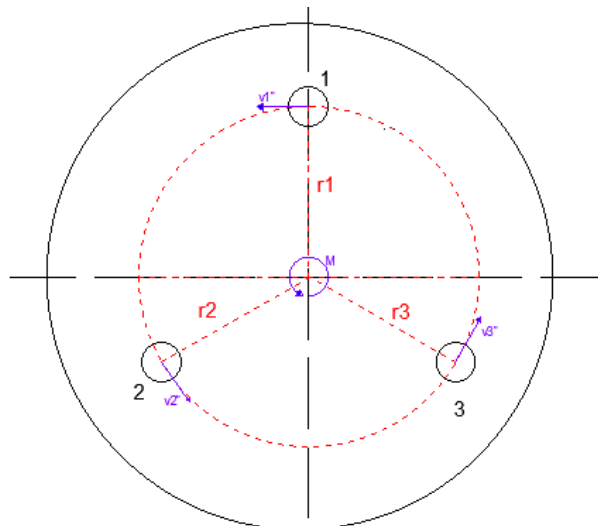


Figura 40-3. Diagrama de fuerzas sobre los pernos de la brida de acople con el mandril.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

En la figura 40-3 se muestra el comportamiento de los pernos y las fuerzas a las que están sometidos cuando el momento torsor es aplicado, lo que provoca un esfuerzo cortante secundario. Por ende, se aplica el mismo principio.

$$V_i'' = \frac{T \cdot r_i}{\sum r^2} \quad (47)$$

$$r_1 = r_2 = r_3 = 33 \text{ mm}$$

$$\sum r^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 = 3267 \text{ mm}^2$$

$$V_i'' = \frac{15000 \cdot 33}{3267} = 151,51 \text{ N}$$

Para el cálculo del coeficiente de seguridad se utiliza la siguiente expresión:

$$\frac{V_i}{A_r} = \frac{S_{sy}}{\eta} \quad (48)$$

$$V_i = V_i'' = 292,4 \text{ N}$$

$$A_r = 17,9 \text{ mm}^2$$

$$S_{sy} = 0,5 (240) = 120 \text{ MPa}$$

$$\frac{151,51}{17,9} = \frac{120}{\eta}$$

$$\eta = 14,18$$

El resultado obtenido es de 14,18 valor que representa una alta confiabilidad y verifica que los pernos no presentarán fallo por cizalladura.

3.4.5 Selección de componentes electrónicos

Se procede con los diversos elementos electrónicos que componen la máquina de torsión respecto a la alternativa de soluciones establecidos en el diseño conceptual.

3.4.6 Selección del motor

El principal parámetro para la selección del motor paso a paso y el reductor de velocidad es el torque o par suficiente que deben generar ambos elementos para vencer las cargas resistivas. En este caso el torque de diseño es de 15 N.m que debe ser proporcionado por el motor y el reductor.

La información más relevante para lograr el movimiento requerido es:

- Cantidad de pulsos del microcontrolador
- Resolución del motor (Angulo de giro por paso)

- Velocidad de indexación (frecuencia de pulsos)
- Torque requerido con un factor de seguridad del 50% al 100 % (1,5 a 2)

lo motores paso a paso tienen diferentes tipos de perfiles de movimiento, los más utilizados son el perfil “partir-parar” y el perfil “trapezoidal”. El primer perfil es el más básico de todos ya que no existe un periodo de aceleración o desaceleración y es usado solamente para aplicaciones de baja velocidad. En cuanto al perfil trapezoidal se usa en aplicaciones de alta velocidad con una rampa de aceleración y una de desaceleración. Por las bajas velocidades de operación, en este diseño se utiliza el perfil “partir-parar”.

3.4.6.1 Parámetros iniciales de diseño

Es necesario asumir ciertos valores para comenzar con la selección del motor. Partiendo del catálogo de reductores de velocidad, la serie NRV es compatible con los motores paso a paso NEMA. Basándonos en los valores de torque suministrado comenzamos el proceso de selección con el modelo NRV030 que, dependiendo de la velocidad de rotación y la potencia del motor, proporciona un torque que va el rango de 17 a 29 N.m. Este modelo de reductor está diseñado para trabajar con el motor NEMA 23.

La relación de transmisión y la velocidad de rotación de salida son datos preestablecidos que están a criterio del diseñador. El torque requerido está definido por la capacidad de la maquina (15 N.m). Estos y otros parámetros iniciales se muestran en la tabla 29-3.

Tabla 29-3: Parámetros iniciales de diseño.

Parámetro	Símbolo	Modelo / Valor
Reductor de Velocidad	-	NRV030
Motor paso a paso	-	NEMA 23
Relación de transmisión	i	40
Velocidad de rotación (Salida)**	ω_2	360°/min
Pasos por revolución del motor	θ_p	200 pasos/rev
Torque de diseño	T_{dis}	15 N.m
Factor de seguridad del motor	η_m	2,0

**Nota: Se considera la velocidad máxima de rotación a la salida del reductor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.6.2 Velocidad del tren de pulsos

La velocidad del tren de pulsos se trata de la frecuencia con la que el microcontrolador envía los pulsos hacia el driver del motor para efectuar el movimiento. Al variar este parámetro se varía también la velocidad de rotación del motor. La velocidad del tren de pulsos se determina con la siguiente expresión:

$$f_{ss} = \frac{\theta_p \cdot \omega_2 \cdot i}{21600} \quad (49)$$

Donde:

f_{ss} : Velocidad del tren de pulsos (Hz)

θ_p : Número de pasos por revolución del motor (*pulsos/rev*)

ω_2 : Velocidad de rotación de salida ($^{\circ}/min$)

i : Relación de transmisión

$$f_{ss} = \frac{200 \cdot 360 \cdot 40}{21600} \text{ Hz}$$

$$f_{ss} = 133,33 \text{ Hz}$$

Para la programación del microcontrolador es necesario determinar el valor inverso a la frecuencia, es decir, el período con la particularidad de que estará en función de la velocidad de rotación a la salida ω_2 . Ya que el microcontrolador emite un pulso de encendido y apagado el valor del período debe dividirse a la mitad y debe estar expresado en microsegundos. Este valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$t_{pulso} = \frac{2,16 \cdot 10^{10}}{2 \cdot \omega_2 \cdot i \cdot \theta_p} \quad (50)$$

Reemplazando con $i = 40$ y $\theta_p = 200$ tenemos:

$$t_{pulso} = \frac{135000}{\omega_2} \quad (51)$$

Dónde:

t_{pulso} : Tiempo entre pulsos (μs)

ω_2 : Velocidad de rotación de salida ($^{\circ}/min$)

3.4.6.3 Torque resistivo

El torque que debe ser suministrado por el motor debe ser mayor que el torque resistivo con la aplicación de un factor de seguridad entre 50% a 100% (1,5 a 2) dependiendo del sistema, esto con el fin de evitar que el motor pierda pasos o se detenga por completo al no ser capaz de vencer la carga resistiva.

El proceso de selección se basa en determinar el torque necesario del motor a través de la preselección del reductor, el cálculo de la eficiencia de este y la aplicación del factor de seguridad.

Partimos del catálogo del reductor de velocidad donde indica que se debe aplicar un factor de servicio (f_s) al torque de diseño, el cual depende del tipo del tipo de carga, la frecuencia de arranque y parada, y las horas de operación al día. En el gráfico 1-3 se determina el factor de servicio.

El tipo de carga puede ser:

- A - Uniforme
- B - Carga de choque moderada
- C - Carga de choque pesada

La carga que se aplica al sistema es uniforme (A), con una frecuencia de arranque parada máxima de 5 veces por hora y una frecuencia de operación de 8 horas al día, obteniendo un factor de servicio de 1,0 ($f_s=1,0$).

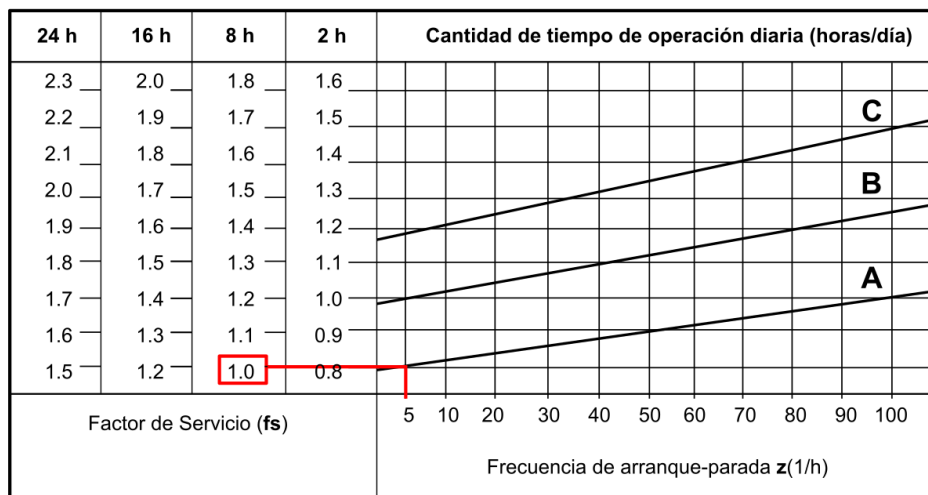


Gráfico 1-3. Factor de servicio (f_s).

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Este factor de servicio debe ser ajustado dependiendo de la temperatura de operación de la siguiente manera:

Temperatura de trabajo:

- 30~40°C: $f_s \cdot (1,1 \sim 1,2)$
- 40~50°C: $f_s \cdot (1,3 \sim 1,4)$
- 50~60°C: $f_s \cdot (1,5 \sim 1,6)$

La temperatura de trabajo a la que está expuesta la máquina no excede los 30°C, por lo tanto, escogemos el valor mínimo de ajuste, obteniendo el factor de servicio ajustado:

$$f_s = 1,0 \cdot 1,1 = 1,1$$

El torque en el reductor se obtiene al multiplicar el torque de diseño por el factor de servicio, obteniendo:

$$T_{reductor} = T_{dis} \cdot f_s \quad (52)$$

$$T_{reductor} = (15 \cdot 1,1) N.m$$

$$T_{reductor} = 16,5 N.m$$

La eficiencia dinámica del reductor η_d depende de la velocidad de rotación de entrada ω_1 . La información proporcionada en el catálogo presenta valores torque nominal del reductor y potencia de entrada para diferentes velocidades de rotación. Relacionando la potencia de entrada con la potencia de salida es posible determinar el valor de la eficiencia dinámica. Dichos valores se presentan en la tabla 19-3. Debido a que la velocidad de rotación de entrada no se encuentra en el catálogo, se utiliza la herramienta de línea de tendencia de Excel que genera una ecuación con la que podemos determinar el valor de la eficiencia dinámica para cualquier valor de velocidad de rotación de entrada (gráfico 2-3).

Tabla 30-3: Eficiencia mecánica del reductor de velocidad NRV030.

P₁	n₁	Tn₂	n₂	P₂	η_d
(W)	(rpm)	(W)	(W)	(W)	(-)
160	2800	14	70,0	102,6	0,64
110	1400	18	35,0	66,0	0,60
90	900	21	22,5	49,5	0,55
60	500	24	12,5	31,4	0,52

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Debido a que la eficiencia dinámica es directamente proporcional a la velocidad de rotación, se debe calcular con el valor mínimo de esta en lugar de la máxima ($\omega_{1min} = 6 \text{ rpm}$). Aplicando la ecuación del gráfico 2-3 obtenemos el valor de la eficiencia dinámica del reductor.

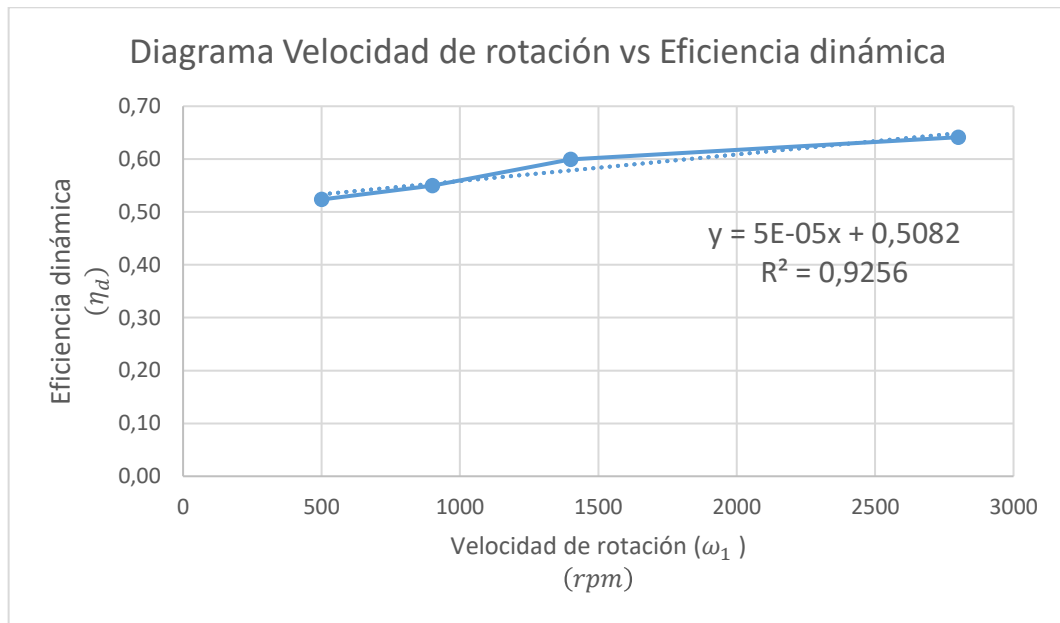


Gráfico 2-3. Diagrama Velocidad de rotación vs Eficiencia dinámica.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene la eficiencia dinámica del motor.

$$\eta_d = 5 \times 10^{-5}(\omega_1) + 0,5082 \quad (53)$$

$$\eta_d = 5 \times 10^{-5}(6) + 0,5082$$

$$\eta_d = 0,51$$

Se procede a calcular el torque resistivo mediante la siguiente expresión:

$$T_{resistivo} = \frac{T_{reductor}}{i \cdot \eta_d} \quad (54)$$

Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$T_{resistivo} = \frac{16,5}{40 \cdot 0,51} \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_{resistivo} = 0,809 \text{ N} \cdot \text{m}$$

3.4.6.4 Torque del motor

El torque del motor se calcula mediante la aplicación del factor de seguridad sobre el torque resistivo. Este factor de seguridad brinda la confiabilidad necesaria al diseño y asegura un

óptimo desempeño del motor. El torque requerido para el motor se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_m = T_r \cdot \eta_m \quad (55)$$

Al reemplazar los valores se obtiene:

$$T_m = (0,809 \cdot 2,0) N \cdot m$$

$$T_m = 1,618 N \cdot m$$

Con el valor del torque del motor y la velocidad de rotación máxima de este se puede graficar el área de trabajo del motor cuando esté en funcionamiento. Esta área se la sobrepone sobre la curva torque - velocidad de rotación, del motor que se vaya a seleccionar. En la serie NEMA 23 el modelo M1233061 se ajusta a las necesidades que requiere el sistema. En el gráfico 3-3 se presenta la curva de este modelo y el área de trabajo que, como se puede observar queda por debajo de la curva de funcionamiento del motor, en otras palabras, el motor posee un torque mayor al requerido permitiendo que cumpla su función sin ningún inconveniente. En la tabla 31-3 se presentan las características de este tipo de motor a pasos.

En conclusión, el sistema queda compuesto por el motor NEMA 23 modelo M1233061, junto con el reductor de velocidad NRV030, que proporcionan un torque de 15 N.m con un factor de seguridad de 2,0.

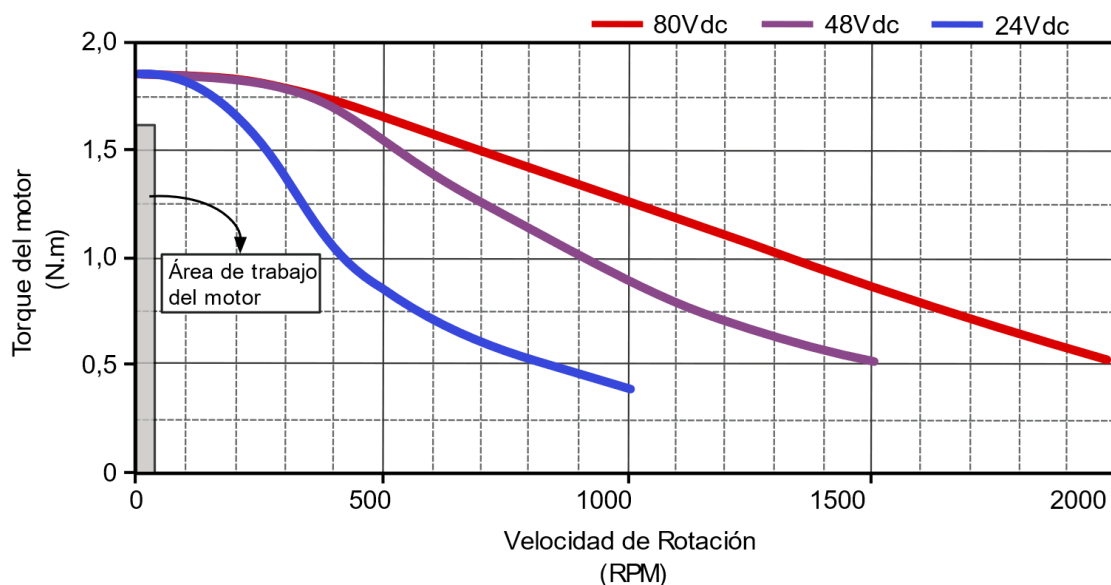


Gráfico 3-3. Curva del motor NEMA 23 -M1233061.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 31-3: Características del motor Nema 23.

Características	Nema 23
Ángulo por paso	1,8°
Voltaje Nominal	24 VDC
Corriente	3 A
Torque	1.8 N.m
Resistencia por fase	2,2 Ohm
Inercia del motor	440 g/cm ²
Dimensiones	(56 x 56 x 76) mm
Peso	1050 g
Longitud del cable	80 cm

Fuente: (Frs-CNC, 2018).

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.7 Sistema de Control y Programación

El equipo se controla mediante la pantalla Nextion NX8048T050 la cual recibe y envía información constantemente hacia el microprocesador. Debido a que un solo procesador no puede ejecutar esta acción mientras envía los pulsos necesarios para el movimiento del motor se utilizan dos placas microcontroladoras comunicadas entre sí mediante el bus I2C (Inter-Integrated Circuit). Este tipo de bus facilita la comunicación entre microcontroladores por medio de dos líneas de señal y un común o masa (SCL, SDA y GND). Por lo tanto, se dividen las tareas en una placa Arduino Mega y una placa Arduino UNO. En la tabla 32-3 se presentan las características de estos dos microcontroladores, mientras que en la tabla 33-3 se muestran sus funciones. La conexión mediante el bus I2C requiere un maestro y un esclavo, en este caso la placa Arduino Mega desempeña la función de maestro, mientras que la placa Arduino UNO se conecta como esclavo. Ambos microcontroladores están en constante comunicación, es decir, envían y reciben datos uno del otro.

El sistema de control del equipo se basa en el uso de microcontroladores, sensores y actuadores. Estos dispositivos son capaces de recibir información del entorno, procesarla, registrarla y actuar sobre dicho entorno en función de los datos almacenados o requerimientos del usuario. Los sensores recogen la información del entorno y la envían hacia el sistema de control para su procesamiento. El sistema de control (microcontroladores) procesa los datos, determinando si es necesaria alguna acción sobre el entorno. Si es así entran en juego los actuadores que son

dispositivos que realizan acciones que repercuten sobre el entorno. El sistema de control utilizado en el equipo se muestra en la figura 41-3.

Tabla 32-3: Características de las placas Arduino UNO y Arduino Mega.

Características	Arduino UNO	Arduino Mega
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560
Voltaje de Operación	5V	5V
Voltaje de Entrada	7-12 V	7-12V
Pines de E/S digital	14 (6 salida PWM)	54 (15 salida PWM)
Pines de entrada analógica	6	16
Corriente CC por cada pin	20 mA	20 mA
Memoria Flash	32 KB	256 KB
SRAM	2KB	8 KB
EEPROM	1 KB	4 KB
Frecuencia de Reloj	16 MHz	16 MHz

Fuente: (Electronics, 2020).

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 33-3: Funciones de los microcontroladores Arduino Mega y Uno.

Arduino Mega	Arduino UNO
Lectura y envío de datos hacia la pantalla Nextion.	Envío de pulsos hacia el motor.
Lectura de valores provenientes del sensor de Torque.	Control de velocidad del motor.
Cálculo de valores (Esfuerzo, Deformación a Cortante).	Lectura de valores desde el Encoder.
Control del ventilador.	Cálculo de valores del ángulo de giro.
Control del botón de paro de emergencia.	Cálculo del número de vueltas.
Almacenamiento de datos.	-
Envío de información hacia el computador.	-

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

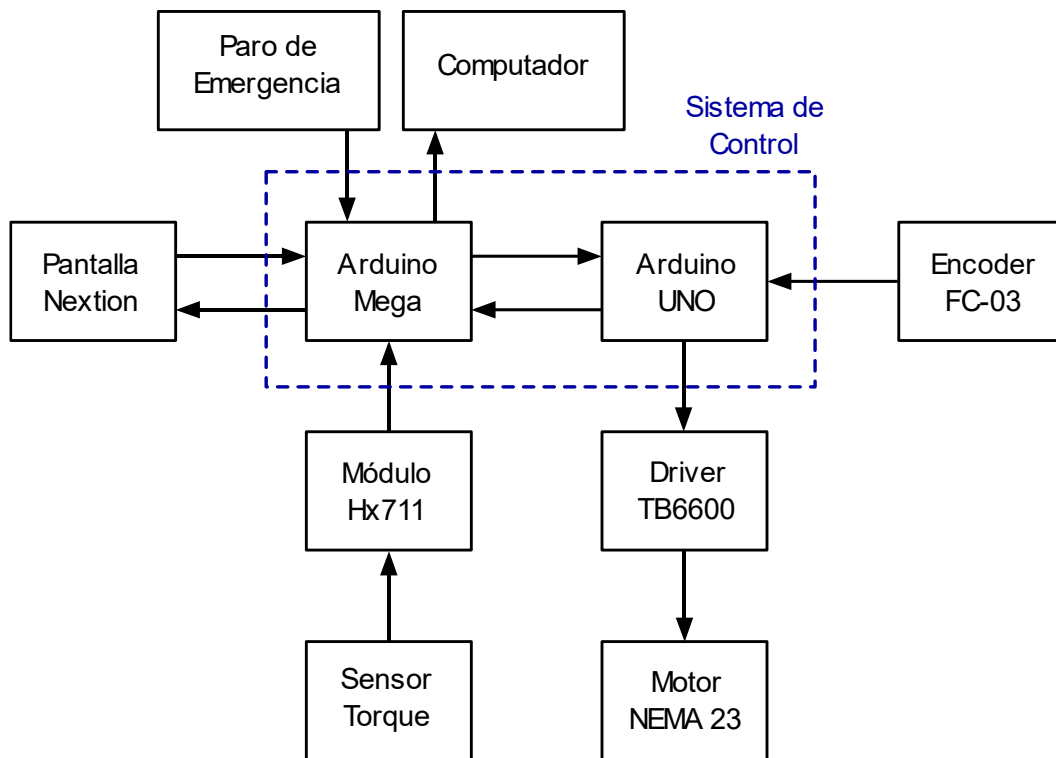


Figura 41-3. Esquema del sistema de control.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.7.1 *Arduino Mega y Arduino UNO*

La programación de Arduino se realiza mediante el software Arduino IDE y su lenguaje de programación está basado en C++. Este es un lenguaje de medio nivel que maneja variables básicas como caracteres, números, bits y direcciones de memoria. Para la programación de los microcontroladores se deben descargar todas las librerías necesarias, las cuales son códigos que facilitan mucho la programación y permite simplificar el código principal. Se ha hecho uso de cuatro librerías para la elaboración del programa que se detallan a continuación.

I2C (Wire.h)

La librería Wire.h permite la comunicación entre dispositivos a través del bus I2C, la cual resulta muy útil ya que todos los dispositivos pueden estar conectados mediante dos cables, SDA (datos) y SCL (reloj) y, conexión común a GND. Estos pines están definidos de acuerdo con la placa microcontroladora que se esté usando. Para Arduino Mega tenemos los pines 20 y 21 para SDA y SCL respectivamente. Mientras que Arduino UNO usa los pines A4 para SDA y A5 para SCL.

Protothreads (pt.h)

Se trata de una biblioteca C que puede ser usada por Arduino cuyo principal objetivo es proporcionar una forma más sencilla de programación para sistemas controlados por eventos en entornos con memoria limitada. Ya que en Arduino no es posible ejecutar múltiples acciones a la vez (multitarea) esta librería brinda una sensación parecida, al crear múltiples “hilos” en los cuales están divididas las tareas que deben realizarse. Es así como mientras una tarea requiera una pausa, en lugar de usar el comando “delay” (que pausa por completo la ejecución del programa) se usa el comando “PT_WAIT_UNTIL”, el cual no pausa el programa, sino que solamente pone en pausa la tarea. Ese tiempo de pausa es usado por el microcontrolador para realizar otras tareas, dando la sensación de que el microcontrolador es capaz de efectuar multitareas, aunque en realidad no es así. Es de mucha utilidad en el sistema para la lectura de sensores, envío y adquisición de datos hacia la pantalla y el control del motor paso a paso.

Nextion library (Nextion.h)

La librería de Nextion permite la comunicación entre el microcontrolador (Arduino) y la pantalla. Sus comandos son sencillos de entender lo que hace que la programación sea mucho más fácil y compacta, simplificando el programa. Para su utilización se debe inicializar la comunicación serie de Arduino (Tx y Rx), para lo cual se conecta la pantalla hacia los pines 16 y 17 de la placa Arduino Mega. La librería basa su utilización en la creación de objetos (números, texto, botones, páginas, etc.) los cuales pueden ser modificados por el microcontrolador. Es por medio de esto que la visualización de datos se lleva a cabo, modificando los valores presentados en la pantalla de acuerdo con los cambios medidos por los sensores y cálculos que realice el microcontrolador. Además, de la visualización esta comunicación permite emitir órdenes desde la pantalla hacia el controlador, dando órdenes de encendido, apagado, pausa, ingresando variables, etc.

Módulo Hx711 (HX711.h)

Esta librería permite la comunicación del módulo Hx711 con la placa microcontroladora. El módulo está diseñado para su uso con celdas de carga las cuales emiten señales en milivoltios, amplificándolos para su procesamiento en el microcontrolador. La librería tiene una estructura sencilla y permite funciones de comunicación mediante pines digitales, encendido (tare), escala de medida (set_scale) y lectura de valores (get_value).

Los códigos de programación utilizados se presentan en el Anexo J para Arduino Mega y Anexo K para Arduino UNO.

3.4.8 Pantalla Nextion NX8048T050

La pantalla Nextion cumple la función de HMI (Interfaz Hombre - Máquina) lo que no solo nos permite la visualización de datos, sino también controlar al equipo. Utiliza un puerto serie para hacer la comunicación con el microcontrolador. El software Nextion Editor posee componentes masivos tales como botones, texto, barra de progreso, slider, panel de instrumentos, etc. lo que confiere una gran versatilidad al momento de programar el software (Nextion, 2020). Por medio de esta pantalla se configura los parámetros iniciales y se visualiza los resultados del ensayo. En la tabla 34-3 se presentan las características de la pantalla Nextion NX8048T050 mientras que en la figura 42-3 se muestra una ilustración de esta.



Figura 42-3. Pantalla Nextion NX8048T050.

Fuente: (Nextion, 2020).

Tabla 34-3: Características Pantalla Nextion NX8048T050.

Características	Nextion NX8048T050
Tamaño	5.0 “
Resolución	800x480
Panel táctil	RTP (Panel táctil resistivo)
Color	65536
Flash	16 Mb
RAM	3584 Bytes
MCU	48 MHz

Fuente: (Nextion, 2020).

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

En este apartado se presenta una descripción de la interfaz utilizada, la cual fue diseñada mediante el software Nextion Editor.

La interfaz cuenta con una página de presentación, una página de inicio y tres páginas principales. Las dos primeras páginas no presentan datos relevantes por lo que no se detallan sus componentes, pero se ilustran en la figura 43-3 y la figura 44-3.



Figura 43-3. Página de Presentación de la pantalla.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Figura 44-3. Página de Inicio de la pantalla.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

La página principal muestra los datos relacionados con el ensayo. Se pueden visualizar las variables de torque, esfuerzo, ángulo de giro, número de vueltas, deformación a cortante y el tiempo empleado en el ensayo. Además, consta de botones de control los cuales desempeñan distintas funciones. En la figura 45-3 se puede observar la página principal y su descripción.



Figura 45-3. Página Principal de la pantalla.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Cuando el botón de ajustes es pulsado se redirecciona hacia la página de ajustes en donde se ingresan los parámetros de la probeta que se va a ensayar. Entre ellos tenemos el tipo de sección, diámetro, longitud y la velocidad de giro del ensayo. En la figura 46-3 se muestra la página de ajustes y sus elementos.



Figura 46-3. Página de Ajustes de la pantalla.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

En la página de diagrama se presenta la Curva Esfuerzo vs Deformación a cortante, donde se pueden graficar hasta 570 pares de puntos que es la capacidad que tiene el microcontrolador. Además, desde esta página se pueden enviar los valores almacenados en el microcontrolador hacia el computador, específicamente hacia el programa Excel donde los datos pueden ser procesados de mejor manera. La figura 47-3 ilustra la pantalla de diagrama y sus principales componentes.



Figura 47-3. Página de Diagrama de la pantalla.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.4.8.1 Conexión Arduino Mega - Excel

La transferencia de los datos almacenados en el microcontrolador que hace el papel de maestro (Arduino Mega) con el computador se realiza por medio de un ejecutable el cual fue diseñado y programado mediante el software Visual Basic. La comunicación se realiza a través del puerto serie de Arduino y el computador y por donde se realiza la transferencia de datos hacia el programa Excel. El programa consta de un buscador de puerto serial y un botón para establecer conexión con la placa microcontroladora. Al presionar el botón “Enviar” en la pantalla los datos de torque, ángulo de giro, esfuerzo y deformación a cortante son enviados desde la placa hacia el computador y se almacenan en cuatro cuadros de texto para posteriormente ser enviados al programa Excel. En la hoja de cálculo se presentan cuatro columnas donde se almacenan respectivamente estas variables, además una quinta columna transforma el valor de la deformación a cortante de grados a radianes. También posee una celda donde indica el esfuerzo máximo producido y dos curvas, una para el torque vs ángulo de giro y otra para el esfuerzo vs

deformación a cortante. El código utilizado en Visual Basic se presenta en el Anexo L. La figura 48-3 muestra la interfaz del ejecutable para la importación de datos.

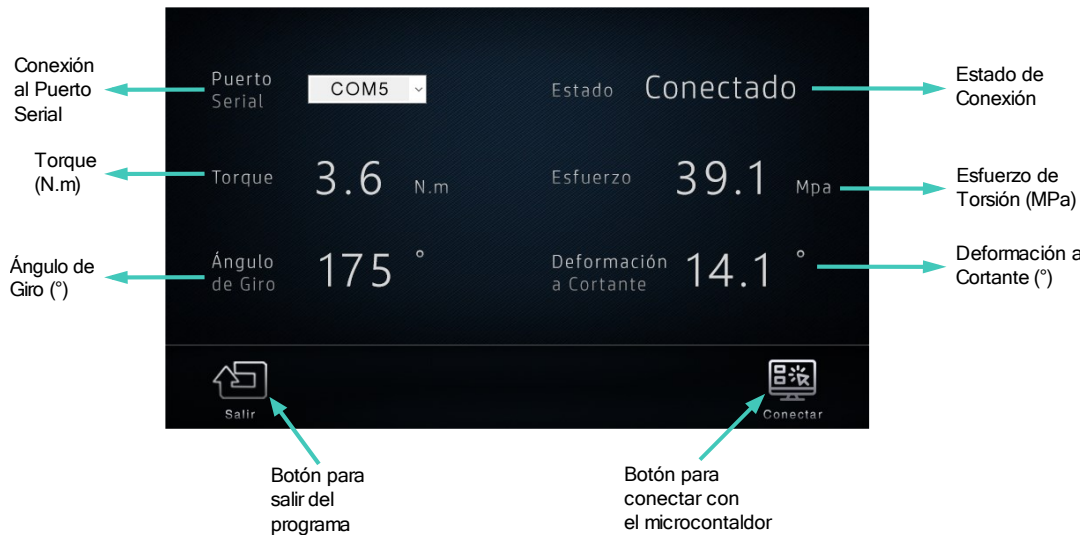


Figura 48-3. Interfaz del programa de conexión Arduino - Excel.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5 Diseño de detalle

En esta etapa se explica el procedimiento de la construcción de la máquina para lo cual, siguiendo las etapas anteriores se generó un esquema de las conexiones necesarias de cada uno de los componentes electrónicos, además de los planos de cada elemento mecánico. También se establecen los procesos de mecanizado necesarios para fabricar las piezas que han sido diseñadas y sus respectivos tiempos de producción. El cursograma respectivo de construcción y montaje de la máquina establece el procedimiento de ensamblado del equipo y el tiempo de duración. Además, se presenta la calibración realizada a los sensores que integran el equipo y su porcentaje de error.

3.5.1 Conexión Eléctrica

La conexión eléctrica del equipo se muestra en la figura 49-3. Para mejor visualización y comprensión del diagrama de conexión se lo divide en bloques, donde se detallan los pines utilizados de cada uno de los elementos. La división se realiza de acuerdo con la función que cumplen los elementos, teniendo en total cinco bloques:

- Elementos de Alimentación
- Panel de Control
- Microcontroladores
- Sensores
- Actuadores

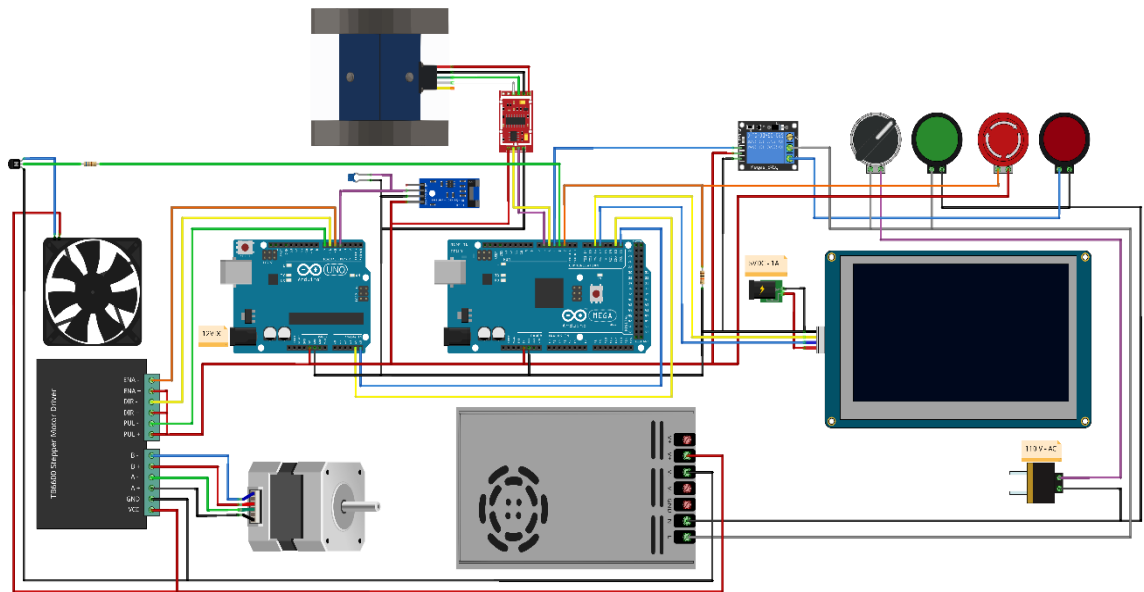


Figura 49-3. Diagrama de conexión eléctrica.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.2 Elementos de Alimentación

La fuente de poder es el principal elemento de alimentación. Posee una entrada de 110VAC y la salida proporciona 12VDC con una capacidad de hasta 10A. En la figura 50-3 se muestra la conexión de este elemento.

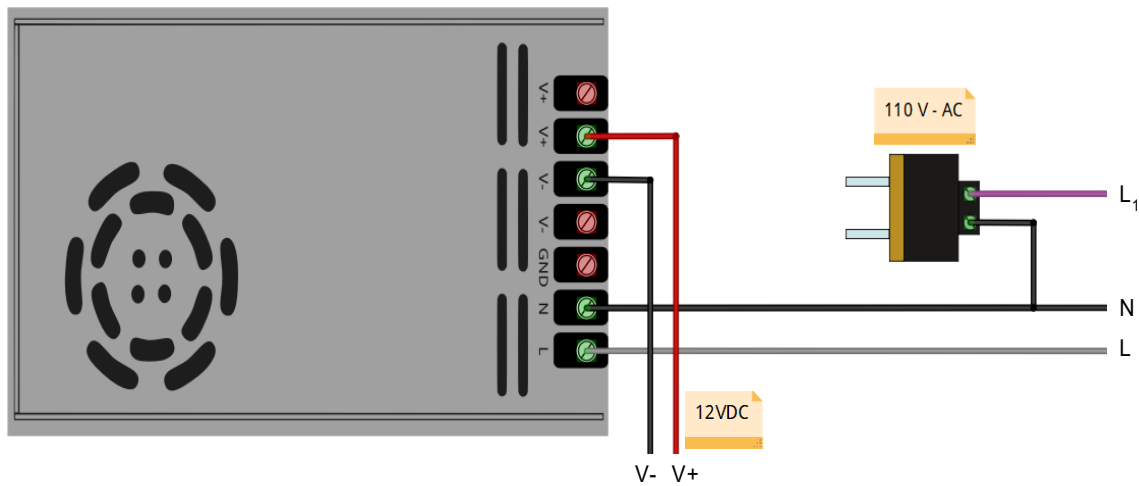


Figura 50-3. Conexión - Elementos de alimentación.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.3 Panel de Control

En el panel de control se encuentran elementos como el interruptor On/Off, botón de paro de emergencia, indicadores (luz piloto) y la pantalla de visualización de datos. La figura 51-3 ilustra la conexión de los interruptores e indicadores, mientras que la figura 52-3 muestra la

conexión de la pantalla Nextion. La denominación de los pines de los elementos se realiza mediante etiquetas, con el fin de indicar la conexión entre los distintos bloques. Los pines de 5V y GND pueden ser conectados a cualquiera de los dos microcontroladores, ya sea la placa Arduino Mega o la placa Arduino UNO.

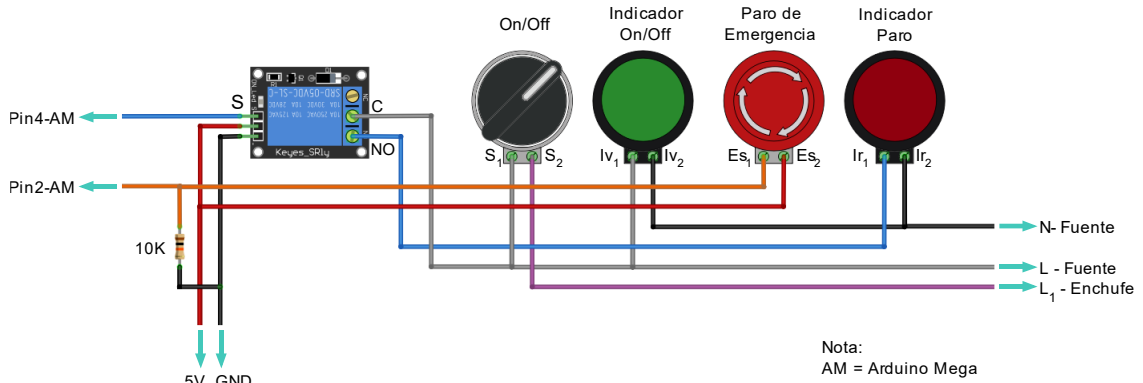


Figura 51-3. Conexión - Panel de Control.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

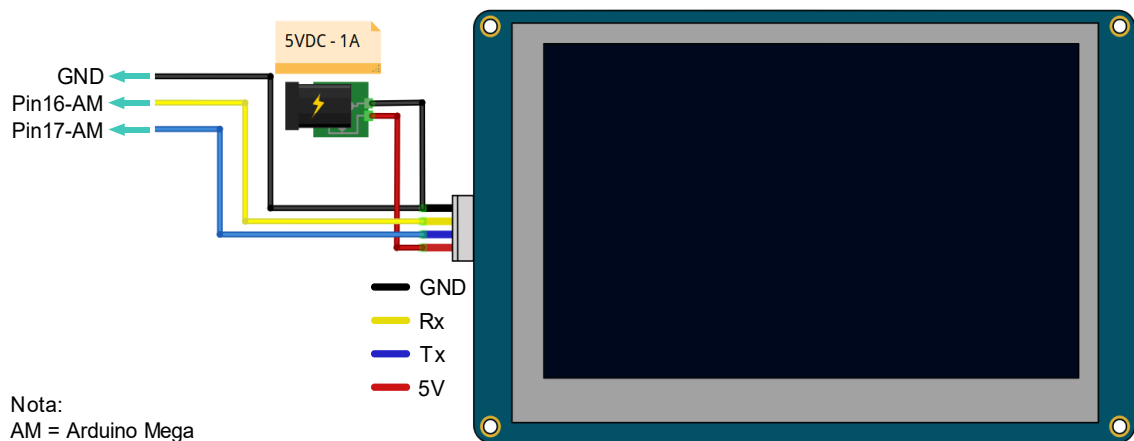


Figura 52-3. Conexión - Pantalla Nextion NX8048T050.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.4 Microcontroladores

Los microcontroladores conforman el sistema de control de la máquina, se tratan de los dispositivos que procesan toda la información del equipo. Este sistema se encarga de recibir las señales provenientes del entorno detectadas por los sensores, procesarlas y luego, enviar respuestas hacia el entorno mediante los actuadores. Los microcontroladores Arduino Mega y Arduino UNO conforman este sistema y todos los demás componentes del equipo se encuentran conectados a ellas. El diagrama de conexión para el microcontrolador principal (Arduino Mega) se muestra en la figura 53-3, mientras que para el microcontrolador secundario (Arduino UNO) se ilustra en la figura 54-3.

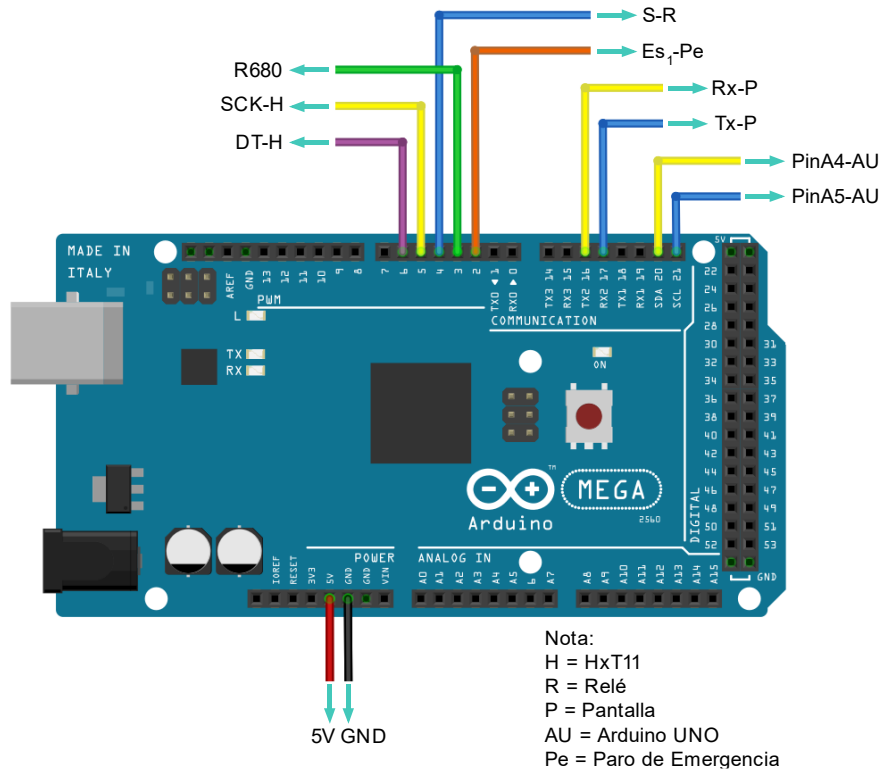


Figura 53-3. Conexión - Arduino Mega.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

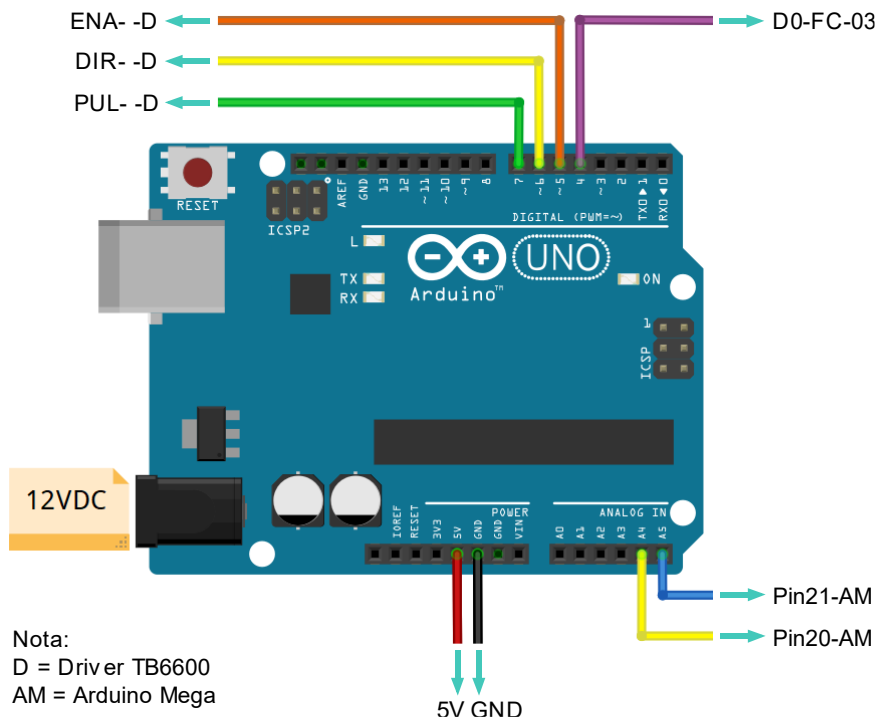


Figura 54-3. Conexión Arduino UNO.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.5 Sensores

Los sensores son aquellos dispositivos que brindan información del entorno hacia los microcontroladores para su procesamiento. Los elementos que componen este bloque son el sensor de torque, el módulo Hx711 y el módulo FC-03. Los dos primeros elementos están conectados al microcontrolador principal y su diagrama de conexión se ilustra en la figura 55-3. El módulo FC-03, encargado de la medición del ángulo de giro, se conecta al microcontrolador secundario y su diagrama de conexión se ilustra en la figura 56-3.

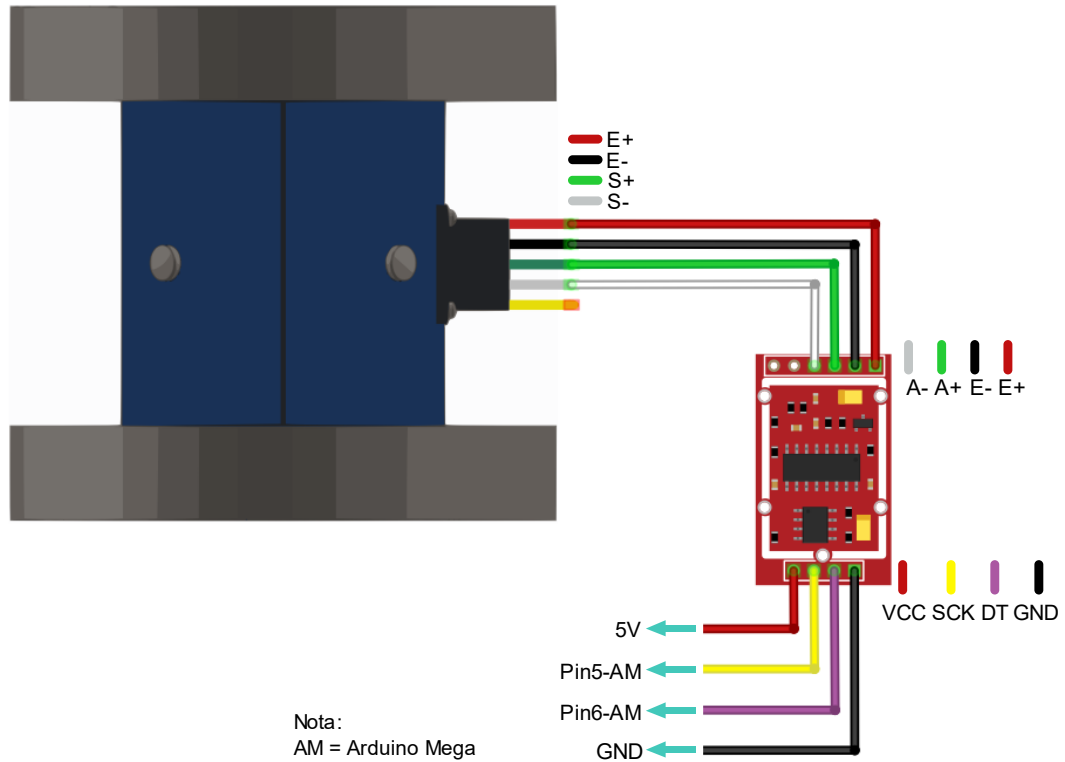


Figura 55-3. Conexión - Sensor de torque y módulo Hx711.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

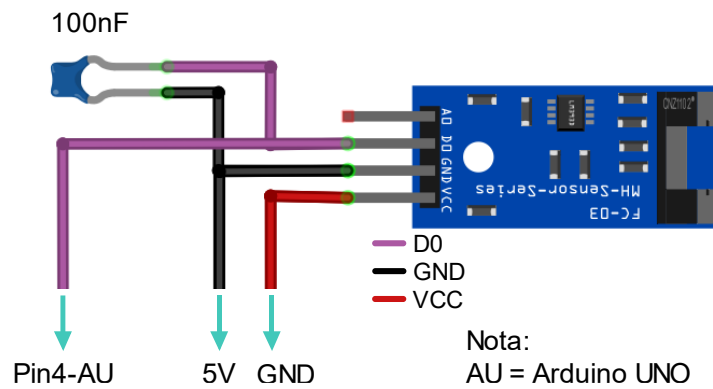


Figura 56-3. Conexión - FC-03.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.6 Actuadores

Los actuadores son los dispositivos que permiten efectuar un cambio en el entorno. Los elementos que componen este bloque son el motor NEMA 23, el driver TB6600 y el ventilador. El diagrama de conexión del motor y del driver se presenta en la figura 57-3, mientras que la figura 58-3 ilustra el diagrama de conexión del ventilador.

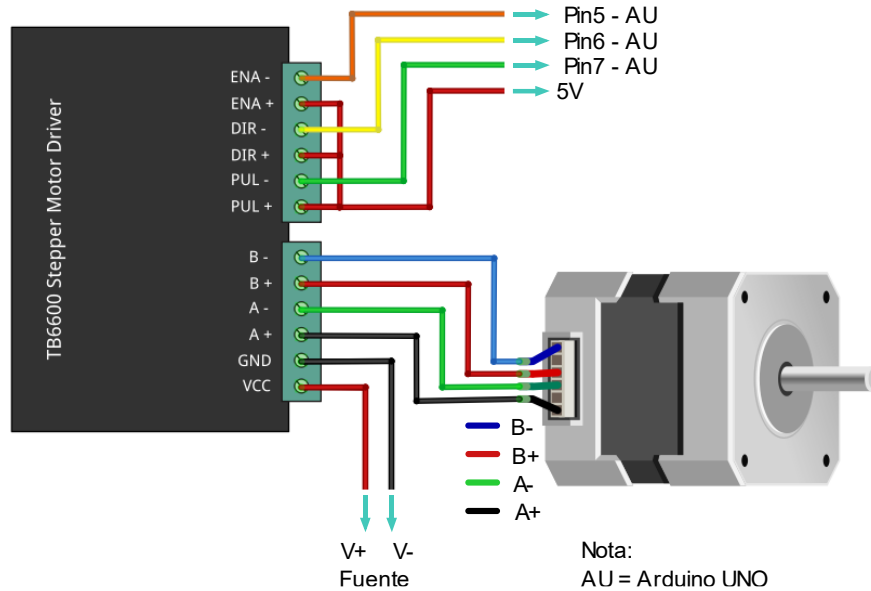


Figura 57-3. Conexión - Motor NEMA 23 y Driver TB6600.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

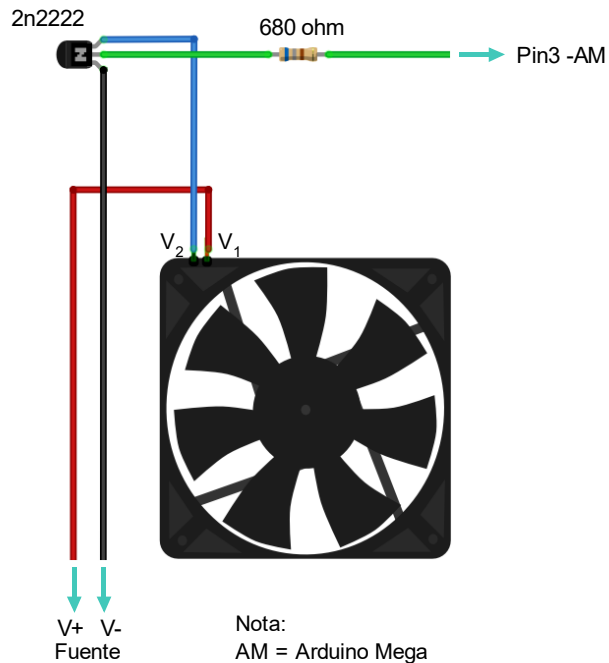


Figura 58-3. Conexión - Ventilador.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.7 Construcción de la máquina

En este apartado se describe el proceso de construcción del equipo. Se detallan procesos de mecanizado, tiempos de construcción y montaje, y la secuencia del ensamblado final del equipo. En la figura 59-3 se muestra una fotografía del equipo totalmente ensamblado y funcional.



Figura 59-3. Máquina para ensayos de torsión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.8 Procesos de mecanizado y tiempos de construcción

Para la construcción de toda máquina es necesaria la mecanización de piezas que no están estandarizadas, que ya sea por su complejidad o funcionalidad deben ser construidas de manera específica. En la tabla 35-3 se presentan todos los elementos que fueron mecanizados, divididos por sistemas y detallando su proceso de mecanizado y el tiempo que conlleva cada uno de ellos.

Tabla 35-3: Elementos, procesos de mecanizado y tiempos de construcción.

Sistema	Elemento	Nº	Operación	Tiempo (min)	Nº Figura
Estructural	Bastidor	1	Medición	30	Figura 58-3
		2	Corte	60	
		3	Pre-soldado	60	
		4	Verificación de medidas	30	
		5	Soldado	120	
		6	Pulido	100	
		7	Taladrado	180	
		8	Pintado	60	

Tabla 35-3: (Continuación) Elementos, procesos de mecanizado y tiempos de construcción.

Estructural	Tableros de madera	9	Medición	40	Figura 59-3
		10	Corte	60	
		11	Taladrado	120	
	Base para mordaza y sensor	12	Medición	30	Figura 60-3
		13	Corte	60	
		14	Rectificado	40	
		15	Taladrado	120	
		16	Soldado	60	
		17	Pulido	40	
		18	Pintado	30	
	Base para reductor de velocidad	19	Medición	30	Figura 61-3
		20	Corte	40	
		21	Rectificado	40	
		22	Taladrado	120	
		23	Soldado	60	
		24	Pulido	40	
		25	Pintado	30	
	Placa Base	26	Medición	20	Figura 62-3
		27	Corte	40	
		28	Rectificado	40	
		29	Perforaciones	180	
30		Roscado	60		
31		Pintado	60		
Transmisión	Eje de transmisión	32	Medición	10	Figura 63-3
		33	Corte	15	
		34	Refrentado	40	
		35	Torneado	180	
		36	Taladrado	40	
		37	Roscado	40	

Tabla 35-3: (continuación) Elementos, procesos de mecanizado y tiempos de construcción.

Transmisión	Brida de acople Eje-Mordaza	38	Medición	10	Figura 64-3	
		39	Corte	15		
		40	Refrentado	30		
		41	Torneado	180		
		42	Taladrado	60		
	Brida de acople Sensor-Mordaza	43	Medición	10	Figura 65-3	
		44	Corte	15		
		45	Refrentado	30		
		46	Torneado	120		
		47	Taladrado	90		
		48	Abocardado	90		
		49	Roscado	60		
	Control	Caja de Control	50	Medición	40	Figura 66-3
			51	Corte	60	
52			Perforaciones	120		
53			Taladrado	120		
54			Doblado	60		
55			Soldado	120		
56			Pulido	40		

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

A continuación, se presentan las imágenes de los elementos detallados en la tabla 35-3.

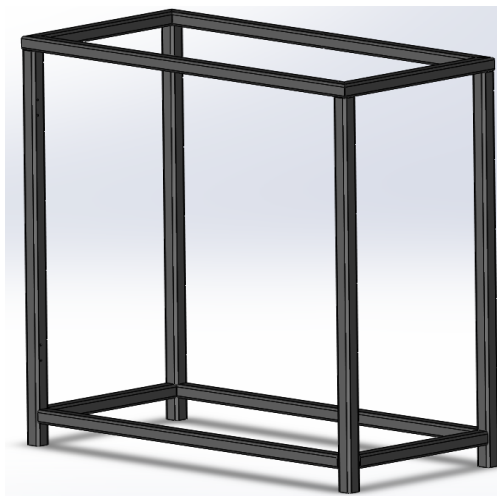


Figura 60-3. Bastidor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Figura 61-3. Tableros de madera.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

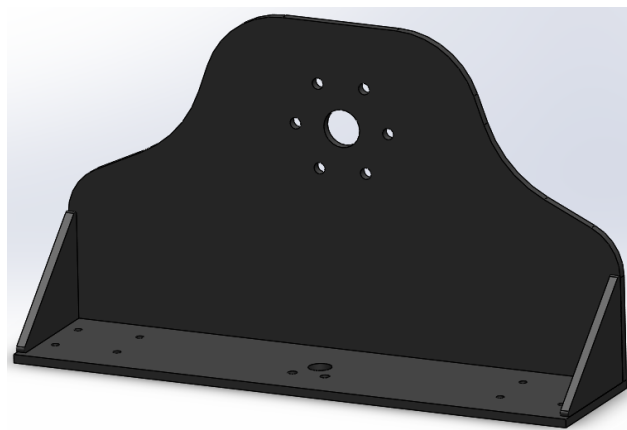


Figura 62-3. Base para mordaza y sensor.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

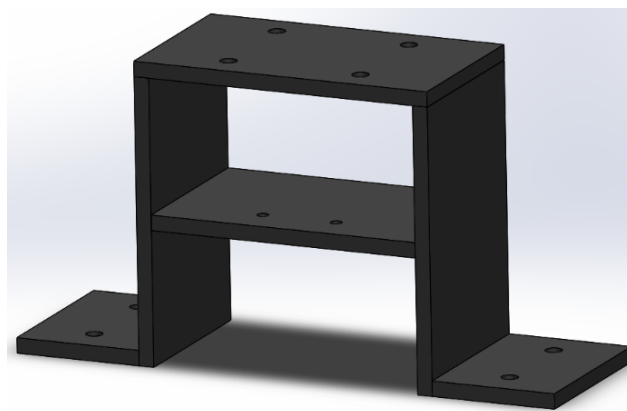


Figura 63-3. Base para reductor de velocidad.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

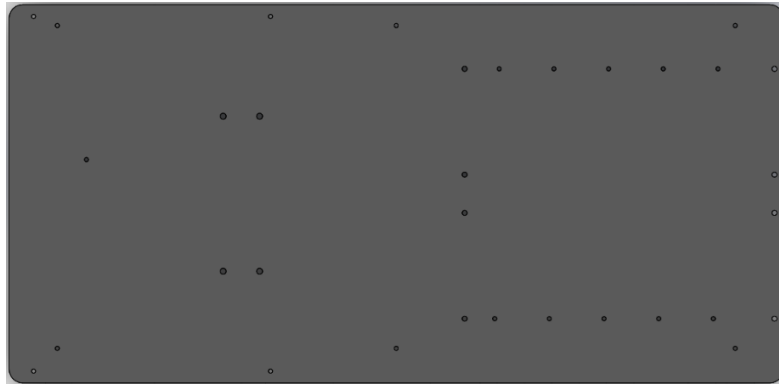


Figura 64-3. Placa base.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

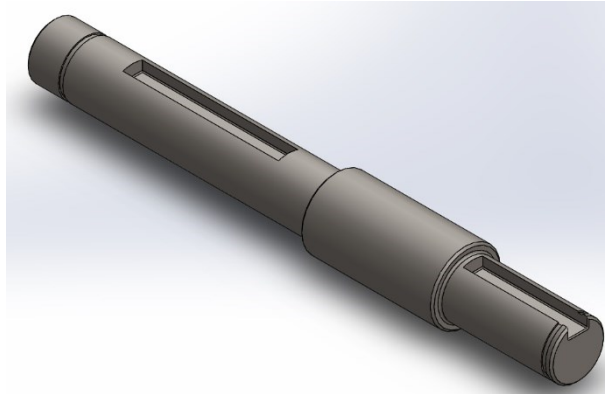


Figura 65-3. Eje de transmisión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

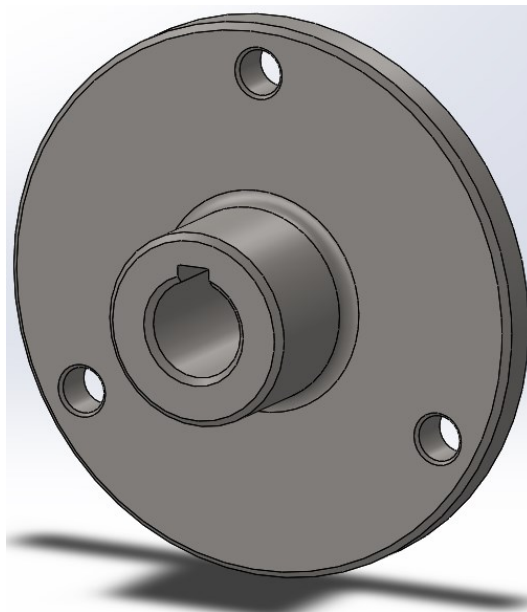


Figura 66-3. Brida de acople Eje - Mordaza.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

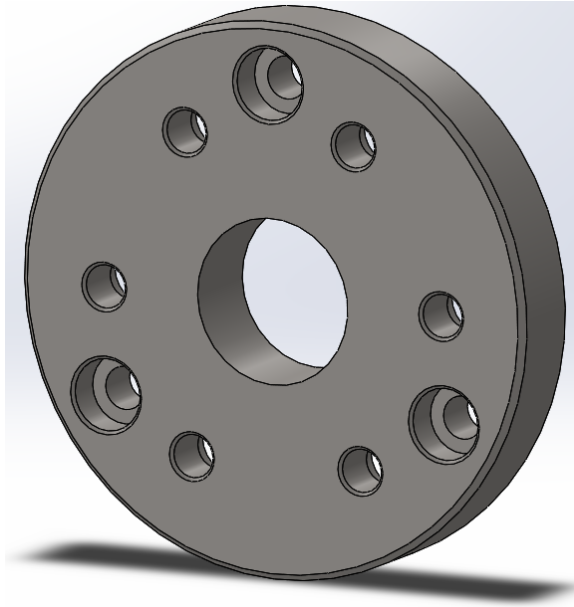


Figura 67-3. Brida de acople Sensor - Mordaza.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

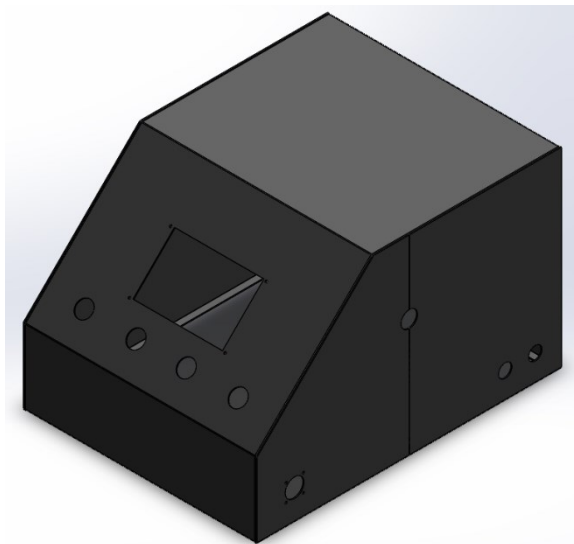


Figura 68-3. Caja de control.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.9 *Cursograma de montaje*

Una vez realizado el proceso de producción de los elementos se procede al ensamblaje del equipo junto con los elementos normalizados. Para ello nos basamos en el cursograma de montaje, el cual funciona como directriz, estableciendo los distintos procesos de operación, verificación, retraso, almacenamiento y transporte. En la figura 69-3 se presenta el cursograma utilizado para el montaje de la máquina.

Cursograma de montaje de la máquina para ensayos de torsión en polímeros							
Descripción	Tiempo (min)	Símbolo					Observaciones
		○	□	D	⇒	▽	
Transporte de todos los componentes al área de trabajo	40					●	
Verificación de las medidas del bastidor	10					●	
Ensamble de la placa base al bastidor	30	●					
Ensamble de chumaceras, tornillo de potencia y manivela	30	●					
Ensamble de rieles y rodamientos	30	●					
Verificación de paralelismo entre rieles y tornillo de potencia	20					●	Realizar correcciones necesarias
Colocación de la base para mordaza y sensor sobre los rieles	20	●					
Verificación de movimiento de base para mordaza y sensor	10					●	Realizar correcciones necesarias
Colocación de topes de rieles	15	●					
Acople de mordaza, brida y sensor	20	●					
Ensamble del conjunto mordaza - brida - sensor a la placa	15	●					
Ensamble de la base del reductor sobre la placa base	30	●					
Colocación del reductor sobre su base	15	●					
Acople del eje, brida y mordaza	20	●					
Ensamble del conjunto eje - brida - mordaza al reductor	15	●					
Verificación de alineación entre mordazas	15					●	Realizar correcciones necesarias
Colocación del sensor FC-03 a la base del reductor	10	●					
Ensamble de la rueda de encoder en el eje	10	●					
Ensamble del motor en el reductor de velocidad	10	●					
Colocación de elementos en la caja de control	40	●					
Ensamble y conexión de componentes electrónicos	120	●					
Carga de programas hacia los microcontroladores	15	●					
Verificación del sistema electrónico y de control	20					●	Pruebas con y sin energía eléctrica
Colocación de la tapa posterior de la caja de control	10	●					
Ensamble de tableros de madera y puertas	30	●					
Verificación de funcionamiento de la máquina	30					●	Realizar plan de pruebas
Total	630	19	6	0	0	1	

Figura 69-3. Cursograma de montaje.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

El tiempo total empleado en el proceso de producción es de 3575 minutos, mientras que el tiempo empleado en el montaje es de 630 minutos, dando un total de 4205 minutos. Si este resultado se transforma a horas se obtiene 70,1 horas de trabajo. Considerando una jornada laboral de 40 horas semanales, la producción y montaje de la máquina se realiza en aproximadamente 4 semanas de trabajo. Cabe recalcar que este tiempo corre a partir de la adquisición completa de todos los elementos que componen el equipo.

3.5.10 Calibración de sensores

Son dos los sensores que posee la máquina, el sensor estático de torsión tipo doble brida Lorenz M-2396 y el Encoder incremental FC-03 (LM393). A continuación, se presenta una pequeña descripción de estos dispositivos.

3.5.10.1 Sensor de torsión estático tipo doble brida Lorenz M-2396

Este dispositivo es capaz de medir el par estático existente. Se trata de un transductor que transforma una magnitud física en una señal eléctrica. La salida es típica de extensometría, procedente de dos puentes Wheatstone. Este modelo cuenta con un formato típico de sensor de par de doble brida, lo que permite acoplar el dispositivo a una placa fácilmente por cualquiera de sus extremos. Tiene un torque nominal de 50 N.m y posee una alta fiabilidad y durabilidad. Su sensibilidad es de 1,1 mV/V con una precisión del 0.2%. Para el uso de este tipo de sensor es necesario la utilización de un módulo amplificador de señal Hx711, el cual convierte la señal analógica emitida por el sensor en una señal digital que el microcontrolador es capaz de leer. En la figura 70-3 se presenta una ilustración de este tipo de sensor.

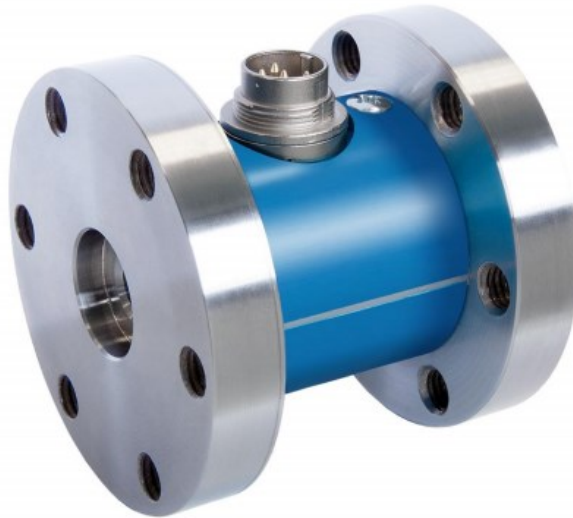


Figura 70-3. Sensor de torsión estática Lorenz M-2396.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.10.2 Encoder incremental FC-03 (LM393)

Un encoder es un dispositivo que se encarga de convertir el movimiento angular o lineal en pulsos eléctricos que puedan ser interpretados por el controlador del sistema. La medición de movimiento se hace mediante un haz de luz infrarrojo que se ve interrumpido por las ranuras de un disco acoplado al eje (figura 71-3). La cantidad de ranuras por vuelta determinará la precisión del encoder.

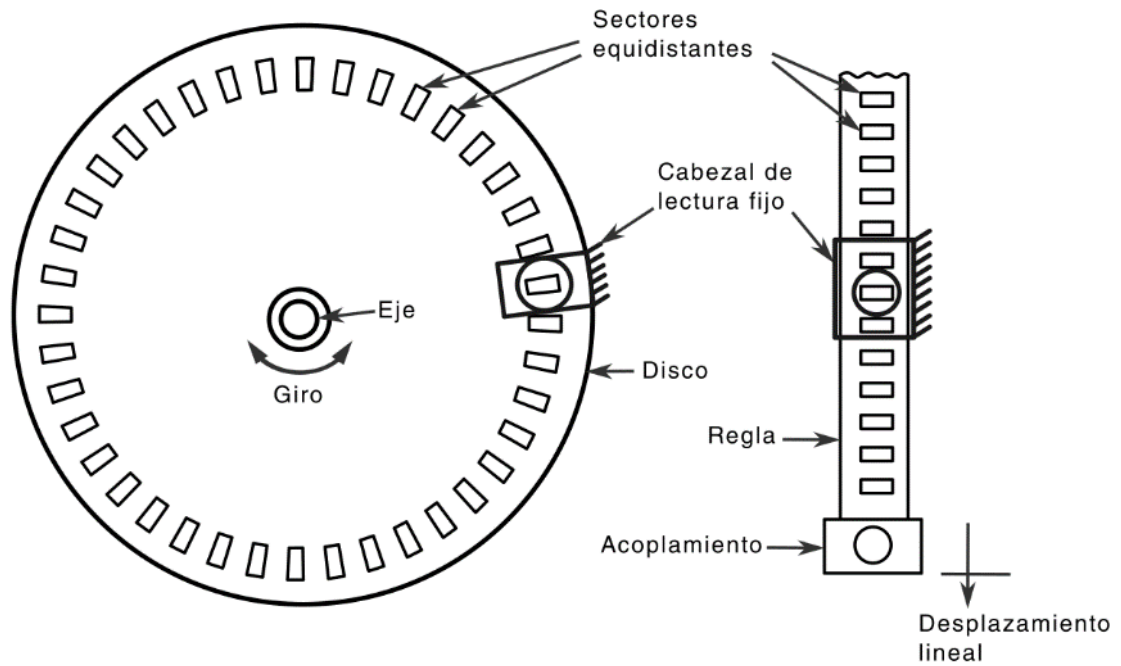


Figura 71-3. Encoder Incremental.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Este sensor utiliza un opto interruptor infrarrojo que cuenta con dos partes: un emisor IR y un receptor o sensor IR. Entre el emisor y receptor existe un espacio para el objeto que bloqueará el paso de luz (disco ranurado). Los pulsos son digitalizados por el integrado LM393 que entrega pulsos TTL (Lógica Transistor - Transistor) que pueden ser interpretados por un microcontrolador.

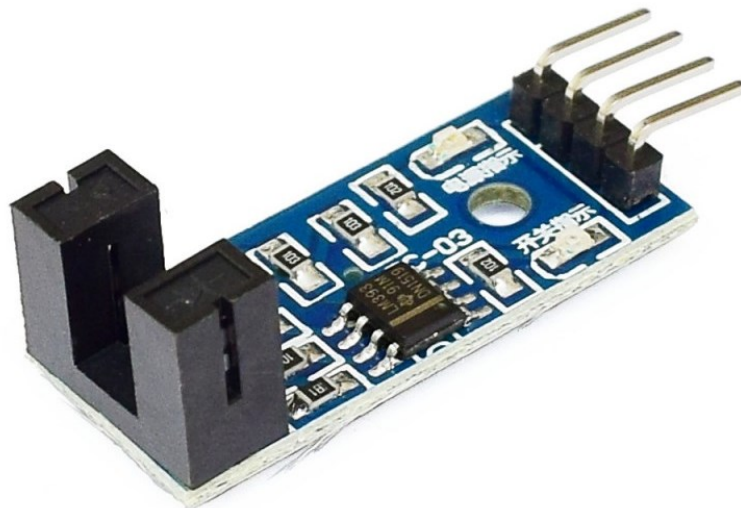


Figura 72-3. Encoder incremental FC-03 (LM393).

Fuente: (Naylamp Mechatronics, 2020).

3.5.10.3 Calibración del sensor de torsión estático tipo doble brida Lorenz M-2396

Para la calibración de este tipo de sensor se realiza mediante programación del microcontrolador con el uso de la librería del módulo Hx711 la cual posee un factor de calibración que al modificarlo varía también la lectura final. Mediante un proceso de prueba error se determinó el mejor factor de calibración el cual posee un valor de 50700. A continuación, en la tabla 36-3 se presenta el cálculo del error relativo que presenta el sensor con este factor de calibración al realizar varias medidas con diferentes valores de torque aplicados con una medida patrón mediante un torquímetro.

Tabla 36-3: Calibración y cálculo de error relativo para el sensor de torsión.

Torque de referencia (Nm)	Torque medido (Nm)	Valor promedio (Nm)	Error estadístico (Nm)	Error Sistemático (Nm)	Error Efectivo (Nm)	Error relativo porcentual (%)
5,0	5,0	5,02	0,045	0,05	0,067	1,34
	5,1					
	5,0					
	5,0					
	5,0					
10,0	10,0	10,00	0,071	0,05	0,087	0,87
	10,0					
	9,9					
	10,0					
	10,1					
15,0	15,0	15,02	0,084	0,05	0,097	0,65
	15,1					
	14,9					
	15,0					
	15,1					
Error Promedio						0,95

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Además, para este sensor se realiza un análisis de histéresis, ya que al ser una celda de carga puede presentar esta particularidad. La histéresis se trata de la diferencia en la medida dependiendo del sentido en el que se haya llegado hasta ella, es decir en carga (forma ascendente) o en descarga (forma descendente). Es decir que dependiendo del sentido un mismo

valor de la magnitud de entrada puede provocar salidas diferentes. A continuación, en la tabla 37-3 se presentan los valores obtenidos al realizar este análisis en, mientras que en el gráfico 4-3 se muestra la curva de histéresis para este sensor, donde se puede observar que no presenta ninguna diferencia entre la curva de datos ascendentes y descendentes.

Tabla 37-3: Cálculo de histéresis para el sensor de torsión.

Número de medida	Torque de referencia (N.m)	Torque medido Ascendente (N.m)	Torque medido Descendente (N.m)	Diferencia (Histéresis) (N.m)
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	1,0	1,0	1,0	0,0
3	2,0	2,0	2,0	0,0
4	3,0	3,0	3,0	0,0
5	4,0	4,0	4,0	0,0
6	5,0	5,0	5,0	0,0
7	6,0	6,0	6,0	0,0
8	7,0	7,0	7,0	0,0
9	8,0	8,0	8,0	0,0
10	9,0	9,0	9,0	0,0
11	10,0	10,0	10,0	0,0
12	11,0	11,0	11,0	0,0
13	12,0	12,0	12,0	0,0
14	13,0	13,0	13,0	0,0
15	14,0	14,1	14,1	0,0
16	15,0	15,1	15,1	0,0

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

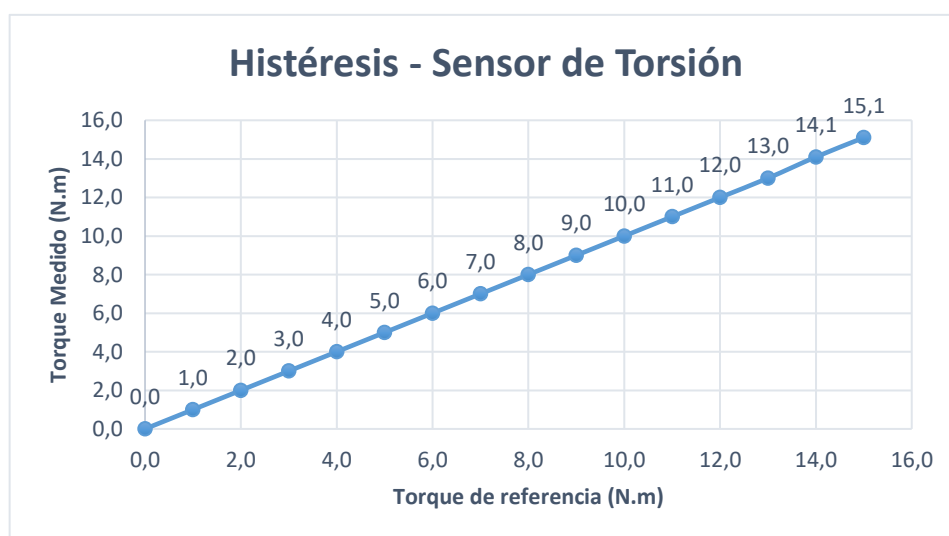


Gráfico 4-3. Curva de histéresis para el sensor de torsión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.5.10.4 Calibración del Encoder incremental FC-03 (LM393)

Para la calibración de este tipo de sensor, al igual que en el caso anterior se realiza mediante la programación del microcontrolador. Este tipo de sensor es susceptible a presentar rebotes en la señal de pulsos digitalizados, por lo que se debe eliminar esos falsos pulsos mediante un tiempo umbral medido en microsegundos. Este tiempo permite que todos los rebotes que se produzcan en el sensor por ese corto período de tiempo no se contabilicen. Se ha realizado el cálculo de este tiempo umbral y depende de la velocidad de pulsos que se calcula con la ecuación 51. La ecuación para determinar el tiempo umbral es la siguiente:

$$t_{umbral} = 1,2 \cdot t_{pulso} \quad (56)$$

En la tabla 38-3 se presenta el cálculo del error relativo que presenta el sensor con este valor de tiempo umbral al realizar varias medidas con diferentes valores de ángulo de giro.

Tabla 38-3: Calibración y cálculo de error relativo para el sensor de ángulo de giro.

Ángulo de referencia (°)	Ángulo medido (°)	Valor promedio (°)	Error estadístico (°)	Error Sistemático (°)	Error Efectivo (°)	Error relativo porcentual (%)
120	120	120,2	0,447	0,5	0,671	0,56
	120					
	120					
	120					
	121					
240	240	240,2	0,447	0,5	0,671	0,28
	240					
	240					
	241					
	240					
360	361	360,4	0,548	0,5	0,742	0,21
	360					
	360					
	360					
	361					
Error Promedio						0,35

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Como se puede observar el error relativo porcentual en el sensor de torque es mayor que en el del ángulo de deformación. Eso puede deberse al principio de funcionamiento de los sensores. En ambos de los casos los errores relativos porcentuales son inferiores al 1% lo que representa un error muy pequeño, esto brinda una buena precisión al sistema de sensores que posee el equipo y generar fiabilidad en los resultados obtenidos.

3.6 Análisis de costos

En esta sección se realiza un análisis del precio de todos los elementos y actividades que se realizan para la construcción de la máquina. Se utiliza la metodología de análisis de costos directos e indirectos.

3.6.1 Costos directos

Los costos directos contienen el precio de los diversos elementos mecánicos y elementos electrónicos utilizados para la construcción de la máquina, además se realiza un análisis de los costos de manufactura y mano de obra utilizada en la elaboración de los componentes.

3.6.1.1 Costos elementos mecánicos

En la tabla 39-3 se detalla los distintos componentes mecánicos utilizados en la máquina.

Tabla 39-3: Costos elementos mecánicos.

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	2	Mandril 4 mordazas	200,00	400,00
2	1	Motor Paso a paso 1.8 Nm	45,00	45,00
3	1	Caja reductora motor	50,00	50,00
4	2	Tubo cuadrado de 30x2 mm	8,00	16,00
5	1	Plancha acero de espesor 5 mm	12,00	12,00
6	1	Pernos	30,00	30,00
7	1	Tablero Madera	34,00	34,00
8	4	Bisagras	0,50	2,00
9	2	Jaladeras	0,50	1,00
10	1	SAE 4340 ¾"	6,00	6,00
11	1	SAE 1018 Transmisión 3 1/2"	4,00	4,00
12	2	Chaveta	2,00	4,00
13	1	Sistema tornillo de potencia	35,00	35,00
14	2	Rieles	50,00	100,00
15	1	Chapa Metálica	60,00	60,00
16	1	Pintura	20,00	20,00
17	1	Pintura Spray	5,00	5,00
18	4	Nylon Topes	1,00	4,00
19	1	Probetas Nylon, Acrílico y PLA	10,00	10,00
		Subtotal 1		838,00

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.1.2 Costo de Manufactura

La tabla 40-3 especifica las actividades realizadas y el costo hora por máquina que emplea cada una de ellas.

Tabla 40-3: Costo de manufactura.

Horas	Descripción	\$/Hora por máquina	Precio Total (\$)
1,0	Cortadora	1,50	1,50
1,0	Cizalladora	5,00	5,00
1,0	Amoladora	0,40	0,40
1,3	Torno	8,50	11,05
5,5	Fresadora universal	5,80	31,90
1,0	Soldadura con electrodo revestido	3,00	3,00
1,0	Impresión 3D	2,00	2,00
1,0	Corte Laser	8,00	8,00
3,0	Taladro	3,00	9,00
	Subtotal 2		71,85

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.1.3 Costo de mano de obra

La tabla 41-3 contiene el costo del operador en las actividades que se utilizaron para la construcción y montaje de la máquina.

Tabla 41-3: Costo de mano de obra.

Horas	Descripción	\$/Hora por máquina	Precio Total (\$)
1,0	Cortadora	10,00	10,00
1,0	Cizalladora	10,00	10,00
1,0	Amoladora	10,00	10,00
1,3	Torno	17,00	22,10
5,5	Fresadora universal	20,00	110,00
1,0	Soldadura con electrodo revestido	8,00	8,00
1,0	Impresión 3D	4,00	4,00
1,0	Corte Laser	12,00	12,00
4,0	Conexión	10,00	40,00
10,0	Programación Arduino	15,00	150,00
3,0	Taladro	6,00	18,00
	Subtotal 3		394,10

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.1.4 Componentes eléctricos

La tabla de 42-3 detalla los componentes eléctricos usados para la medición de las variables usadas en el ensayo de la máquina.

Tabla 42-3: Costo de componentes eléctricos.

Ítem	Cantidad	Descripción	Precio unitario (\$)	Precio Total (\$)
1	1	Fuente de 12 V 10 A	30,00	30,00
2	1	Driver motor paso a paso	20,00	20,00
3	1	Pantalla táctil NEXTION	120,00	120,00
4	1	Sensor de torque	150,00	150,00
5	1	Sensor óptico encoder	5,00	5,00
6	1	Modulo Amplificador Hx711	5,00	5,00
7	1	Arduino Uno	20,00	20,00
8	1	Arduino Mega	28,00	28,00
9	1	Cable #16	1,60	1,60
10	2	Interruptores	4,00	8,00
11	2	Luz piloto	1,50	3,00
12	1	Encoder	2,00	2,00
13	2	Cubre cables	1,00	2,00
14	1	Conectores	7,50	7,50
15	1	Cable trifásico 2m	4,00	4,00
16	1	Enchufe	1,00	1,00
17	1	Cable USB	3,00	3,00
18	2	Borneras	0,50	1,00
19	1	Empaque termoplástico	1,00	1,00
20	1	Transformador 5V - 1A	5,00	5,00
			Subtotal 4	417,10

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.1.5 Costo directo total

La tabla 43-3 nos muestra el monto total de la suma de todos los costos directos.

Tabla 43-3: Costo directo total.

Descripción	Valor total (\$)
Subtotal 1	838
Subtotal 2	71,85
Subtotal 3	394,1
Subtotal 4	417,1
Total	1721,05

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.2 Costos Indirectos

Los costos indirectos son aquellos que influyen indirectamente en el precio de la máquina. En este caso se toma en cuenta los costos de ingeniería que se relaciona al tiempo que de diseño de la máquina y otros gastos que se pueden presentar de forma inesperada durante el trabajo.

Tabla 44-3: Costo indirectos.

Descripción	Valor total (\$)
Costos de ingeniería	439,71
Otros	100,00
Total	539,71

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

3.6.3 Costo Total

El costo total abarca la suma de los costos directos e indirectos obteniendo el precio total de la máquina. En la tabla 45-3 se muestra el valor de costo total de la máquina que cumple con el requerimiento establecido del precio en el diseño del equipo.

Tabla 45-3: Costo total.

Tipo de costo	Valor total (\$)
Costos Directos	1721,05
Costos Indirectos	539,71
Total	2260,76

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1 Plan de pruebas

El plan de pruebas tiene como objetivo verificar el funcionamiento del equipo asegurándose de que cada uno de los elementos cumpla la función para la que fue destinada. A continuación, se presentan los planes de prueba utilizados.

4.1.1 Plan de prueba en vacío

Objetivos

- Comprobar el correcto funcionamiento de los componentes de la máquina sin la aplicación de carga a diferentes velocidades de rotación.
- Verificar la de velocidad de rotación y lectura del ángulo de giro.
- Comprobar el funcionamiento del botón de paro de emergencia.

Norma

Tabla 1-4: Normas utilizadas en el plan de prueba en vacío.

Norma	Descripción
ASTM E143-02	Esta norma establece el procedimiento a llevarse a cabo durante del ensayo a torsión.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Personas que realizan la prueba

Byron Barriga.

Marco Santillán.

Requerimientos por cumplir

Tabla 2-4: Requerimientos por cumplir en la prueba sin carga.

Ítem	Actividad	Criterio de aceptación
01	Verificación Mandriles	Las mordazas de los mandriles no presenten ninguna discontinuidad.
02	Verificación conectividad circuito eléctrico	Los componentes eléctricos emiten la señal requerida para medir las variables establecidas para la prueba.

Tabla 2-4: (Continuación) Requerimientos por cumplir en la prueba sin carga.

03	Ajuste parámetros prueba	Correcta conectividad de la pantalla Nextion con el controlador.
04	Verificación de la velocidad de giro, elementos de transmisión y señal del encoder rotacional	La velocidad de rotación y la señal del encoder rotacional son correctos. Los elementos de transmisión funcionan correctamente.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Configuración de parámetros para la prueba sin carga

Tabla 3-4: Parámetros de entrada para la prueba sin carga.

Parámetros de entrada	Valor	Unidades
Velocidad de rotación	120	°/min
	240	°/min
	360	°/min

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Entrada

- Energía eléctrica
- Parámetros iniciales

Salidas

- Señal eléctrica del encoder
- Velocidad del mandril

Observaciones

En esta prueba se determina que todos los componentes de la máquina realicen sus funciones sin inconvenientes, por ejemplo, el giro del motor, la transmisión de giro hacia la mordaza, la velocidad de rotación, las señales emitidas por los sensores y el funcionamiento del sistema de control.

4.1.2 Plan de pruebas con carga

Objetivos

- Comprobar el correcto funcionamiento de los componentes de la máquina con la aplicación de carga.

- Ensayar polímeros de diferente resistencia y observar la respuesta del equipo ante las necesidades del ensayo.
- Verificar las señales provenientes de los sensores.
- Obtener la gráfica esfuerzo deformación a cortante en la pantalla de visualización de resultados.

Normas

Tabla 4-4: Normas utilizadas en el plan de prueba con carga.

Nombre	Descripción
ASTM E143-02	Esta norma establece el procedimiento a llevarse a cabo durante del ensayo a torsión.
DIN 50125	Esta norma presenta la configuración y dimensiones de la probeta.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Personas que realizan la prueba en carga

Byron Barriga.

Marco Santillán.

Requerimientos por cumplir

Tabla 5-4: Requerimientos por cumplir en la prueba con carga.

Ítem	Actividad	Criterio de aceptación
01	Verificación Mandriles	Las mordazas de los mandriles no presenten ninguna discontinuidad.
02	Verificación probeta	Cumplir con las dimensiones establecidas por la norma.
03	Ajuste de la probeta en los mandriles	La probeta debe estar centrada y presentar un apriete adecuado para evitar deslizamientos durante el ensayo.
04	Ajuste parámetros iniciales	Ingreso correcto de todos los parámetros por medio de la pantalla Nextion.
05	Iniciar prueba	Verificación del correcto funcionamiento del sistema en conjunto.
06	Registro del ensayo	Revisión periódica durante el ensayo del estado del equipo y sus principales componentes.
07	Final prueba	Ausencia de fallos o inconvenientes durante la prueba. Verificación final del estado de los componentes tras el ensayo.
08	Obtención de resultados	Correcta transmisión de resultados desde el equipo hacia el computador.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Probetas para la prueba con carga

Tabla 6-4: Probetas utilizadas en la prueba con carga.

Probeta	Material	Observaciones
1	Nylon	Todas las probetas deben cumplir con la configuración y las dimensiones establecidas en la norma.
2	Acrílico	
3	PLA	

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Configuración de parámetros para la prueba con carga

Tabla 7-4: Parámetros de entrada para la prueba con carga.

Parámetros	Valor	Unidades
Velocidad de rotación	100	°/min
Tipo de sección	Sólida	-
Longitud de la probeta	48	mm
Diámetro	8	mm

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Entrada

- Probeta.
- Energía eléctrica.
- Parámetros iniciales.

Salida

- Grafica esfuerzo vs deformación.
- Valores de torque, esfuerzo, ángulo de giro y deformación a cortante.
- Tiempo de duración del ensayo.
- Probeta ensayada.

Observaciones

Esta prueba verifica que todos los componentes de la máquina realicen sus funciones cuando una carga es aplicada. Además, se obtienen los resultados correspondientes del ensayo a torsión aplicado a las probetas, cumpliendo así con el objetivo principal que tiene el equipo.

4.2 Resultados

Para validar los resultados que proporciona el equipo se han efectuado los ensayos sobre tres materiales distintos. Se elaboraron tres probetas de cada material, todas con la misma configuración y dimensiones (figura 1-4), obteniendo un total de nueve ensayos. Se presenta una comparación entre los tres ensayos efectuados para cada tipo de material y, además una comparación entre los tres materiales empleados.

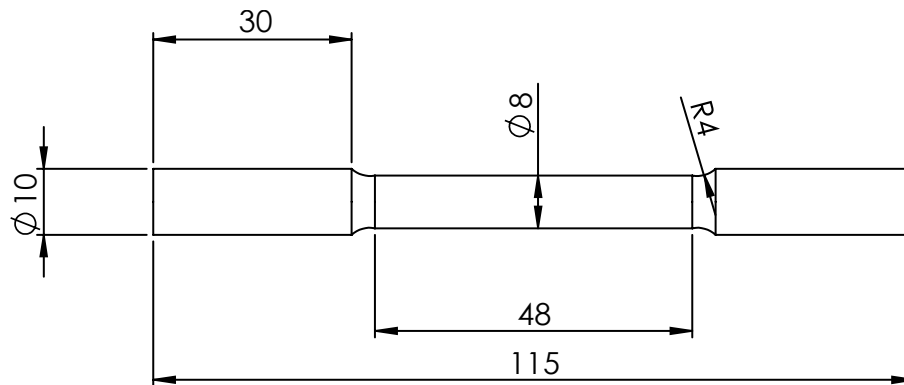


Figura 1-4. Dimensiones de la probeta.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

4.2.1 Probeta de Nylon

El nylon presenta un comportamiento dúctil ante la presencia de esfuerzos de torsión, tal como se demuestra en las gráficas esfuerzo deformación que se producen, dato que también se corrobora por el tipo de falla que se ha presentado, siendo un corte recto por un plano perpendicular al eje del elemento.

En la tabla 8-4 se presentan los parámetros de ingreso para el ensayo en las probetas de nylon. En el gráfico 1-4 hasta el gráfico 4-4 se ilustran las curvas de esfuerzo - deformación a cortante. Mientras que en la figura 2-4 se muestran las probetas ensayadas.

Tabla 8-4: Parámetros de ingreso para la probeta de nylon.

Parámetros	Valor	Unidades
Velocidad de rotación	100	°/min
Tipo de sección	Sólida	-
Longitud de la probeta	48	mm
Diámetro	8	mm

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Gráfico 1-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

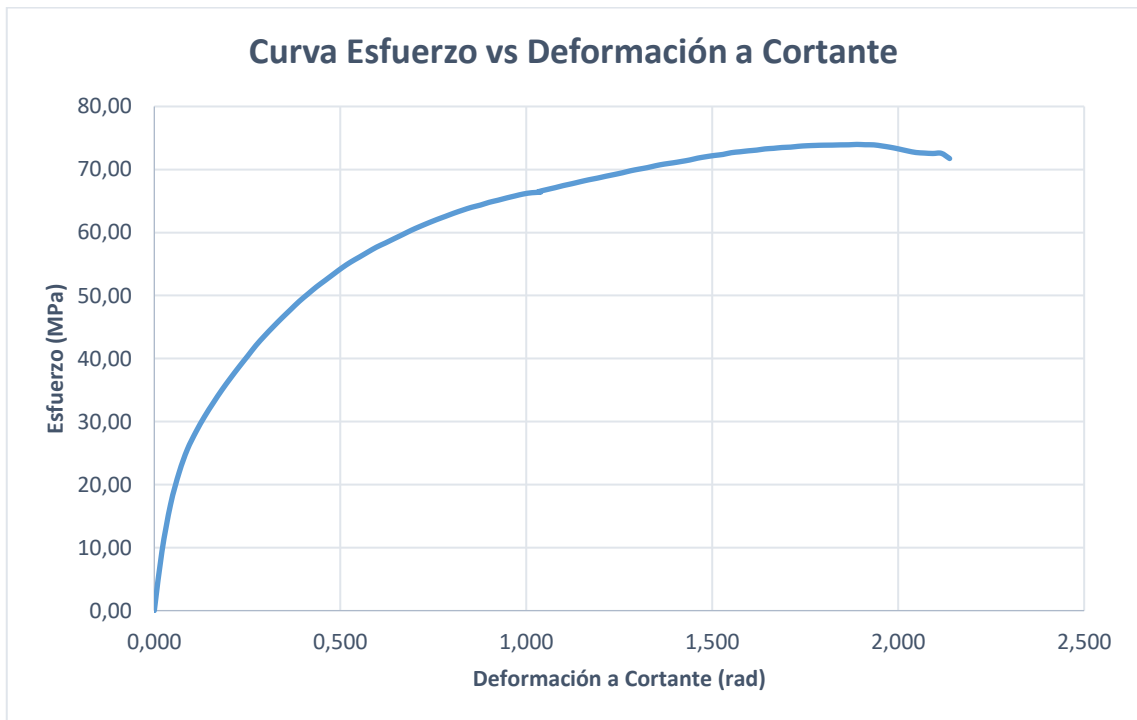


Gráfico 2-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Gráfico 3-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

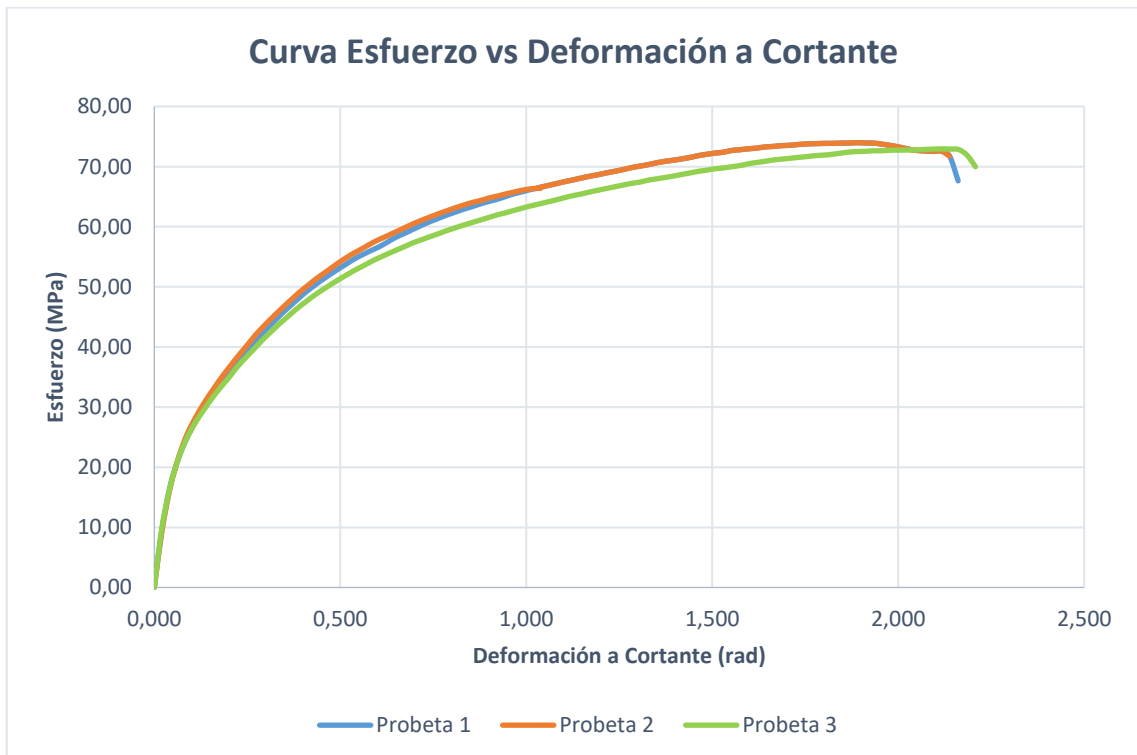


Gráfico 4-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Figura 2-4. Probetas ensayadas de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

4.2.2 *Probeta de Acrílico*

El acrílico posee mayor resistencia que el nylon, pero muy poca ductilidad. Presenta un comportamiento frágil ante la presencia de esfuerzos de torsión, tal como se demuestra en las gráficas esfuerzo deformación que se producen, dato que también se corrobora por el tipo de falla que se ha presentado, siendo un corte por un plano inclinado 45° con respecto al eje del elemento.

En la tabla 9-4 se presentan los parámetros de ingreso para el ensayo en las probetas de acrílico. En el gráfico 5-4 hasta el gráfico 8-4 se ilustran las curvas de esfuerzo - deformación a cortante. Mientras que en la figura 3-4 se muestran las probetas ensayadas.

Tabla 9-4: Parámetros de ingreso para la probeta de acrílico.

Parámetros	Valor	Unidades
Velocidad de rotación	60	°/min
Tipo de sección	Sólida	-
Longitud de la probeta	48	mm
Diámetro	8	mm

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

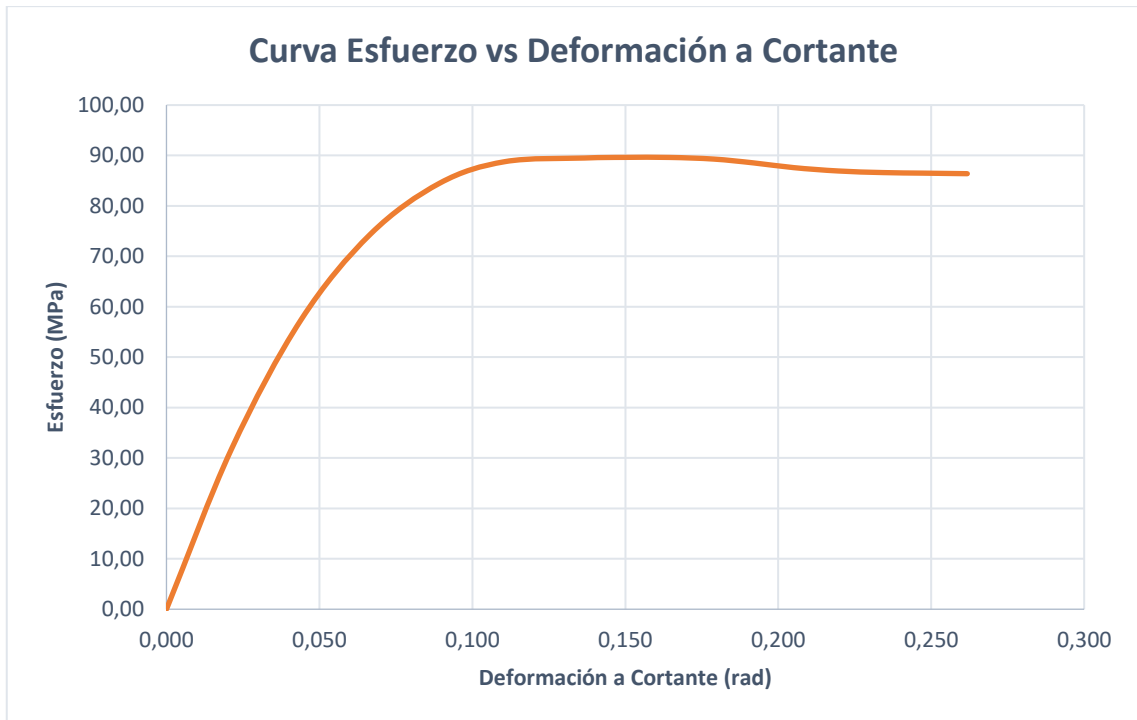


Gráfico 5-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

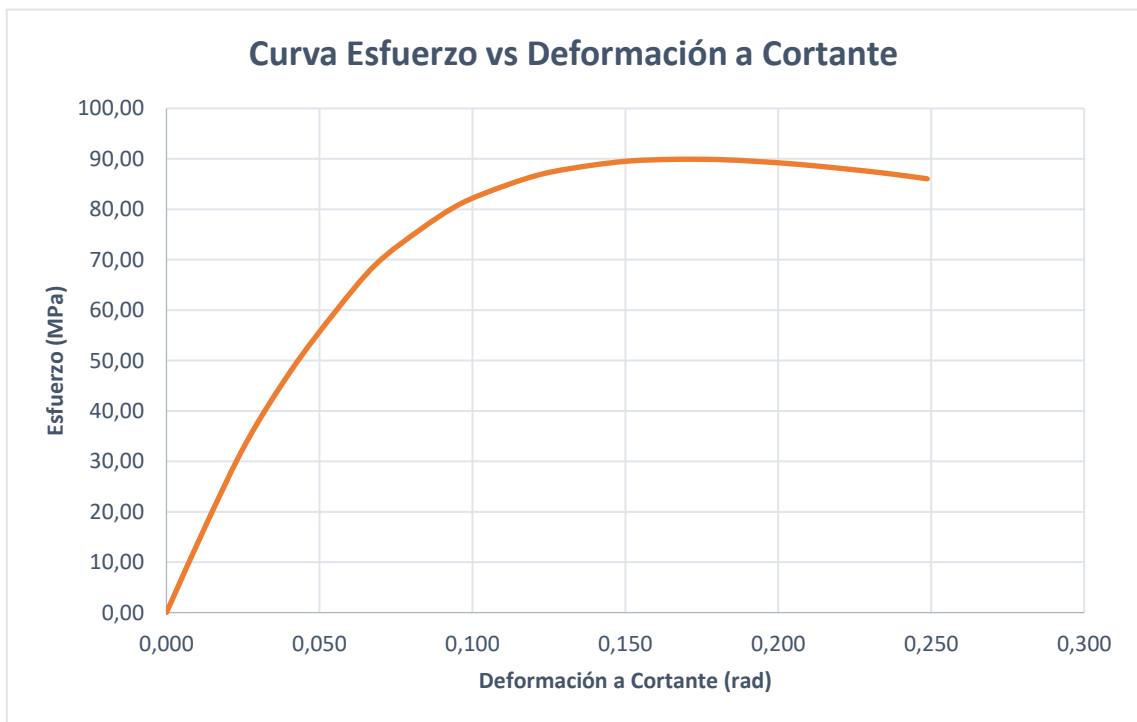


Gráfico 6-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

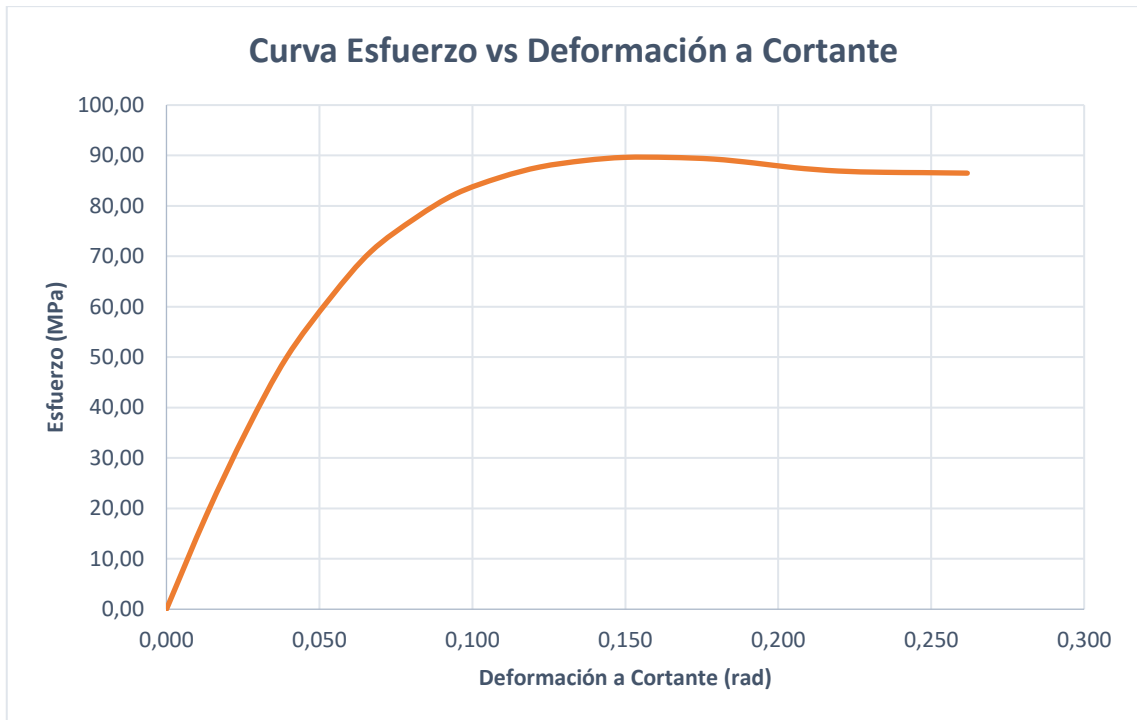


Gráfico 7-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

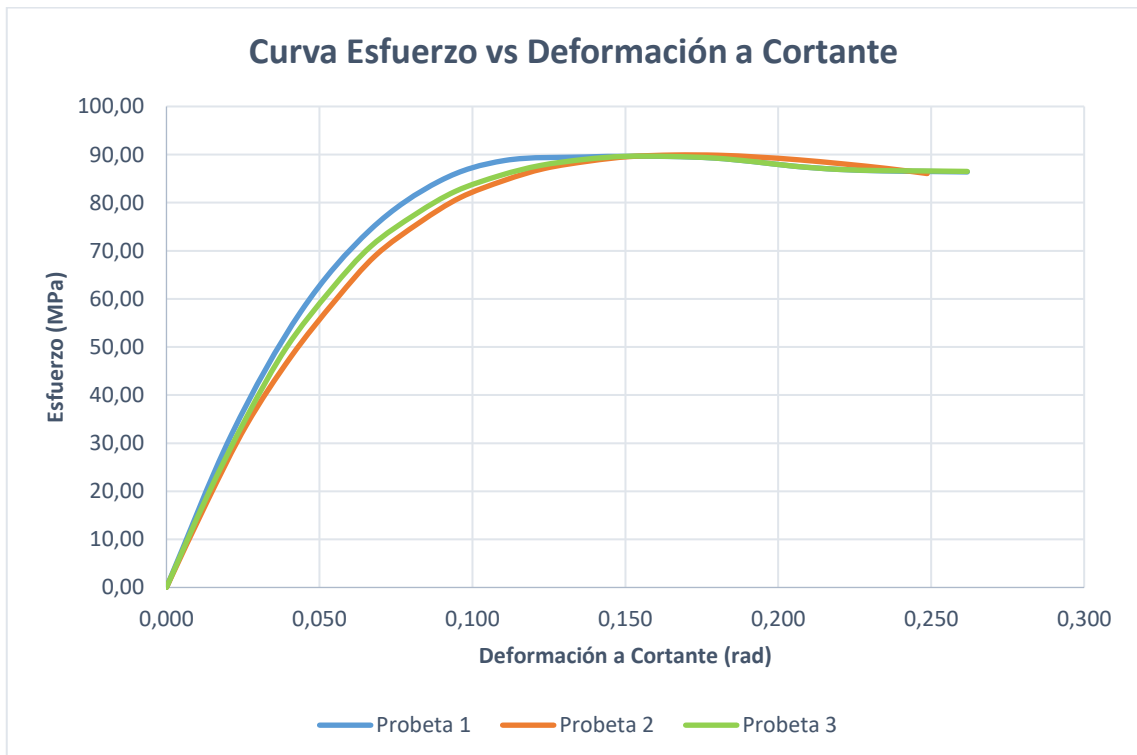


Gráfico 8-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

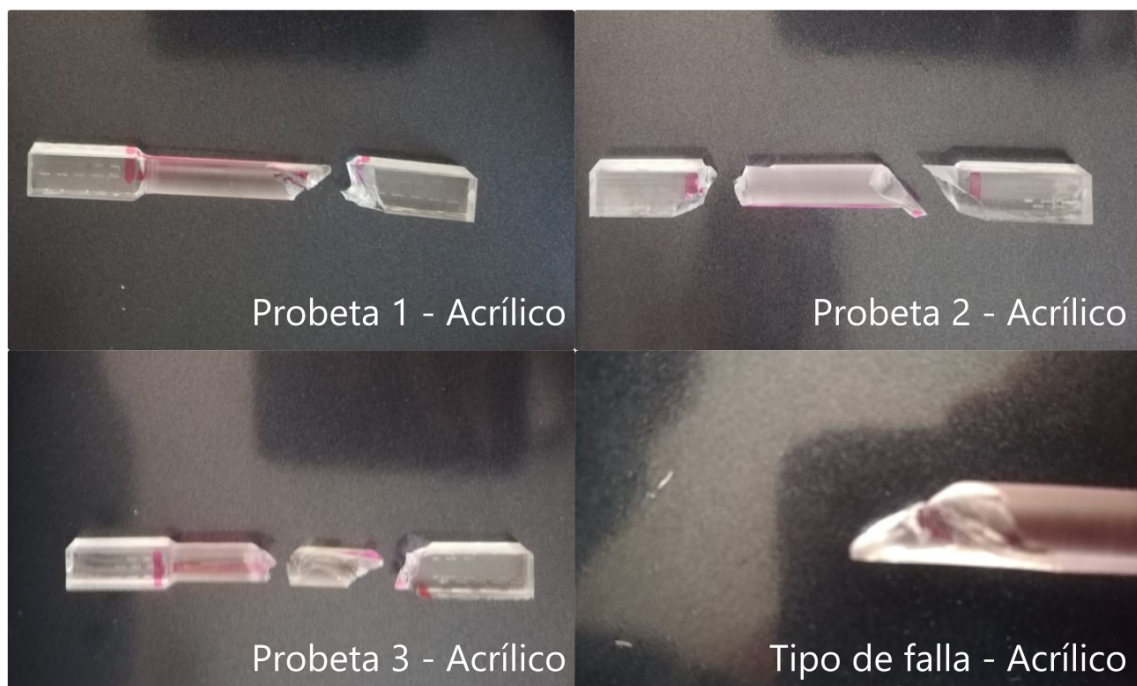


Figura 3-4. Probetas ensayadas de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

4.2.3 *Probeta de PLA*

El PLA es un material frágil con una resistencia menor a la de los otros polímeros analizados antes. Cabe recalcar que las probetas de este material fueron impresas en 3D con relleno del 20%, por lo que los resultados que se presentan a continuación no reflejan la resistencia real de material, sino que muestran el comportamiento una impresión en 3D frente a los esfuerzos de torsión.

En la tabla 10-4 se presentan los parámetros de ingreso para el ensayo en las probetas de acrílico. En el gráfico 9-4 hasta el gráfico 12-4 se ilustran las curvas de esfuerzo - deformación a cortante. Mientras que en la figura 4-4 se muestran las probetas ensayadas.

Tabla 10-4: Parámetros de ingreso para la probeta de PLA.

Parámetros	Valor	Unidades
Velocidad de rotación	60	°/min
Tipo de sección	Sólida	-
Longitud de la probeta	48	mm
Diámetro	8	mm

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Gráfico 9-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 1 de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

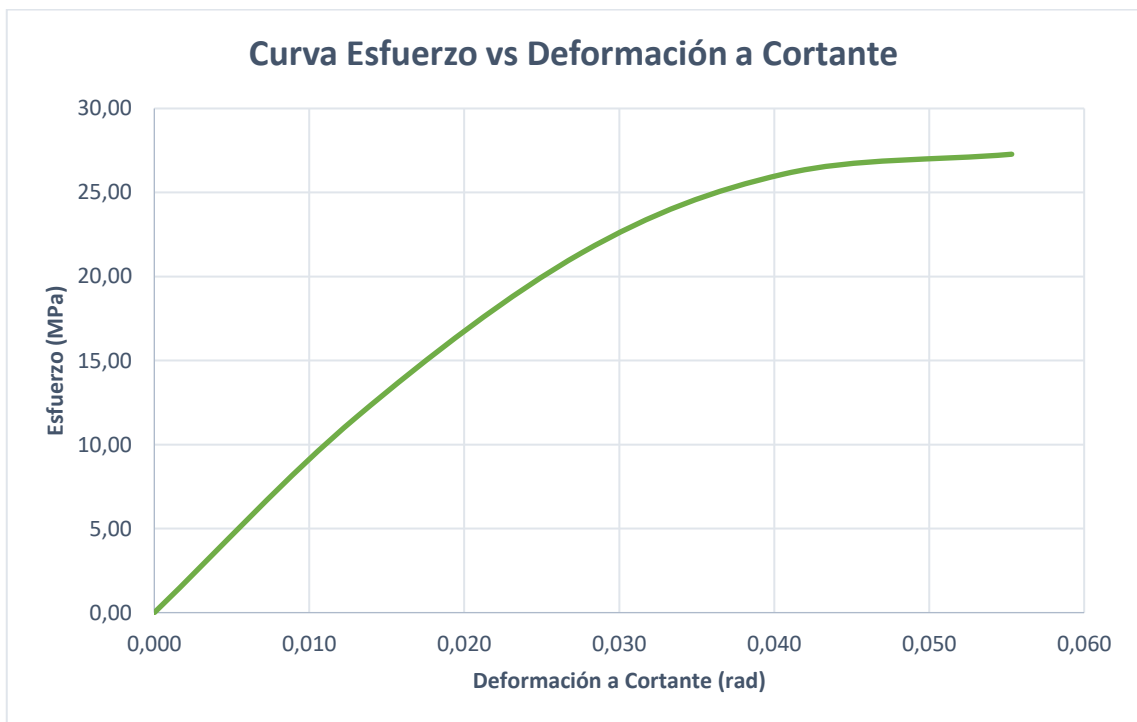


Gráfico 10-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 2 de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.



Gráfico 11-4. Curva esfuerzo-deformación a cortante - Probeta 3 de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

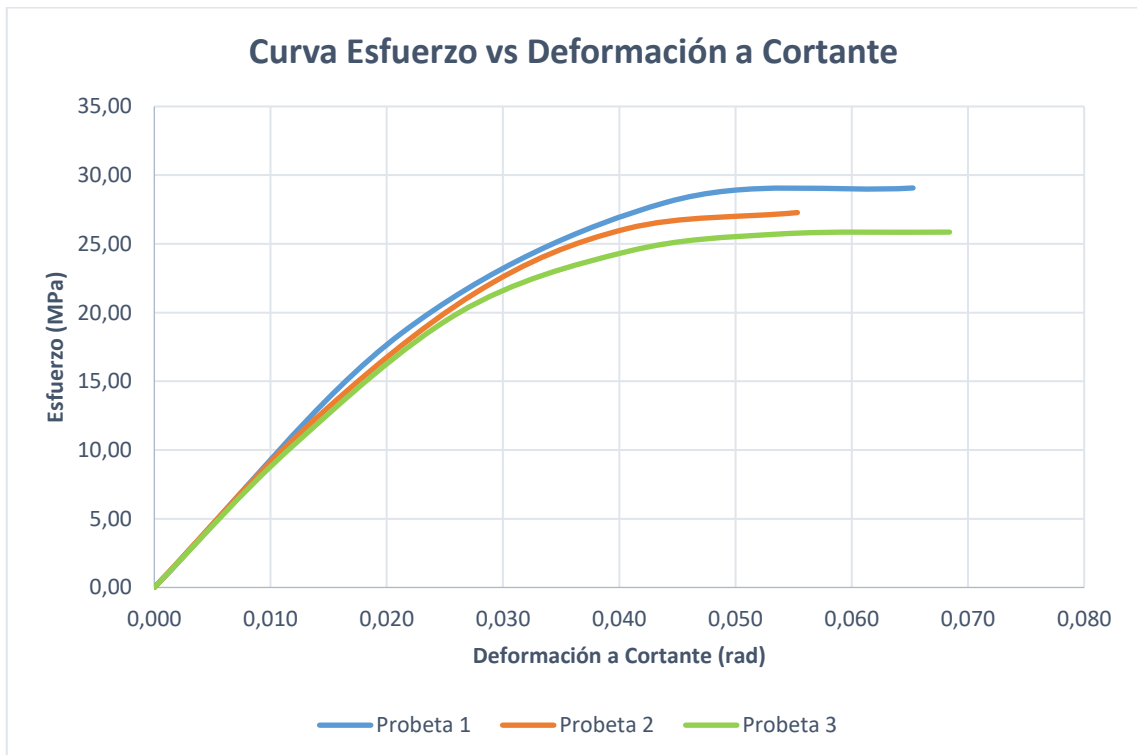


Gráfico 12-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación a cortante - Probetas de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

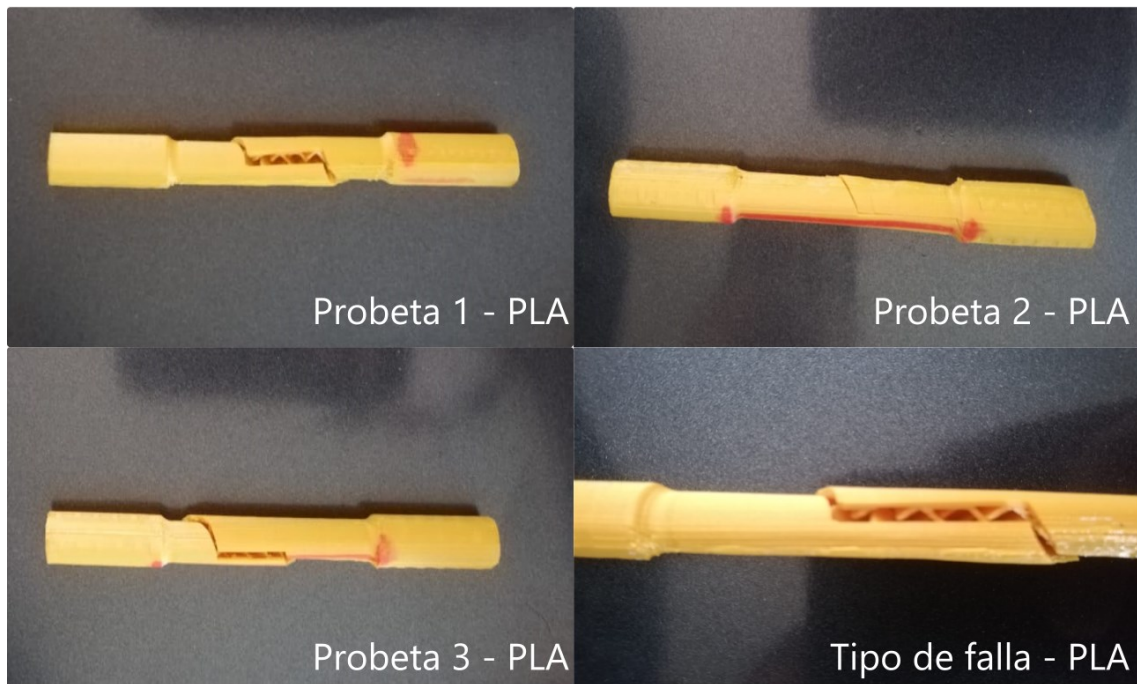


Figura 4-4. Probetas ensayadas de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

4.2.4 *Análisis de resultados*

Los resultados obtenidos mediante los ensayos son los esperados, puesto que cada uno de los materiales presentó un comportamiento como el que se describió en el marco teórico, ya sea este dúctil para el caso del nylon, o frágil como el acrílico y el PLA. La probeta de nylon, debido a su ductilidad, presenta una deformación plástica apreciable antes de llegar a la fractura, mientras que los materiales frágiles poseen una plasticidad muy nula. Esto se puede ver reflejado en la gráfica esfuerzo deformación superpuesta de los tres materiales (gráfico 13-4) donde la curva para el nylon se extiende a lo largo del eje x (deformación a cortante), mientras las curvas para las probetas de acrílico y PLA presentan muy poca deformación.

En cuanto a la resistencia a la torsión, el acrílico es el material que ha predominado, seguido del nylon y por último la impresión 3D de PLA. El PLA podría presentar una mejor resistencia si la probeta fuese elaborada en una sola barra en lugar de ser producida mediante tecnologías de fabricación por adición.

Una propiedad importante que se puede obtener mediante este ensayo es el módulo de rigidez, el cual se puede calcular mediante ecuaciones, como se mostró en el marco teórico, o mediante un análisis de la curva esfuerzo - deformación a cortante. La pendiente de esta curva, dentro de la región elástica, representa el valor del módulo de rigidez. Es así como utilizando la ecuación de línea de tendencia con el software Excel, se determina este valor promedio entre las tres

probetas de cada uno de los materiales. En los gráficos 14-4, 15-4 y 16-4 se presenta la región elástica de la curva con su ecuación para las probetas ensayadas de nylon, acrílico y PLA respectivamente. En las tablas 11-4, 12-4 y 13-4 se presentan los valores de tiempo de duración del ensayo, resistencia máxima a la torsión y módulo de rigidez para cada uno de los materiales.

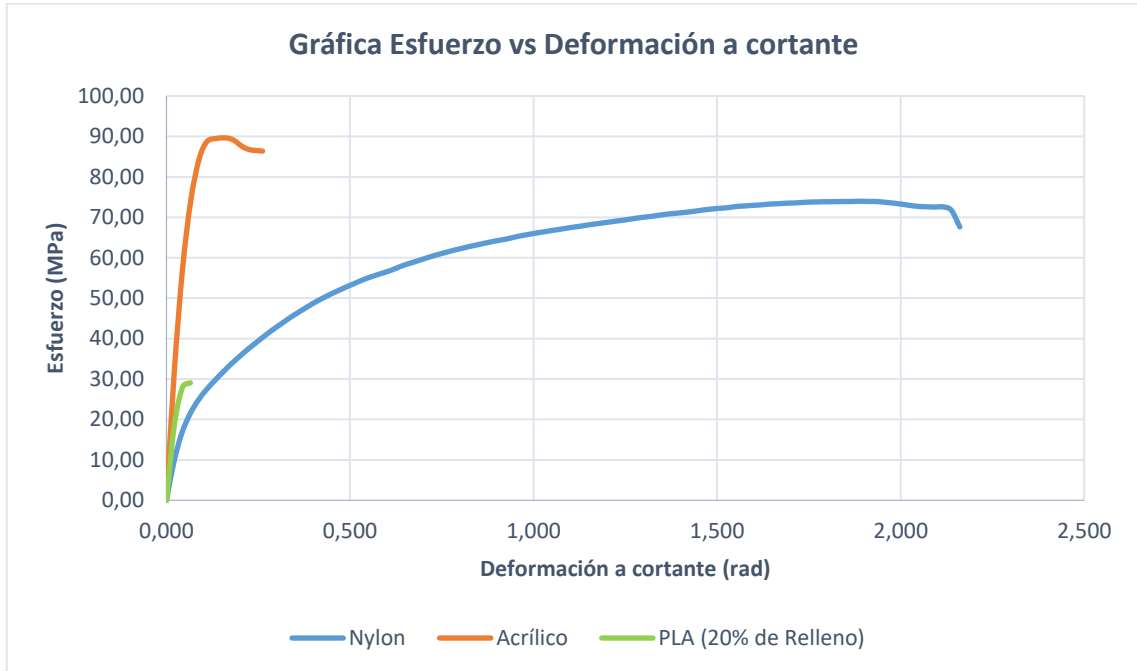


Gráfico 13-4. Comparación curvas esfuerzo-deformación cortante de nylon acrílico y PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

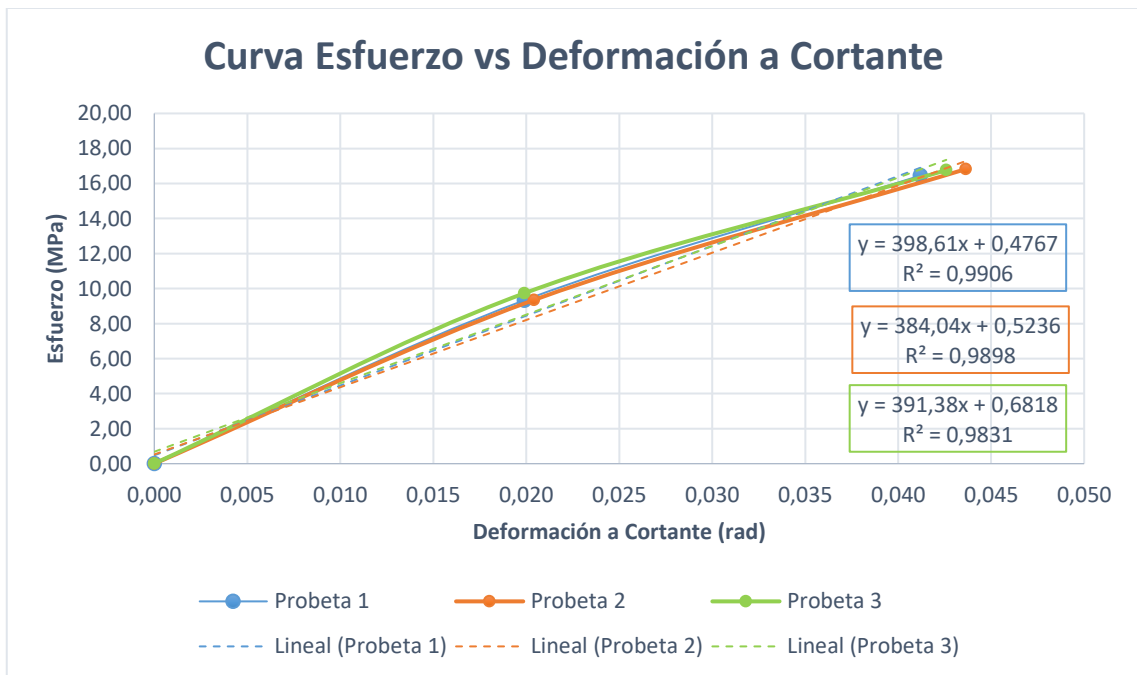


Gráfico 14-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de nylon.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

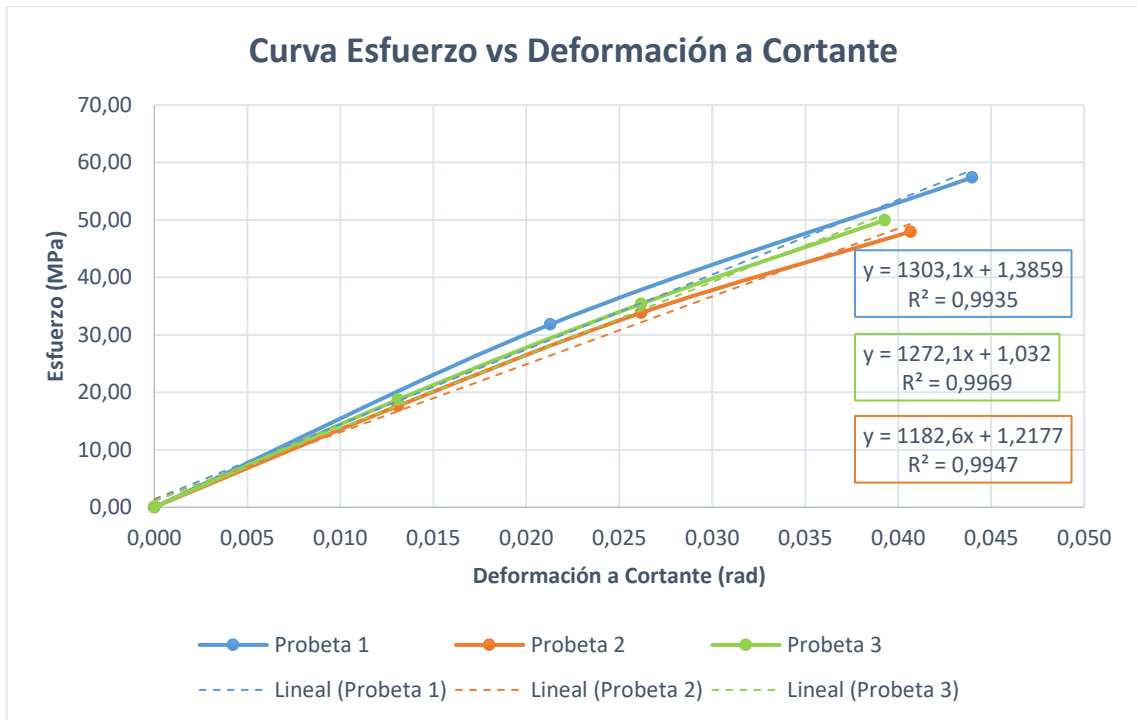


Gráfico 15-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de acrílico.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

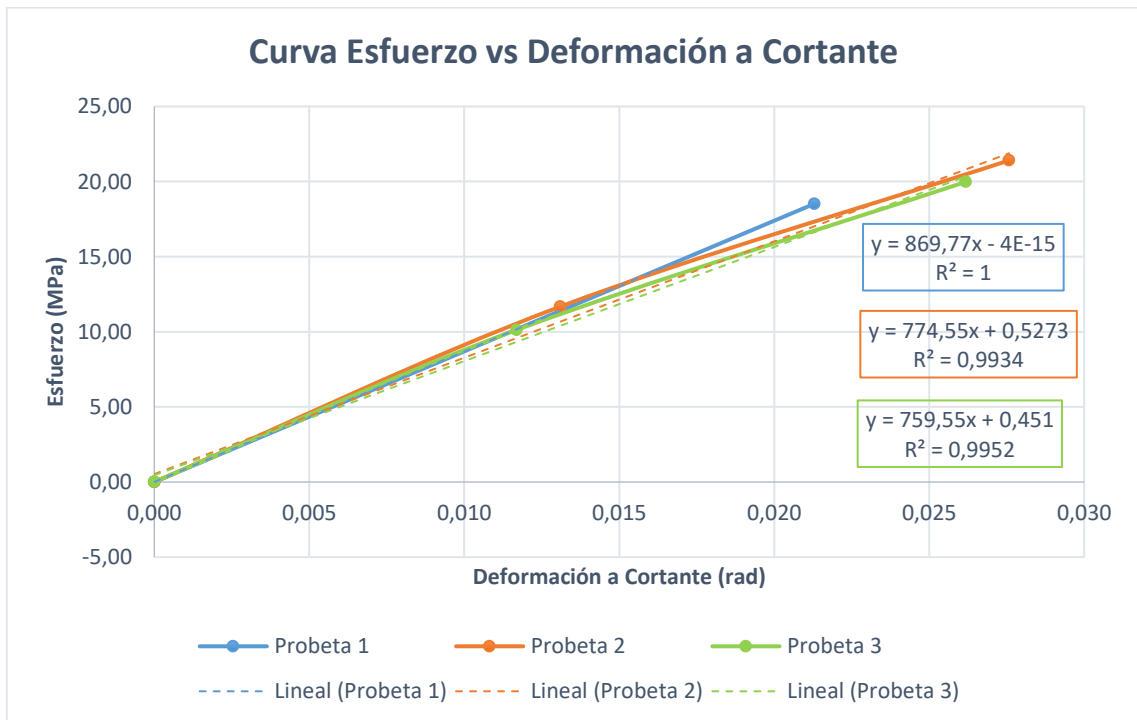


Gráfico 16-4. Región elástica de las curvas esfuerzo-deformación a cortante de PLA.

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 11-4: Tiempo de ensayo, resistencia máxima y módulo de rigidez - Nylon.

Probeta ensayada / Valor promedio	Tiempo de ensayo	Resistencia a la torsión máxima (MPa)	Módulo de rigidez (GPa)
Probeta 1	15 min 14 s	73,98	0,399
Probeta 2	15 min 05 s	73,98	0,384
Probeta 3	15 min 34 s	72,95	0,391
Promedio	15 min 18 s	73,64	0,391

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 12-4: Tiempo de ensayo, resistencia máxima y módulo de rigidez - Acrílico.

Probeta ensayada / Valor promedio	Tiempo de ensayo	Resistencia a la torsión máxima (MPa)	Módulo de rigidez (GPa)
Probeta 1	3 min 04 s	89,63	1,303
Probeta 2	2 min 52 s	89,91	1,272
Probeta 3	3 min 01 s	89,63	1,183
Promedio	2 min 59 s	89,72	1,253

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 13-4: Tiempo ensayo, resistencia máxima y módulo rigidez - PLA

Probeta ensayada / Valor promedio	Tiempo de ensayo	Resistencia a la torsión máxima (MPa)	Módulo de rigidez (GPa)
Probeta 1	0 min 41 s	29,07	0,870
Probeta 2	0 min 44 s	27,28	0,774
Probeta 3	0 min 42 s	25,86	0,760
Promedio	0 min 42 s	27,40	0,801

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

A continuación, en las tablas 14-4 y 15-4 se presentan los valores de desviación estándar tanto para la resistencia máxima de torsión como para el módulo de rigidez de cada uno de los materiales.

Tabla 14-4: Desviación estándar en los valores de la resistencia a la torsión máxima.

Material	Resistencia a la torsión máxima (MPa)	Valor Promedio (MPa)	Diferencia (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Nylon	73,98	73,64	0,34	0,595
	73,98		0,34	
	72,95		0,69	
Acrílico	89,63	89,72	0,09	0,162
	89,91		0,19	
	89,63		0,09	
PLA	29,07	27,04	2,03	1,609
	27,28		0,24	
	25,86		1,18	

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Tabla 15-4: Desviación estándar en los valores del módulo de rigidez.

Material	Módulo de Rigidez (GPa)	Valor Promedio (GPa)	Diferencia (GPa)	Desviación Estándar (GPa)
Nylon	0,399	0,391	0,01	0,008
	0,384		0,01	
	0,391		0,00	
Acrílico	1,303	1,253	0,05	0,062
	1,272		0,02	
	1,183		0,07	
PLA	0,870	0,801	0,07	0,060
	0,774		0,03	
	0,760		0,04	

Realizado por: Barriga B., Santillán M., 2020.

Como se puede observar el valor de la desviación estándar es relativamente baja, y difiere del tipo de material. En la mayoría de los casos se presenta una mínima desviación, excepto en el

valor de esfuerzo de resistencia máxima del PLA, que puede deberse a factores que inciden en la fabricación de piezas por impresiones 3D. También se puede observar que los datos tomados se ubican a no más de dos desviaciones estándar, es decir que entran en un intervalo de confianza del 95%. Este valor refleja una buena confiabilidad en los resultados.

4.2.5 Cálculo del número de probetas para el ensayo de torsión

Mediante la ecuación 17 se calcula el número de probetas necesarios para la realización del ensayo de torsión. El valor de la desviación estándar se toma con respecto al esfuerzo máximo de torsión de la tabla 14-4. Se debe tomar el máximo valor de la desviación estándar.

A continuación, se presentan los parámetros utilizados para el cálculo de número de probetas.

Nivel de confianza = 95%

$$\sigma = 1,6$$

$$Z = 1,96$$

$$E = 2 \sigma$$

Reemplazando los valores en la ecuación 17 se tiene:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2}{E}$$
$$n = \frac{1,96^2 \cdot 1,6^2}{2 \cdot 1,6}$$
$$n = 3,07 \approx 3$$

El número de probetas del mismo material y de la misma configuración para la realización del ensayo de torsión es de 3 probetas, con un nivel de confianza del 95%.

4.3 Guía de ensayo

GUIA ENSAYO DE TORSION EN POLÍMEROS

NOMBRES Y APELLIDOS DEL ESTUDIANTE

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE MECÁNICA – ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Fecha de realización:

Fecha de entrega:

1. RESUMEN

Realizar un resumen de las actividades cumplidas detallando las normas utilizadas, proceso utilizado y resultados obtenidos.

2. PALABRAS CLAVES

Seleccionar mínimo tres palabras técnicas de gran importancia que influyan en el ensayo a torsión.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Realizar el ensayo de torsión mediante la norma ASTM E 0143-02 “Test method for shear Modulus at room temperature” para determinar modulo cortante, esfuerzo y deformación angular.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Obtener la gráfica Esfuerzo vs. Determinación angular.
- ✓ Determinar el esfuerzo máximo que presenta los diferentes tipos de polímeros.
- ✓ Observar el comportamiento del material cuando se somete a torsión.
- ✓ Determinar el tipo de fractura frágil o dúctil del material.

4. EQUIPOS Y MATERIALES

4.1. EQUIPOS

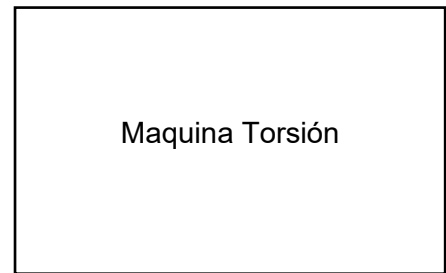


Figura.1. Máquina de Torsión

Partes:

1.
2.
3.

Accesorios



Figura.2. Computador

4.2. MATERIALES

Herramientas



Figura.3. Calibrador



Figura.4. Flexómetro



Figura.5. Llaves para ajustar mandril

Insumos (Probetas)

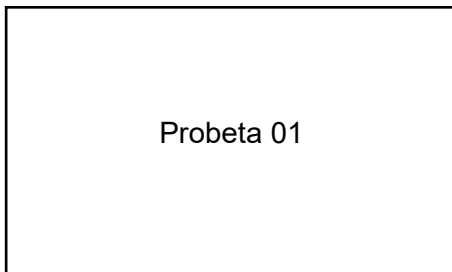


Figura.6. Probeta Nylon

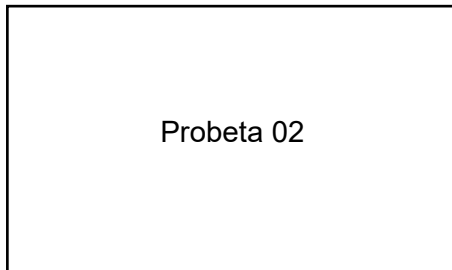


Figura.7. Probeta Acrílico

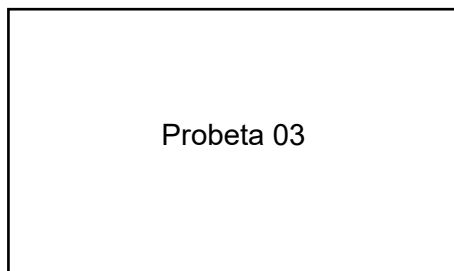


Figura.8. Probeta PLA

5. MARCO TEÓRICO

FUNDAMENTO TEÓRICO

Detallar de forma clara y concreta los fundamentos teóricos incluyendo las actividades, ecuaciones utilizadas en el ensayo.

EQUIPO

Describir las características del equipo utilizado en el ensayo de Torsión.

NORMA

Indicar la norma utilizada y los parámetros que se deben cumplir.

Norma: ASTM E 0143-02 “Test method for shear Modulus at room temperature”

Norma: DIN-50125 “Test pieces for tensile testing of metallic materials”

PROBETA

Para este ensayo se utilizan tres probetas: Nylon, acrílico y PLA. Estas probetas deben cumplir los parámetros de las normas establecidas previamente.

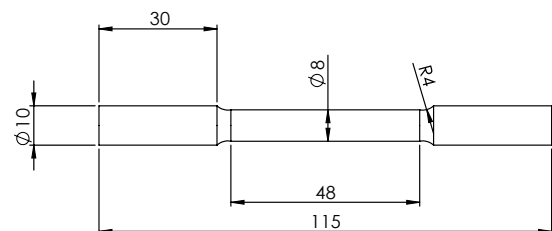


Figura.9. Dimensión Probeta

Tabla 1: Dimensiones de las probetas

Longitud (mm)	115
Diámetro(mm)	10

6. PROCEDIMIENTO

Para realizar el ensayo de torsión se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Colocarse el EPP adecuado.
2. Verificación del área del ensayo.
3. Verificar las dimensiones de las probetas.
4. Sujetar la probeta por medio de las mordazas.
5. Verificar y calibrar la longitud libre de la probeta.
6. Setear los parámetros iniciales para la realización del ensayo.
7. Iniciar el ensayo.
8. Visualizar las mediciones generadas por el ensayo.
9. Cuando la probeta llegue a la fractura detener el ensayo.
10. Retirar probeta de las mordazas
11. Realizar la conexión computador controlador para descargar el archivo generado del ensayo.
12. Análisis de los resultados obtenidos

7. TECNICA EXPERIMENTAL

7.1. Obtención de datos

Probeta 1

Tabla 2: Datos para la probeta Nylon

Diámetro (mm)	
Longitud (mm)	

Tabla 3: Ángulo de giro y momento torsor Nylon

Vuelta	Ángulo (°)	Momento Torsor (kg.m)

Tabla 3: (continuación) Ángulo de giro y momento torsor Nylon

Probeta 2

Tabla 4: Datos para la probeta Acrílico

Diámetro (mm)	
Longitud (mm)	

Tabla 5: Ángulo de giro y momento torsor Acrílico

Vuelta	Ángulo (°)	Momento Torsor (kg.m)

Probeta 3

Tabla 6: Datos para la probeta 03

Diámetro (mm)	
Longitud (mm)	

Tabla 7: Ángulo de giro y momento torsor PLA

Vuelta	Ángulo (°)	Momento Torsor (N.m)

7.2. Procesamiento de datos

Por medio de los datos obtenidos de momento torsor y ángulo se debe obtener los valores de corte, módulo de corte y distorsión angular

Tabla 8: Cálculos del ensayo para Nylon

Angulo (°)	Momento Torsor (N m)	Esfuerzo de corte (MPa)	Deformación a cortante (rad)

Tabla 9: Cálculos del ensayo para Acrílico

Angulo (°)	Momento Torsor (N m)	Esfuerzo de corte (Mpa)	Deformación a cortante (rad)

Tabla 10: Cálculos del ensayo para PLA

Angulo (°)	Momento Torsor (N m)	Esfuerzo de corte (Mpa)	Deformación a cortante (rad)

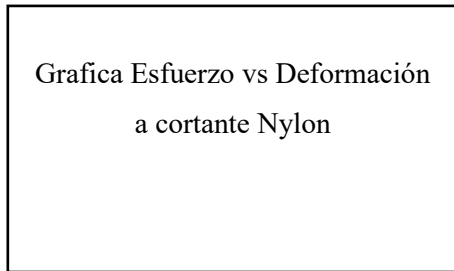
8. Resultados

Con los resultados obtenidos se procede a completar las tablas y realizar las gráficas pertinentes:

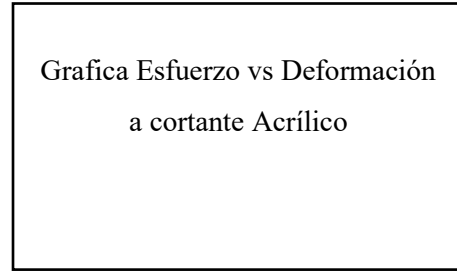
Tabla 11: Resultados obtenidos para Nylon

Diámetro (m)	
Longitud (m)	
Módulo de corte (MPa)	
Esfuerzo Máximo (MPa)	
Par Máximo (N m)	
Angulo máximo (°)	
Deformación a cortante (rad)	
Tipo de falla	

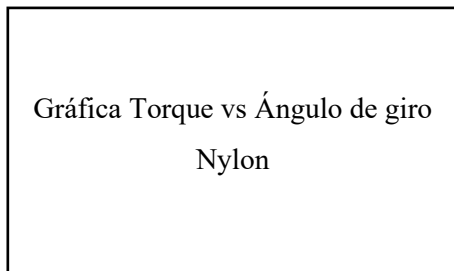
Gráfica 1. Grafica Esfuerzo vs Deformación a cortante Nylon



Gráfica 3. Grafica Esfuerzo vs Deformación a cortante Acrílico



Gráfica 2. Grafica Torque vs Ángulo de giro Nylon



Gráfica 4. Gráfica Torque vs Ángulo de giro Acrílico

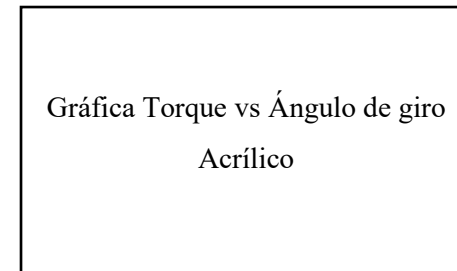


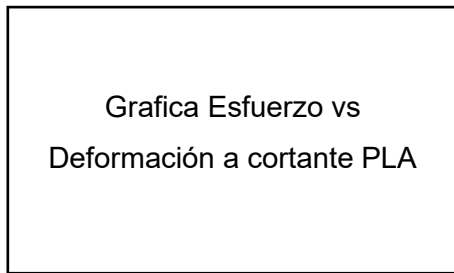
Tabla 12: Resultados obtenidos para Acrílico

Diámetro (m)	
Longitud (m)	
Módulo de corte (MPa)	
Esfuerzo Máximo (MPa)	
Par Máximo (N m)	
Angulo máximo (°)	
Deformación a cortante (rad)	
Tipo de falla	

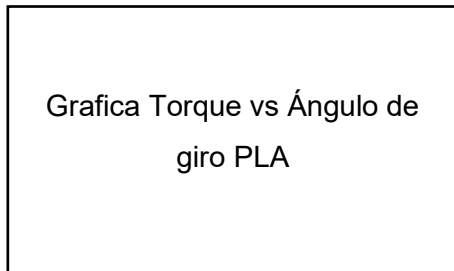
Tabla 13: Resultados obtenidos para PLA

Diámetro (m)	
Longitud (m)	
Módulo de corte (MPa)	
Esfuerzo Máximo (MPa)	
Par Máximo (N m)	
Angulo máximo (°)	
Deformación a cortante (rad)	
Tipo de falla	

Gráfica 5. Gráfica Esfuerzo vs Deformación a cortante PLA



Gráfica 6. Gráfica Torque vs Ángulo de giro PLA



9. DISCUSIÓN Y ANALISIS

Se debe realizar un análisis de los tipos de fracturas de las distintas probetas para determinar el tipo de material y realizar una discusión de los resultados obtenidos del ensayo.

10. CONCLUSIONES

Redactar las conclusiones de acuerdo con los objetivos.

- ✓
-
-
- ✓
-
-
-
- ✓
-
-

11. RECOMENDACIONES

- ✓
-
-
- ✓
-
-
-
- ✓
-
-

12. BIBLIOGRAFÍA

Citar bibliografía de acuerdo con las normas ISO 690.

CONCLUSIONES

- La revisión bibliográfica permitió encontrar las propiedades de los polímeros, estos valores se utilizaron para el dimensionamiento y selección de elementos de la máquina, además se encontró normas de referencias para el ensayo de torsión, la norma DIN 50125 exhibe el dimensionamiento de las probetas y la norma ASTM E143-02 define los parámetros que se deben utilizar en el ensayo.
- Mediante el uso de la ingeniería concurrente se determinó las necesidades y requerimientos de la máquina. Además, la metodología empleada permitió realizar un análisis de alternativas y comprobar mediante simulación que los elementos soporten las cargas de operación, generando posteriormente la documentación necesaria para la construcción de la máquina.
- El análisis de la casa de calidad permitió conocer las necesidades del usuario para transformarlas con un criterio ingenieril en especificaciones técnicas y generar diversas propuestas de selección obteniendo un diseño óptimo y eficaz de la máquina.
- El sistema de control de la máquina de torsión está formado por los microcontroladores Arduino Mega y un Arduino UNO, los cuales son muy eficaces y accesiblemente módicos a comparación con otro tipo de controladores. La comunicación de la máquina y el operador lo realiza la pantalla Nextion que posee un interfaz amigable con el usuario y controla los parámetros del ensayo. También permite visualizar los resultados obtenidos durante la realización de la prueba en tiempo real. Además, dichos valores se pueden exportar hacia un ordenador para su posterior análisis.
- Se optimizó la construcción del equipo mediante el uso de una tabla que describe los procesos de mecanizado y tiempos de construcción para cada elemento mecánico, generando un procedimiento ordenado optimizando el tiempo en la fabricación de piezas no estandarizadas. Además, el uso del cursograma de montaje establece un proceso de ensamblado sistemático que permite al operario acoplar todos los elementos de forma correcta y segura.
- Mediante la calibración de los sensores se asegura que los resultados obtenidos de los ensayos que se realicen en la máquina de torsión presenten una buena confiabilidad. El sensor de torsión estática presenta un error del 0,95% mientras que para el sensor de deformación angular el error promedio es del 0,35%.

- Al realizar las pruebas de vacío se comprobó que la máquina posee un correcto funcionamiento, verificando que todos los elementos trabajan normalmente y que los datos proyectados en la pantalla Nextion sean correctos. Mientras que en la prueba de carga se verificó la capacidad de la máquina de 15 N.m. Además, se comprobó la lectura de los sensores y la sujeción de los mandriles con las probetas.
- La guía del ensayo de torsión presenta un procedimiento ordenado y detallado para la realización de la prueba. Representa una fuente importante de información a la que el usuario debe recurrir para hacer uso correcto del equipo y cumplir con los parámetros establecidos.
- Se realizó el ensayo de torsión en tres tipos de polímeros que son Nylon, Acrílico y PLA. El ensayo sobre el nylon se realizó con una velocidad de 100°/min, mientras que para el acrílico y el PLA una velocidad de 60 °/min. El ensayo sobre el nylon tuvo una duración promedio de 15 minutos 18 segundos, un esfuerzo máximo de torsión de 73,64 MPa y un módulo de rigidez de 0,39 GPa. En cuanto a la probeta de acrílico el ensayo se efectuó en aproximadamente en 2 minutos 59 segundos con un esfuerzo máximo de torsión de 89,72 MPa y un módulo de rigidez promedio de 1,25 GPa. Por último, el ensayo sobre la probeta de impresión 3D de PLA tuvo una duración promedio de 42 segundos con un esfuerzo máximo de torsión de 27,40 MPa y un módulo de rigidez de 0,80 GPa.
- Con el análisis de la desviación estándar de los resultados de la resistencia máxima a la torsión y del módulo de rigidez obtenidos del ensayo se puede determinar que los valores no presentan una gran dispersión y que sus resultados no exceden el valor de dos desviaciones estándar por lo que entran en un intervalo de confianza del 95%. Además, con este nivel de confianza se determinó que el número necesario de probetas de un mismo material y de una misma configuración es 3.
- La fractura producida en la probeta de nylon demuestra que el material es dúctil en virtud de que este material presenta una alta deformación. La fractura en la probeta de acrílico es de tipo frágil ya que se trata de un material duro con limitada plasticidad. En cuanto a la fractura de la probeta de PLA impresa 3D demuestra que esta presenta un comportamiento frágil, además este material se rompió con mucha facilidad.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda para futuros trabajos de investigación el estudio e implementación de ensayos a torsión controlados de forma virtual, permitiendo configurar los parámetros iniciales, realizar el ensayo y obtener los resultados de forma remota sin la necesidad de la intervención de un operario.
- Se recomienda el estudio de la implementación de un sistema automático para el apriete de las mordazas hacia la probeta, lo cual permitiría un mejor y más rápido centrado de esta.
- Es recomendable también que para posteriores trabajos se analice la posibilidad de incorporar un motor acoplado al tornillo de potencia, de tal forma que se pueda controlar la ubicación de la mordaza no rotaría automáticamente dependiendo de la longitud de la probeta a ensayar.

GLOSARIO

Diseño: Es un proceso innovador e iterativo que permite obtener la mejor decisión posible para dar solución a algún problema planteado (Budynas, Nisbett, 2012).

Encoder: Es un dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos: digitales binarios, analógicos en función de una onda, pulsos, etcétera (Electronics, 2020).

Exoesqueleto: Es una máquina que consiste en un armazón externo que lleva puesto una persona mediante un sistema de potencia de motores o hidráulicos proporciona movilidad permitiendo realizar actividades que sin él no podría (Yang et al., 2004).

HMI (Interfaz Hombre-Máquina): Un HMI es el interfaz entre el proceso y el operario. Se trata básicamente de un panel de instrumentos del operario y es la principal herramienta utilizada para coordinar y controlar procesos industriales y de fabricación (Nextion, 2020).

Microcontrolador: Un microcontrolador es un circuito integrado digital que puede ser usado para diversos propósitos debido a que es programable. Está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM) y líneas de entrada y salida (Electronics, 2020).

PLA (Ácido Poliláctico): Se trata de un polímero biodegradable que puede producirse a partir del ácido láctico, que puede fermentarse a partir de cultivos como el maíz. Tiene un uso muy extendido en las impresoras 3d (Serna et al., 2003).

QFD (Despliegue de la Función de Calidad): De las siglas en inglés Quality Function Deployment se trata de una metodología usada en la ingeniería de la calidad para crear productos que se adapten a los gustos y necesidades del usuario (Riba, 2002).

Torsión: Es la aplicación de un momento de fuerza sobre el eje longitudinal de una pieza prismática o elemento constructivo (Hibbeler, 2006).

BIBLIOGRAFÍA

ASTM E143-02. *Standard Test Method for Shear Modulus at Room Temperature.*

AMBRIZ, Jorge L. AVILA, et al. "Design and construction of a torsion fatigue machine: Torsion fatigue tests on two industrial aluminum alloys". *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering.* 2017, vol. 79, n° 2(2017), p. 169-182.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON, E Russell; et MAZUREK, David F. *Estática.* 9^{na} ed. Mexico: McGraw-Hill, 2011, pp 476-477.

BEER, Ferdinand P; JOHNSTON, E Russell; DEWOLF, John T; et MAZUREK, David F. *Mecánica de materiales.* 4^{ta} ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007, pp 132-179.

BILLMEYER, Fred W. *Ciencia de los polímeros.* Barcelona - España: Reverté, 1975, pp 3-4.

BRESSAN, José Divo; & UNFER, Ricardo Kirchhof. "Construction and validation tests of a torsion test machine". *Journal of Materials Processing Technology,* vol. 179, n° 1-3 (2006), p. 23-29.

BRINDIS, Eleno Alfonso. *Propiedades básicas de los polímeros* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/34650509/PROPIEDADES_B%C3%81SICAS_DE_LOS_POL%C3%8DMEROS.

BUDYNAS, Richard G et NISBETT, J Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* 9^{na} ed. España: McGraw-Hill, 2012, pp 398-400.

CASTILLO CUENCA, Ángel Vinicio. Diseño y construcción de un Banco para ensayos de torsión [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. 2011. pp. 21 - 47 [Consulta 2020 - 06 - 25]. Disponible en: <http://dspace.unl.edu.ec:9001/jspui/bitstream/123456789/12439/1/Castillo%20Cuenca%2C%20%C3%81ngel%20Vinicio.pdf>

CASTRO, Jose; & ESPINOSA, Gerardo. Diseño y fabricación de una celda de carga para la máquina de ensayo universal Shenck-Trebel de 200kN de capacidad [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad de Talca, Chile. 2005. pp. 19 - 70. [Consulta 2020 - 06 - 25]. Disponible en: <https://docplayer.es/14139979-Disenoy-fabricacion-de-una-celda-de-carga-para-la-maquina-de-ensayo-universal-shenck-trebel-de-200-kn-de-capacidad.html>

CAUTELA, William, & MOSCIANESE, Luciano. Diseño y construcción de una máquina de ensayo de torsión estática para el laboratorio de diseño de la escuela de Ingeniería Mecánica de

la Universidad Central de Venezuela [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Central de Venezuela. 2005. pp 57 - 123. [Consulta 2020 - 06 - 26]. Disponible en: <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/6993/1/M%c3%a1quina%20de%20ensayo%20de%20Torsi%c3%b3n%20Est%c3%a1tica%20UCV%20MC-01.pdf>

COREÑO, Juan A.; & MENDEZ, María. "Relación estructura-propiedades de polímeros". *Educación Química*. Vol. 21, n° 4 (2010), (México) pp. 291-299.

CURBELL PLASTICS. *Plastic Material Properties Table | Mechanical, Physical, Thermal | Curbell Plastics* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en : <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Plastic-Properties>.

ELECTRONICS, MCI, 2020. Arduino. In : . 2020.

DIN 50125. *Testing of metallic materials - Tensile test pieces*.

FENG, P. F., et al. "Jaw-chuck stiffness and its influence on dynamic clamping force during high-speed turning". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 48, n° 11 (2008), pp. 1268-1275.

FRS-CNC. *Motor paso a paso nema23 180Ncm* [blog]. [Consulta: 26 junio 2020]. Disponible en: <https://frs-cnc.com/motores/motores-de-pasos/484/motor-pasos-smb57-s76-425-detail>.

GARZÓN, José; URREA, Brian; USSA, Jonathan. Diseño y construcción de un banco para pruebas de torsión [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad de Buenaventura, Bogota - Colombia 2015. pp. 11- 68. [Consulta 2020 - 06 - 26]. Disponible en: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/137799.pdf>

HIBBELER, Russell C. *Mecánica de materiales* 6^{ta} ed. México: Pearson Educación. 2006. pp 179-241.

IBERTEST. *Máquinas de ensayo y soluciones a medida para ensayo de materiales*. [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.ibertest.es/>.

IBRAHIM, M E; et al. "The use of locally fabricated torsion testing machine for the determination of shear modulus of rigidity of aluminium and copper". *International Journal of Applied Science and Engineering Review*, vol. 3, n° 4, 2014.

INSTRON. *Instron MT Series Low Capacity Torsion Testers - Instron* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.instron.es/es-es/products/testing-systems/torsion-systems/low-capacity>.

KANCHWALA, Mustafa, et al. "Torsional testing on UTM". *International Research Journal of Engineering and Technology*. vol. 179, n° 1-3, 2006, pp. 427-431.

LARA, Andrés, *Pruebas y Formatos de Pruebas.* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9585/3/AC-MCT-ESPE-048576.pdf>.

LOAYZA, Ronald Cabrera. "Aplicaciones de Centros de Gravedad , Centroides , Primer Momento y Momento de Inercia en la Ingeniería Civil".vol. 1, n° 1 (2016), p. 1-5.

MARCILLA, Antonio. *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades.* España: Universidad de Alicante, 2012. pp. 30-32.

MIR, Aqeela; & HASSAN, Ali. "Low cost solution of performing torsion testing of materials". *International Conference on Mechatronics and Automation*, (2017). pp. 717-721.

MORENO, Gloria; LOPÉZ, Jorge; & MALAGÓN Oscar. Diseño y construcción de una maquina basica de ensayos destructivos de traccion y torsion [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad de San Buenaventura. 2006 . pp. 53 - 113. [Consulta 2020 - 06 - 28]. Disponible en: <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/37959.pdf>.

NAYLAMP MECHATRONICS. *Sensor Encoder Infrarrojo FC-03 - Naylamp Mechatronics* [blog]. [Consulta: 26 junio 2020]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/robotica-movil/240-encoder-infrarrojo.html>.

NEXTION. *NX8048T050 - Nextion* [blog]. [Consulta: 26 junio 2020]. Disponible en: <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t050/>.

ORTIZ BERROCAL, Luis. *Resistencia de materiales.* 3^{ra} ed. España: McGraw-Hill, 2007, pp 108-206.

PACHECO, Gustavo. Análisis De Tracción De Probetas Impresas En 3D Mediante Deposición De Hilo Fundido De Pla, Abs Y Pla/Mlo [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. pp. ## - ##. [Consulta 2020 - 06 - 26]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17123/1/UPS-CT008182.pdf>.

PATIL, MRD; & GORE, PN. "Review the Effect of Specimen Geometry on Torsion Test Results". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Techonology*, vol. 2, n° 12 (2013), pp. 7567-7574.

PILLAJO, Carolina; & SUÁREZ, Fernando. Repotenciación del sistema de adquisición de datos de la máquina de torsión del laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de Mecánica [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2018. pp. 56 - 74. [Consulta 2020 - 06 - 27]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/9446/1/15T00684.pdf>

RAMÍREZ, Carlos. Estudio Integral del Ensayo de Torsión [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. 2004. pp. 18 - 53. [Consulta 2020 - 06 - 27]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/3495>

RIBA, Carles. *Diseño concurrente*. Barcelona - España: UPC, 2002, pp. 67 - 185.

SANGER, Agustina. "Las fuerzas y su medición: Ley de Hooke". *Escuela de Enseñanza Media N° 221 "Malvinas Argentinas"*, vol. 1, n° 1 (2005), p. 1-5.

SERNA, Liliana, et al. "Ácido poliláctico (PLA): Propiedades y aplicaciones". *Ingeniería y competitividad*, vol. 5, n° 1 (2003), p. 16-26.

SILVA, Luz; & ARROYAVE, Juan. Banco didáctico para ensayo de torsión en barras [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Tecnológica de Pereira. 2016. pp. 06 - 63. [Consulta 2020 - 06 - 28]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/6904/62011243S586.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial*. 8^{va} ed. Barcelona - España: Marcombo, 2012, pp 10-15.

TINIUS OLSEN. *Torsion Testing Machine 1,000 to 30,000 Nm from Tinius Olsen* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.tiniusolsen.com/tinius-olsen-products/torsion-tester>.

TOBITA, Kazuteru, et al. "A rotary encoder based on magneto-optical storage". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2005, vol. 10, n° 1 (2005), p. 87-97.

TORRE, Vega. *Ajuste por mínimos cuadrados* [blog]. [Consulta: 25 de junio 2020]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1593/course/section/2045/Ajuste%20por%20minimos%20cuadrados.pdf>

ULTIMAKER. *Ficha de datos técnicos PLA* [blog]. [Consulta: 28 de junio 2020]. Disponible en: https://ultimaker.com/download/67583/TDS_PLA_v3.011-spa-ES.pdf. 2017

UNITEDTEST. *Máquina de prueba de torsión - Beijing United Test Co* [blog]. [Consulta: 25 junio 2020]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/beijing-united-test-co-ltd/product-103733-1077977.html>.

VALERA, Martín. Modelado y análisis de un sistema de sujeción: aplicación a una pinza expansible [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería) Universidad Carlos III de Madrid. 2012. pp. 10 - 100. [Consulta 2020 - 06 - 29]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16617/PFC_Maria_Valera_Martin.pdf;jsessionid=E61FFBF96F2A95B9ADD2F4CB7E494695?sequence=1

WINDING, Charles Calvert; & HIATT, Gordon Dale. *Polymeric materials*. New York: McGraw-Hill, 1961. pp 125-128.

YEH, T. J.; & WU, Feng Kung. "Modeling and robust control of worm-gear driven systems". *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n° 5 (2009), p. 767-777.