

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,

INFORMÁTICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



TESIS

**DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE
TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN
MÓDULO EDUCATIVO**

PRESENTADO POR:

Br. JUAN DANIEL ATAUCHI VALENCIA

Br. JULIO CESAR ATAUCHI VALENCIA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO MECÁNICO**

ASESOR:

Dr. EFRAIN WALTER SEQUEIROS PÉREZ

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Dr. EFRAÍN WALTER SEQUEIROS PÉREZ.....
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL.....
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA.....
DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO.....
EDUCATIVO.....

Presentado por: JUAN DANIEL ATAUCHI VALENCIA..... DNI N° 72198366.....;
presentado por: JULIO CESAR ATAUCHI VALENCIA..... DNI N°: 72198367.....
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO MECÁNICO.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 4%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 13 de Setiembre de 2026.....

Firma

Post firma

Nro. de DNI

ORCID del Asesor

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259 : 623709875

TESIS - DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:623709875

Fecha de entrega

12 sep 2026, 11:39 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

13 sep 2026, 12:22 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS - DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36.pdf

Tamaño del archivo

12.8 MB

268 páginas

45.542 palabras

233.893 caracteres

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
66 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
284 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A Dios, a mi familia y a la ciencia de la

Ingeniería Mecánica

Juan Daniel Atauchí Valencia

A Dios, a la Virgen María, a mi familia y al

estudio de la Ingeniería Mecánica.

Julio Cesar Atauchí Valencia

Agradecimientos

Agradecemos infinitamente a Dios y a la Virgen María por guiarnos a lo largo de este camino académico. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestra familia por su apoyo incondicional y paciencia, a nuestro asesor el Dr. Efraín Walter Sequeiros Pérez por su valiosa orientación y confianza, y a los catedráticos de Ingeniería Mecánica, cuya dedicación nos ha inculcado la pasión por esta disciplina. También agradecemos el aliento de nuestros compañeros y amigos, así como a todos los que contribuyeron directa o indirectamente a la realización de este trabajo.

Resumen

El comportamiento mecánico es un tema fundamental en la formación de ingeniería mecánica; sin embargo, el elevado coste y la complejidad de los equipos comerciales de ensayo de tracción limitan la experimentación práctica en los laboratorios universitarios. Esta tesis aborda estas brechas con la descripción experimental del comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo. El equipo se diseñó aplicando las directrices VDI 2221/2019 y el diseño para la manufactura (DFM), con un enfoque modular y una capacidad de 20 kN, obteniendo un costo de 2232 USD. Se desarrollaron dos aplicaciones en Python con interfaz gráfica (GUI), para la adquisición, procesamiento de datos y generación de diagramas fuerza-elongación y esfuerzo-deformación en tiempo real. Los ensayos de tracción en probetas de láminas de 1.8 mm, realizadas de acuerdo con los estándares ASTM E8/E8M y ASTM A36, mostraron una alta repetibilidad: resistencia a la tracción 461.8 MPa ($S_r = 2.49$ MPa), porcentaje de elongación 29.29 % ($S_r = 3.73$ %) y reducción de área 62 % ($S_r = 1.07$ %). Estos resultados concuerdan con la literatura y validan la precisión del equipo para fines educativos. El sistema de adquisición de datos y las aplicaciones contribuyen al aprendizaje activo al desarrollar ensayos acordes a las prácticas actuales de ingeniería. Este proyecto aporta una solución escalable y económica para los planes de estudios de ingeniería mecánica, promoviendo habilidades prácticas en el comportamiento mecánico de materiales e impulsando la innovación en equipos didácticos.

Palabras clave: Ensayo de tracción, Comportamiento mecánico, Resistencia a la tracción, Diagrama esfuerzo–deformación, Diseño en ingeniería mecánica.

Abstract

Mechanical behavior is a fundamental topic in mechanical engineering education; however, the high cost and complexity of commercial tensile testing equipment limit practical experimentation in university laboratories. This thesis addresses these gaps through the experimental characterization of the mechanical behavior of ASTM A36 steel under tensile loading by means of the design and fabrication of an educational module. The equipment was designed following the VDI 2221/2019 guidelines and Design for Manufacturability (DFM) principles, adopting a modular approach with a capacity of 20 kN and achieving a total cost of 2232 USD. Two Python applications with graphical user interfaces (GUIs) were developed for data acquisition, processing, and real-time generation of force–elongation and stress–strain diagrams. Tensile tests performed on 1.8 mm sheet specimens in accordance with ASTM E8/E8M and ASTM A36 standards demonstrated high repeatability: ultimate tensile strength of 461.8 MPa ($S_r = 2.49$ MPa), percent elongation of 29.29 % ($S_r = 3.73$ %), and reduction of area of 62 % ($S_r = 1.07$ %). These results are consistent with the literature and validate the accuracy of the equipment for educational purposes. The data-acquisition system and associated applications contribute to active learning by enabling tests aligned with current engineering practice. This project provides a scalable and cost-effective solution for mechanical engineering curricula, fostering practical skills in the mechanical behavior of materials and promoting innovation in instructional laboratory equipment.

Keywords: Tensile testing, Mechanical behavior, Tensile strength, Stress-Strain diagram, Mechanical engineering design.

TABLA DE CONTENIDOS

Introducción	1
Capítulo 1: Aspectos Generales	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Formulación del Problema.....	4
1.2.1 Problema General.....	4
1.2.2 Problemas Específicos	4
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación de la Investigación	5
1.5 Formulación de la Hipótesis	7
1.6 Alcances y Limitaciones	7
1.6.1 Alcances:.....	7
1.6.2 Limitaciones:.....	8
1.7 Diseño Metodológico.....	8
Capítulo 2: Revisión De La Literatura.....	10
2.1 Antecedentes	11
2.2 Estado del Arte.....	12
2.2.1 Trabajos Académicos.....	12

2.2.2	Módulos Educativos Comerciales.....	17
2.3	Marco Teórico.....	22
2.3.1	Comportamiento Mecánico y Propiedades Mecánicas Principales	23
2.3.2	Ensayo de Tracción.....	24
2.3.3	Curva Esfuerzo – Deformación y Propiedades de Tracción.....	34
2.3.4	Acero ASTM A36.....	41
2.3.5	Conceptos Generales de Diseño en Ingeniería Mecánica	42
2.3.6	Directriz VDI 2221/19	46
2.3.7	Diseño en Ingeniería Mecánica.....	51
2.3.8	Manufactura y Ensamblaje	55
	Capítulo 3: Diseño del Módulo Educativo de Ensayo de Tracción.....	56
3.1	Fase 1 - Investigación:	57
3.2	Fase 2 - Perfil:.....	58
3.2.1	Diseño de la probeta.....	61
3.3	Fase 3 - Ideas:	62
3.3.1	Determinar las funciones y sus estructuras	62
3.3.2	Buscar los principios de solución y sus estructuras	64
3.3.3	Evaluar y seleccionar los conceptos de solución	67
3.4	Fase 4 - Concepto (Diseño):	71
3.4.1	Estructurar en módulos, definir interfases	71

3.4.2	Diseñar los módulos.....	73
3.4.3	Integrar el producto completo	103
3.4.4	Elaborar las especificaciones de ejecución y uso	127
Capítulo 4: Fabricación y Ensamblaje		130
4.1	Fabricación del módulo educativo de ensayo de tracción	130
4.2	Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción.....	139
4.3	Lista de Materiales Valorada (BOM)	148
Capítulo 5: Ensayo de Tracción ASTM E8/E8M y Estadística de Precisión		152
5.1	Fabricación de la probeta	152
5.2	Ensayo de Tracción ASTM E8/E8M	154
5.2.1	Procedimiento y parámetros del ensayo de tracción.....	154
5.3	Estadística de Precisión.....	166
5.4	Enfoque Experimental	171
Capítulo 6: Evaluación del Efecto de la Preparación de la Probeta en la Resistencia a la Tracción y las Propiedades de Ductilidad.....		173
6.1	Diseño del Experimento - DOE	176
6.1.1	Reconocimiento y declaración del problema:	176
6.1.2	Selección de la variable de la respuesta:	176
6.1.3	Elección de factores, niveles y rangos:	176
6.1.4	Elección del diseño experimental:	177

6.1.5	Realización el experimento:.....	177
6.1.6	Análisis estadístico de los datos:.....	177
6.1.7	Discusión (Conclusiones y recomendaciones).....	196
	Conclusiones	199
	Recomendaciones	201
	Referencias.....	202
	Anexos	209
	Anexo A: Matriz de Consistencia	210
	Anexo B: Benchmarking.....	211
	Anexo C: Cronograma	213
	Anexo D: Planos.....	214
	Anexo E: Sensores y Componentes Electrónicos	215
	Anexo E:1 Sensor de fuerza tipo S – (S-Type Load Cell).....	215
	Anexo E.2: Sensor de desplazamiento lineal – Digital Readout (DRO)	216
	Anexo E.3: Microcontrolador ESP32, módulo ADC HX711 y pantalla LCD2004	217
	Anexo F: Componentes Mecánicos.....	218
	Anexo F.1: Rodamiento Lineal	218
	Anexo F.2: NEWTRY - Bomba hidráulica manual CP-180 + Cilindro hidráulico	
	RSC - 1050	219
	Anexo G: Tablas y figuras para el diseño mecánico	220

Anexo H: Espesores máximos de la probeta:	221
Anexo I: Manual Del Módulo Educativo De Ensayo De Tracción:	222
Anexo J: Repositorio Online	223

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 GUNT WP 300 Ensayo de Materiales 20 kN	17
Figura 2-2 Sistema integral de ensayo de materiales modelo ME-8244	18
Figura 2-3 MATEST (HO17) Máquina Universal Educativa De Ensayos de 20 kN.....	19
Figura 2-4 PA HILTON - (HSM58) Máquina Universal De 35 kN.....	20
Figura 2-5 TECQUIPMENT – (SM1002) Máquina De Ensayo De Tracción De Sobremesa De 20 kN.....	21
Figura 2-6 Probeta durante el ensayo de tracción.....	25
Figura 2-7 a) Experimento de Da Vinci, b) Barra cilíndrica de madera.....	27
Figura 2-8 Máquina de ensayo de tracción desarrollada por Musschenbroek.....	27
Figura 2-9 Máquina de ensayo de Kirkaldy.....	28
Figura 2-10 a) “Little Giant” Tinius Olsen, b) UTM Instron actual.....	29
Figura 2-11 Sistema electromecánico de ensayo de materiales de doble columna	31
Figura 2-12 Tipos y métodos de sujeción de probetas en una máquina universal de ensayos	32
Figura 2-13 Típica probeta de tracción con una sección de calibre reducida y extremos agrandados	33
Figura 2-14 Probeta tipo lámina con extremos de pasador (pin-loaded sheet-type)	34
Figura 2-15 Puntos característicos en la parte inicial de la curva esfuerzo – deformación.	35
Figura 2-16 Comparación de las curvas real y de ingeniería para un acero AISI 1045 a 6 mm/min.....	36
Figura 2-17 Modelo de proceso VDI 2221/19 adaptado al desarrollo del módulo educativo.....	50
Figura 3-1 Black Box.....	63
Figura 3-2 Caja transparente “White Box”.....	63

Figura 3-3 Árbol de funciones	64
Figura 3-4 Caja morfológica.....	65
Figura 3-5 Bocetos de los conceptos de solución	66
Figura 3-6 Diagrama de Intensidad S, “s-Diagramm” VDI 2225.....	70
Figura 3-7 Arquitectura del sistema.....	72
Figura 3-8 Componentes a diseñar	73
Figura 3-9 DCL en la zona del pin	74
Figura 3-10 DCL (sujetador de probeta - pin)	75
Figura 3-11 DCL del pin.....	75
Figura 3-12 Diagrama de fuerza cortante y de momento flector en el pin	76
Figura 3-13 Gráfico de análisis de deflexión en el sujetador	78
Figura 3-14 Análisis de fuerzas actuantes y deformaciones sobre las barras y las placas.	79
Figura 3-15 DCL de la barra móvil A y B con parámetros de diseño.	79
Figura 3-16 DCL de la barra móvil C y D con datos técnicos.....	81
Figura 3-17 DCL placa A	83
Figura 3-18 Diagrama de fuerza cortante y de momento flector en la placa A.....	85
Figura 3-19 DCL placa B.....	87
Figura 3-20 Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa B	88
Figura 3-21 Configuración de la placa C.....	91
Figura 3-22 DCL placa C.....	91
Figura 3-23 Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa C	92
Figura 3-24 DCL placa D	95
Figura 3-25 Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa D.....	96

Figura 3-26 Gráfico de la velocidad del ensayo	99
Figura 3-27 DCL barra Acople PC	100
Figura 3-28 DCL fijación de Barra A - Placa A - Placa C	104
Figura 3-29 Fijación simétrica de las barras A y B	105
Figura 3-30 DCL fijación de barra C - Placa C - Placa D	106
Figura 3-31 DCL Unión roscada del sujetador de probeta superior _ Placa D	108
Figura 3-32 DCL Unión roscada Sujetador de probeta inferior – Sensor de fuerza tipo S	111
Figura 3-33 DCL Unión roscada Sensor de fuerza tipo S – Placa C	113
Figura 3-34 Unión atornillada rodamiento lineal - Placa C.....	116
Figura 3-35 Unión atornillada Acople PC – placa B.....	118
Figura 3-36 Unión de la Placa A al perfil estructural	119
Figura 3-37 Diagrama esquemático del circuito.....	120
Figura 3-38 DCL bastidor.....	122
Figura 3-39 Diagrama de fuerza cortante y momento flector en el perfil estructural	124
Figura 3-40 Modelo CAD del módulo educativo de ensayo de tracción.....	126
Figura 3-41 Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción.....	128
Figura 4-1 Sistema de adquisición de datos del módulo educativo de ensayo de tracción	146
Figura 4-2 Conexión del MEET con el sistema de adquisición de datos y la PC	147
Figura 5-1 Marcas de calibre central y extremos.....	156
Figura 5-2 Configuración del software de adquisición de datos	157
Figura 5-3 Software MEET Data (Anexo J: Repositorio Online)	159
Figura 5-4 Diagramas esfuerzo – deformación.....	160
Figura 5-5 Software MEET Data Stream (Anexo J: Repositorio Online).....	162

Figura 5-6 Datos registrados por el sistema de adquisición de datos	163
Figura 5-7 Probeta después del ensayo de tracción	166
Figura 5-8 Curva de potencia versus tamaño de muestra	167
Figura 5-9 Comparación de los Resultados de la Resistencia última a la tracción (UTS)	170
Figura 5-10 Comparación de los Resultados del % Elongación.....	171
Figura 5-11 Fases para la Descripción Experimental del Comportamiento Mecánico	172
Figura 6-1 Modelo general de un proceso	176
Figura 6-2 Diagrama de bloques del método estadístico.....	178
Figura 6-3 Verificación de normalidad UTS	179
Figura 6-4 Transformación de datos de UTS.....	180
Figura 6-5 Intervalos simultáneos de Tukey.....	183
Figura 6-6 Gráfico de intervalos.....	184
Figura 6-7 Gráfico de cajas "bigotes"	184
Figura 6-8 Grafica de residuos para la resistencia a la tracción	185
Figura 6-9 Verificación de normalidad para el % de elongación	186
Figura 6-10 Transformación de datos del % de elongación	187
Figura 6-11 Intervalos simultáneos de Tukey.....	190
Figura 6-12 Gráfico de intervalos.....	190
Figura 6-13 Gráfico de cajas "bigotes"	191
Figura 6-14 Gráfica de residuos para el % de elongación	191
Figura 6-15 Verificación de normalidad para el % de reducción de área.....	192
Figura 6-16 Grafica de las medianas	194
Figura 6-17 Comparación por pares del % de reducción de área	195

Figura 6-18 Detalle de la elongación y la fractura del grupo de probetas A, B y C..... 197

Figura 6-19 Comparación de los diagramas esfuerzo – deformación de las probetas obtenidas por corte plasma, plasma y convencional 198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1	Lista de requerimientos del módulo educativo de ensayo de tracción	58
Tabla 3-2	Ponderación por procedimiento de clasificación técnico	68
Tabla 3-3	Ponderación por procedimiento de clasificación económico	68
Tabla 3-4	Evaluación técnica	69
Tabla 3-5	Evaluación económica	69
Tabla 3-6	Lista de planos del módulo educativo de ensayo de tracción.....	127
Tabla 3-7	Especificaciones técnicas de los componentes seleccionados.....	129
Tabla 4-1	Detalle de los componentes del módulo educativo de ensayo de tracción	130
Tabla 4-2	Lista de los materiales y herramientas.....	137
Tabla 4-3	Descripción del ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción.....	139
Tabla 4-4	Lista de materiales valorada	148
Tabla 5-1	Dimensiones iniciales de las probetas de ensayo	155
Tabla 5-2	Resistencia última a la tracción	163
Tabla 5-3	Porcentaje de elongación después de la fractura	164
Tabla 5-4	Porcentaje de reducción de área	165
Tabla 5-5	Estadística de precisión	168
Tabla 5-6`	Comparación de los resultados.....	170
Tabla 6-1	Resultados del ensayo aleatorio.....	174
Tabla 6-2	Resistencia a la tracción para los niveles A, B, C	178
Tabla 6-3	Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción (UTS).....	181
Tabla 6-4	Resumen del modelo	181
Tabla 6-5	Medias y desviación estándar por niveles del factor	182

Tabla 6-6 Agrupación de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%	182
Tabla 6-7 Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias.....	183
Tabla 6-8 % Elongación para los niveles A, B, C.....	185
Tabla 6-9 Análisis de la varianza del % de elongación	187
Tabla 6-10 Resumen del modelo	188
Tabla 6-11 Medias y desviación estándar por niveles del factor	188
Tabla 6-12 Agrupación de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%	189
Tabla 6-13 Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias.....	189
Tabla 6-14 % Reducción de Área para los niveles A, B, C	192
Tabla 6-15 Estadística descriptiva del % de reducción de área	193
Tabla 6-16 Prueba de Kruskal-Wallis para el % de reducción de área.....	193
Tabla 6-17 Comparación por pares	195
Tabla A-0-1 Matriz de Consistencia	210
Tabla B-0-2 Módulos de tracción disponibles en el mercado y en proyecto (Benchmarking)..	211

Introducción

El conocimiento teórico práctico del comportamiento de los materiales bajo la acción de distintos valores de carga axial es esencial en la formación académica de los estudiantes de ingeniería mecánica. Realizar ensayos experimentales fortalece la comprensión de los fundamentos teóricos. El ensayo de tracción permite determinar experimentalmente las propiedades mecánicas del material sometiendo una probeta a incrementos de valores de carga hasta su rotura. La transición de los conocimientos teóricos a la aplicación práctica supone un gran desafío, por lo cual se requiere el uso de equipos educativos de ingeniería para una formación integral en ingeniería mecánica. El presente proyecto académico aborda este desafío proponiendo la descripción experimental del comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo, enfocado en complementar los conocimientos teóricos mediante el ensayo de tracción. Las pruebas realizadas en el módulo permiten obtener la experiencia práctica y analizar los datos registrados que describen el comportamiento mecánico. Las características principales del módulo propuesto frente a los módulos educativos comerciales disponibles son: diseño enfocado únicamente en el ensayo de tracción lo cual disminuye significativamente el costo, facilidad de operación y mantenimiento, disponibilidad de los componentes de recambio y las probetas. Adicionalmente el módulo incorpora instrumentos de medición electrónicos que permiten procesar los datos del ensayo en el computador para su análisis, así como obtener el diagrama esfuerzo – deformación que describe el comportamiento mecánico. El estudio se organiza en seis capítulos y finaliza con las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos del estudio.

Capítulo 1:

Aspectos Generales

1.1 Planteamiento del Problema

El diseño de máquinas y estructuras requiere de la comprensión del comportamiento mecánico de los materiales seleccionados para garantizar su funcionamiento (Gere & Goodno, 2016). Las propiedades mecánicas describen el comportamiento mecánico de un material, el cual se evalúa principalmente en la industria y la investigación mediante el ensayo de tracción.

Los valores de fuerza - elongación registrados en el ensayo de tracción se llevan a la forma de esfuerzo - deformación para obtener el diagrama de esfuerzo - deformación y establecer una relación proporcional entre ambos (Gere & Goodno, 2016), este diagrama permite ubicar puntos característicos como el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo ultimo de tracción y esfuerzo de fractura, que son esenciales para el diseño de componentes y estructuras de dimensiones distintas a la probeta.

Los ensayos mecánicos de materiales se realizan generalmente en máquinas de ensayo universal (UTM) las cuales son de nivel industrial, alternativamente los equipos para uso educativo de ensayos de materiales son utilizados por los estudiantes de ingeniería, estos equipos son diseñados para realizar otros ensayos adicionales al de tracción, debido a esto tienen un costo elevado además de los costos logísticos de compra. Los fabricantes ofrecen probetas de materiales específicos para sus equipos lo cual supone una dificultad para su adquisición.

Por otro lado, la aplicación de procesos de corte térmico en láminas de acero ASTM A36 es ampliamente usada en la fabricación de componentes estructurales por su alta eficiencia y precisión geométrica; sin embargo, el calor generado durante el corte afecta propiedades mecánicas como la resistencia y la ductilidad. Evaluar estos efectos en el comportamiento

mecánico es fundamental para la toma de decisiones en ingeniería.

Actualmente en el laboratorio de resistencia de materiales, no se cuenta con el equipo de ensayo de materiales para realizar los experimentos ocasionando una desconexión entre los fundamentos teóricos y la aplicación real de estos para el análisis del comportamiento mecánico de los materiales sometidos a esfuerzos de tracción.

El presente proyecto de tesis aborda este desafío con la descripción experimental del comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo. El módulo educativo proporcionara la experiencia práctica del ensayo de tracción, así como también el registro de los datos obtenidos que describen el fenómeno físico de la prueba para su posterior análisis y discusión de los resultados.

La experimentación fortalece el aprendizaje activo y contribuye a desarrollar habilidades como la indagación, registro y el análisis de datos, así como también la discusión de los resultados obtenidos contrastándolos con los fundamentos teóricos (Felder & Brent, 2016; G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 2024). Estas habilidades fortalecen el pensamiento crítico necesario en la formación de ingenieros mecánicos para afrontar y resolver futuros problemas de investigación académica y de aplicación real en ingeniería.

Para abordar el problema descrito el diseño del módulo estará enfocado específicamente en el ensayo de tracción, logrando un costo considerablemente menor a los módulos comerciales, lo que permite la incorporación de componentes electrónicos de medición para obtener los datos en tiempo real, procesarlos mediante softwares libres o de código abierto y generar el diagrama o curva de esfuerzo deformación para describir el comportamiento mecánico.

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo describir experimentalmente el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo de ensayo de tracción de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M?

1.2.2 Problemas Específicos

- a) ¿Cómo se puede documentar la información para identificar los avances y brechas en el diseño y fabricación de módulos educativos de ensayo de tracción?
- b) ¿Cuál es el proceso de diseño en ingeniería mecánica que se utiliza como marco de referencia para desarrollar el módulo educativo y obtener la documentación técnica?
- c) ¿Qué procesos se llevan a cabo para la fabricación y ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción?
- d) ¿Cuál es el estándar para realizar el ensayo de tracción y el análisis de los resultados obtenidos?
- e) ¿En qué medida la preparación de la probeta afecta la resistencia a la tracción y las propiedades de ductilidad?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Describir experimentalmente el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Sintetizar la literatura relevante sobre el comportamiento mecánico de materiales bajo carga de tracción y el desarrollo de módulos educativos de ensayo de tracción, identificando brechas tecnológicas y mejores prácticas en el ensayo de tracción.
- b) Aplicar el proceso de diseño en ingeniería mecánica siguiendo la directriz VDI 2221/2019 para obtener la documentación técnica del módulo educativo de ensayo de tracción.
- c) Fabricar y ensamblar el módulo educativo de ensayo de tracción, asegurando el costo efectivo y la integración del sistema de adquisición de datos.
- d) Realizar el ensayo experimental de tracción del acero ASTM A36 de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M y la estadística de precisión para validar los resultados y evaluar la precisión del módulo educativo.
- e) Evaluar el efecto de la preparación de la probeta en la resistencia a la tracción y las propiedades de ductilidad mediante el análisis de la varianza.

1.4 Justificación de la Investigación

El estudio del comportamiento mecánico de los materiales es fundamental para que el diseño de componentes y estructuras sean seguros, confiables y económicos; también es importante para seleccionar eficazmente los materiales y asegurar que no ocurra la falla (Huda, 2022); por estas razones se requiere un estudio integral teórico - práctico de las propiedades mecánicas, tipos de carga y las relaciones de esfuerzo - deformación para realizar cálculos de ingeniería siendo el ensayo de tracción es uno de los principales ensayos mecánicos para estudiar la deformación y fractura de los materiales.

El ensayo de tracción es de gran importancia en diferentes ámbitos como el académico, industrial y de investigación. A continuación, se describe la importancia en cada uno de ellos.

En el ámbito de formación académica el ensayo de tracción es fundamental para los estudiantes de ingeniería mecánica porque permite entender las propiedades mecánicas y el comportamiento mecánico mediante la experiencia de aprendizaje activo (*active - learning*), en la cual se realiza la observación, registro y el análisis de datos fortaleciendo el pensamiento crítico para resolver problemas de ingeniería con destreza. De igual forma este método de enseñanza, permite a los estudiantes participar directamente en el proceso de aprendizaje con la discusión de los resultados obtenidos (Felder & Brent, 2016; G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 2024).

En el ámbito industrial el ensayo de tracción permite la selección de materiales por los ingenieros, para brindar información básica de diseño, el control de calidad en la producción y la especificación de los materiales mediante sus propiedades mecánicas (Hosford, 2010). Como resultado se garantiza que los diseños de componentes y estructuras sean seguros y fiables.

En el ámbito de la investigación se utiliza para el desarrollo de nuevos materiales y la optimización de los ya existentes, caracterizando sus propiedades mecánicas y logrando tener una aplicación determinada en la industria (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024).

La ingeniería es una profesión fundamentalmente empírica es decir se basa en la experiencia práctica, esto implica que el conocimiento surge a partir de la observación y medición directa de los fenómenos para su comprensión y el desarrollo del pensamiento científico. La medición es el fundamento del empirismo, funciona como un medio que permite organizar, diferenciar y comparar fenómenos estableciendo escalas y valores, es decir la recopilación de datos transforma la observación en información para el análisis (Middleton, 2021).

La integración de instrumentos de medición electrónicos en el módulo permite el recolectar y transferir los datos al computador para su procesamiento y análisis, lo cual se ajusta a las practicas actuales de ingeniería, familiarizando a los estudiantes como un primer paso al uso de equipos de grado industrial.

1.5 Formulación de la Hipótesis

El módulo educativo de ensayo de tracción, desarrollado con componentes asequibles y software de código abierto, generará eficazmente curvas de esfuerzo-deformación para demostrar el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una fuerza de tracción uniaxial, sirviendo como alternativa viable, práctica y económica a los equipos comerciales existentes.

1.6 Alcances y Limitaciones

1.6.1 Alcances:

- La probeta seleccionada será la de tipo lámina (*sheet-type*) con extremos de pasador (*pin-loaded*) (ASTM International, 2024, p. 8)
- La capacidad o la fuerza máxima de operación que el módulo pueda proporcionar es 1.5 veces mayor a la fuerza de máxima de tracción.
- El módulo estará equipado con instrumentos de medición electrónicos para registrar los datos de fuerza y desplazamiento durante el ensayo. Los datos obtenidos se podrán transferir al computador para su procesamiento.
- El procesamiento y monitoreo de los datos se realizará utilizando software libre o de código abierto (*open source*)
- De acuerdo al estándar ASTM E8/E8M se sigue con lo especificado para obtener la resistencia ultima a la tracción, % de elongación después de la fractura y el % de reducción de área.

- El diseño de los componentes se realizará con el criterio de rigidez (Hall et al., 1961, p. 37) para asegurar que las deflexiones generadas durante el ensayo de tracción no incrementen considerablemente las mediciones de la elongación.

1.6.2 Limitaciones:

- El módulo será diseñado con un enfoque educativo, centrado en describir y mostrar el comportamiento mecánico mediante el ensayo de tracción y lograr un coste económico.
- No se realizará la medición y el cálculo de parámetros que sean obtenidos de la utilización del extensómetro especificado estrictamente por el estándar ASTM E8/E8M.
- El procesamiento de datos estará limitado por las funcionalidades del hardware y el software libre o de código abierto empleado.

1.7 Diseño Metodológico

El presente proyecto de investigación se define como un estudio de carácter tecnológico y experimental. Su propósito fundamental es resolver un problema real mediante el diseño y la fabricación de un producto o prototipo, aplicando el método de ingeniería descrito por Montgomery & Runger, p. (2018, p. 2), dado que este proceso integra la creación de la solución práctica con la ejecución controlada de una fase experimental enfocada en la comparación de grupos mediante prueba de hipótesis.

El alcance de la investigación es descriptivo, se enfoca en describir el fenómeno, características y las condiciones presentes en esta investigación puesto que se describe el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 experimentalmente. Es explicativo, se centra en

explicar la causa de un fenómeno y las condiciones en las que se presenta (Hernández Sampieri et al., 2014).

El enfoque de la presente tesis es cuantitativo experimental, dado que se realiza el análisis estadístico de los resultados obtenidos experimentalmente y con el cual se evalúa la hipótesis. El proceso es deductivo, secuencial, probatorio y se analiza objetivamente la realidad (Hernández Sampieri et al., 2014).

La metodología para desarrollar el módulo educativo de tracción sigue un método de diseño en ingeniería. El método de diseño es similar al método científico sin embargo difiere en el enfoque del punto de partida y la filosofía al abordar un problema, mientras el método científico parte de una curiosidad científica el método de diseño parte de una necesidad de la sociedad (Dieter & Schmidt, 2012, p. 23).

La metodología de resolución de problemas (*problem-solving*) en el proceso de diseño en ingeniería mecánica, consiste de una serie de etapas estructuradas y con una secuencia lógica para resolver o satisfacer un problema o necesidad, adicionalmente permite comparar los resultados de cada etapa completada lo que conduce a un proceso con un enfoque metodológico e iterativo para generar la mejor solución.

El método para el experimento se realiza de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M (ASTM International, 2024). El desarrollo del módulo educativo se realizará de acuerdo a la directriz VDI 2221/19 “Desarrollo de productos y sistemas técnicos” para el proceso de diseño en ingeniería mecánica.

Capítulo 2:

Revisión De La Literatura

El objetivo de este capítulo es explorar investigaciones académicas recientes relacionadas con el presente proyecto de tesis. También se revisan libros, estándares y otros documentos para establecer el contexto y los fundamentos del estudio. El capítulo se organiza en tres subsecciones que comprenden los antecedentes, el estado del arte y el marco teórico.

La metodología de búsqueda de información se realizó de forma estructurada y se describe a continuación:

Se realizó la búsqueda de información para el estado del arte en bases de datos especializadas, como: IEEE Xplore, ScienceDirect, Web of Science, SpringerLink, ResearchGate, MDPI, Semantic Scholar, ElSevier, Google scholar. Para optimizar la búsqueda, se utilizaron palabras clave en español e inglés como: *comportamiento mecánico, mechanical behavior, tensile testing, tensile testing machine, tensometer, ensayo de tracción, máquina de ensayo de tracción, educational, didactic, design, educativo construction, diseño y fabricación*.

Para la selección de trabajos académicos, se utilizaron criterios para filtrar la información de acuerdo a su relevancia del tema de estudio, calidad académica y fecha de publicación. En cuanto a los módulos educativos de ensayo de tracción comerciales, los criterios de selección han sido el prestigio del fabricante, su presencia en el mercado y la calidad de sus productos.

El proceso de análisis y síntesis de la información se realiza para identificar brechas tecnológicas en los trabajos académicos y los módulos educativos. Esto implica realizar una descripción sintetizada de cada uno, que permita identificar los vacíos académicos y tecnológicos de la información presentada, lo que garantiza que la tesis se basa en información existente y actualizada. Finalmente, se organizó la información analizada en una matriz comparativa

(benchmarking) con las características más importantes, con el fin de presentar la información de forma clara y eficiente.

2.1 Antecedentes

El ensayo de tracción proporciona información del comportamiento mecánico de una muestra del material de ensayo sometido a una fuerza de tracción. Esta información puede variar leve o significativamente por diferentes factores, generalmente por la geometría, preparación de la probeta, la velocidad de deformación “*strain rate*” entre otros (ASTM International, 2024).

El estudio realizado por Abichou et al. (2024) del acero de bajo carbono demostró que reducir el espesor de las probetas de 2,5 a 0,4 mm aumentaba ligeramente la resistencia a la fluencia y la resistencia última a la tracción, pero disminuía significativamente la elongación uniforme y la elongación en la fractura. Para las probetas proporcionales, el modo de fractura resultó ser plano e independiente del tamaño de la probeta. Excepto en las de 0,4 mm, que mostraban el efecto Portevin-Le Chatelier, todas las curvas de esfuerzo-deformación presentaban un comportamiento dúctil con endurecimiento por deformación saturado y una anisotropía débil.

Un análisis de más de 1050 registros de ensayos de tracción obtenidos de artículos revisados por pares, en el que se utilizaron modelos de machine learning para la predicción puntual de propiedades de tracción, identificó que los efectos de tamaño en probetas miniatura "sub-sized" más relevantes eran el tratamiento térmico de la probeta y la temperatura de ensayo, seguidos de las dimensiones de la probeta, la geometría y el tamaño del grano. El estudio destaca que, para el acero inoxidable 316, se recomienda un espesor crítico de la muestra de 0,2 mm, diferente del valor comúnmente citado de 0,12 mm (Li et al., 2025).

La preparación de la probeta por métodos alternativos al estándar, como el corte láser y plasma, muestra una ligera variación en la curva esfuerzo-deformación. El corte plasma presenta

una zona de fluencia más amplia que el corte láser. Por otro lado, la deformación unitaria es inferior en la probeta de corte plasma y la resistencia a la tracción es superior en el corte láser, aun cuando el endurecimiento generado por el corte plasma fue mayor que el del corte láser (Írsel & Güzey, 2021).

Miraoui et al. (2016) descubrió que el microendurecimiento aumenta proporcionalmente al incremento de la potencia del láser, y que el incremento de la velocidad de corte y del diámetro del láser producen el mismo efecto. En los tres casos, el microendurecimiento a partir de 0,5 mm es constante para la probeta de 8 mm de espesor.

2.2 Estado del Arte

Esta sección tiene como objetivo presentar el estado actual de la tecnología con respecto al diseño y fabricación de módulos educativos de ensayo de tracción. A continuación, se describen las fuentes más relevantes, que incluyen trabajos académicos como tesis y artículos científicos, así como catálogos con las principales características de máquinas comerciales. Estas fuentes de información ayudarán a analizar, comprender e identificar las brechas y oportunidades en la tecnología actual.

2.2.1 Trabajos Académicos

Los trabajos académicos que se presentan a continuación comprenden tesis de grado, trabajos de postgrado y artículos de investigación.

2.2.1.1 Desarrollo, Validación e Implementación de una Máquina de Ensayo Universal

(Jose Mathew & Francis, 2020).

En la tesis de maestría desarrollada por Jose Mathew & Francis (2020), de la carrera profesional de Ingeniería Mecánica de La Universidad de Jönköping, su objetivo principal es diseñar y manufacturar una máquina de ensayo universal con una carga máxima de 10 kN para

materiales polímeros, tiene como características ser económico, modular y utiliza software de código abierto para su desarrollo. Permite obtener las propiedades mecánicas del material como resistencia a la tracción, límite elástico y módulo elástico, Incluye el procesamiento de imágenes en tiempo real mediante una cámara de alta resolución para medir la deformación en lugar del uso del extensómetro, logrando trazar la curva esfuerzo deformación. Se incluye un código *open-source* desarrollado en la interfaz de MATLAB. Se realizó la validación de esta máquina comparando los resultados obtenidos con pruebas desarrolladas en una máquina de ensayo universal tipo estándar y se encontró que los valores de módulo eran cercanos en ambas máquinas con una variación relativa del 2%, se recomienda utilizar muestras de prueba de naturaleza isotrópica para obtener valores confiables. Sin embargo, los autores no describen completamente el proceso de diseño mecánico de la máquina y selección de componentes, siendo una desventaja para los todos aquellos que buscan una información técnica más detallada.

2.2.1.2 Diseño e Implementación de un Equipo de Ensayos de Código Abierto Para la Enseñanza y la Investigación en Ingeniería (Liu, 2021).

La tesis desarrollada por Liu (2021) para obtener el título de master en ciencia aplicada de la Universidad de Toronto, tiene como objetivo principal diseñar e implementar un equipo de pruebas de código abierto como herramienta de laboratorio y aprendizaje, esta tesis presenta dos equipos, el kit de pruebas mecánicas universales (UMTK) con una capacidad de 1.5 kN y un costo de \$ 525 y el segundo equipo es el kit de pruebas mecánicas en miniatura (MMTK) con una capacidad de 0.5 kN y un costo de \$ 202. Esta tesis hace énfasis y detalla el código abierto del firmware de la placa Arduino y del software para obtener la gráfica esfuerzo-deformación, sin embargo, tiene una capacidad pequeña para ambos equipos por lo que es utilizado para realizar pruebas con muestras de PLA fabricadas en impresión 3D.

2.2.1.3 Diseño y Construcción de una Máquina Didáctica Para Realizar Ensayos de Tracción de Metales en el Laboratorio de Materiales EPIMMEM – UCSM (Ortiz Gómez & Rosas Basurco, 2021).

Esta tesis fue desarrollada por Ortiz Gómez & Rosas Basurco (2021), en la Carrera Profesional de Ingeniería Mecánica de la Universidad Católica de Santa María, teniendo como objetivo diseñar y fabricar una máquina didáctica para ensayos de tracción con una fuerza de diseño de 12.5 Ton. La máquina desarrollada realiza la tracción con accionamiento tipo hidráulico con una presión máxima de 3000 psi, esta máquina garantiza la correcta ejecución de ensayos de tracción para probetas de 0.5 in de diámetro bajo la norma E8/E8M, el costo final del proyecto fue de 20 704 nuevos soles. Sin embargo, el desarrollo de esta máquina obtiene únicamente datos finales de esfuerzo máximo, carga máxima, longitud y diámetro ya que no cuenta con sensores de carga y desplazamiento, lo cual viene a ser un inconveniente si se desea obtener el diagrama esfuerzo-deformación para una mayor comprensión del ensayo.

2.2.1.4 Desarrollo de Una Máquina de Tracción de Probetas de PLA (Soriano Gonzáles, 2021).

La tesis desarrollada por Soriano Gonzáles (2021), en la Universidad Politécnica de Madrid. Tiene como objetivo el desarrollo de una máquina de ensayo de tracción para probetas de PLA de bajo coste, siguiendo la Norma ISO 5893 para la máquina, además se desarrolló diferentes tipos de diseño para los sistemas de sujeción de la muestra. Esta tesis muestra y describe el diseño del circuito con la programación de código mediante Arduino para el sistema de control y de esta manera mostrar en la interfaz gráfica el resultado del experimento. Finalmente se detalla el ensamblaje de la máquina con los diferentes componentes mecánicos y electrónicos. Los resultados obtenidos se muestran a través del software Excel. Su desventaja principal de este

diseño es que se presentan inconvenientes en el diseño del sistema de sujeción dado que, al ser hechos de PLA tienen una vida útil corta y causan deformaciones que ocasionan resultados inexactos.

2.2.1.5 Diseño y Construcción del Sistema Mecánico de Una Máquina de Tracción Para Materiales Blandos (Galindo Suarez & Montoya Alvarez, 2021).

Esta tesis presentada por (Galindo Suarez & Montoya Alvarez, 2021), en la facultad de Ingeniería Mecánica de la universidad de Santo Tomas, siendo su objetivo general el diseño y construcción de una máquina de ensayos de tracción para materiales poliméricos, se detalla un accionamiento mecánico con una moto reductor y variador de frecuencia para una capacidad máxima de 5 TON, el autor utilizó la norma NTC 595 para realizar el ensayo de tracción. Se muestra el diseño y selección de componentes como las sujeciones, vigas para la estructura y tornillos de potencia, seguidamente se describe el proceso de construcción a detalle de la máquina, sin embargo, no muestra el experimento de la prueba en la máquina.

2.2.1.6 Diseño e Implementación de Una Máquina de Ensayo de Tracción (Fábián & Gergely, 2020).

El artículo desarrollado por Fábián & Gergely (2020), en la SAPIENTIA Universidad Húngara de Transilvania, presenta el diseño y fabricación de una máquina de ensayo de tracción para medir la resistencia a la tracción de materiales tipo polímeros, esta máquina está constituida por un marco y dos tornillos impulsados por dos motores de paso, también incluye un Arduino para el sistema de control conectado a un software. Esta máquina fue desarrollada para poder ser utilizada como instrumento de laboratorio para materiales poliméricos con una capacidad de 6500 N. Sin embargo, este artículo presenta el diseño de forma parcial debido al formato compacto de los artículos científicos, no se detalla el cálculo de la estructura de la máquina y los componentes

para su ensamblaje, lo que viene a ser una desventaja para comprender de manera técnica y precisa el diseño completo.

2.2.1.7 Desarrollo de Una Máquina de Ensayo Universal (UTM) Portátil Para Investigar las Propiedades Mecánicas de Materiales de Resistencia Media (Rizal et al., 2023)

Este artículo elaborado por Rizal et al. (2023), en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Syiah Kuala (USK), tiene por objetivo desarrollar una máquina de ensayo universal confiable para investigar las características mecánicas de materiales de resistencia media, la máquina es de tipo vertical, incluye dos motores de paso, dos tornillos de potencia para transmitir la carga a la probeta, un sensor de carga, un potenciómetro lineal y un sistema para la adquisición de datos, tiene una capacidad de carga de hasta 10 kN con una carrera de 150 mm. Muestra las gráficas de los resultados obtenidos en la máquina desarrollada y la máquina comercial UTM, el error absoluto entre ambos resultados se encuentra en el rango de 1.5% a 10%. Este diseño solo es aplicable para realizar ensayo con probetas delegadas donde se puede obtener cargas y desplazamientos muy pequeños.

2.2.1.8 Implementación de Diseño y desarrollo de Máquina de Ensayo de Tracción Para Aplicación en Material Blando (Baharuddin & Yani I., 2018).

El artículo elaborado por Baharuddin & Yani I. (2018) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Sriwijaya (Indonesia), tiene como objetivo el diseño y desarrollo de una máquina de ensayo de tracción para materiales blandos y en consecuencia encontrar sus propiedades mecánicas como la resistencia a la fluencia, la elongación, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad. La máquina esta implementada con un servomotor de 100 W que acciona un tornillo de potencia con una faja, la fuerza de tracción es de 5 kN para una probeta con un área de sección transversal de 6 mm^2 para probetas de cobre y aluminio. Este artículo aborda

con mayor detalle el análisis de los componentes de este equipo entre ellos el pasador de la muestra, la sujeción y el soporte de la sujeción de manera que estos componentes sean seguros de utilizar, se utilizó el método de elementos finitos FEA mediante software aplicado para probetas de aluminio y cobre.

2.2.2 Módulos Educativos Comerciales

2.2.2.1 GUNT - WP 300 Ensayo de Materiales 20 kN

Este módulo es un equipo educativo para ingeniería desarrollado por la compañía Gunt Hamburgo, presenta un equipo compacto y sencillo, que permite realizar pruebas destructivas básicas de tracción, compresión, dureza Brinell y flexión, también incluye kits o juegos de probetas y accesorios adicionales por separado (ver **Figura 2-1**).

Figura 2-1

GUNT WP 300 Ensayo de Materiales 20 kN



Nota. Obtenido de (GUNT Hamburg, 2024).

Sus especificaciones son: accionamiento hidráulico manual, capacidad de 20 kN, incluye medidores de fuerza y elongación. Utiliza el sistema WP 300.20 para la adquisición de datos que pueden ser transferidos a una PC para su análisis (GUNT Hamburg, 2024).

2.2.2.2 PASCO - (ME-8236) Sistema Integral de Ensayos de Pruebas

Este producto desarrollado por la compañía Pasco, permite realizar ensayos de tracción, compresión, pandeo de columnas y flexión de tres y cuatro puntos, tiene una capacidad de hasta 7100 N. Sus características son: el sistema de accionamiento es manual mediante una manivela para transmitir el movimiento a dos tornillos de potencia, incluye un sensor de carga que mide hasta 7100 N y una cámara para medir el desplazamiento (ver **Figura 2-2**). Los datos de fuerza y desplazamiento pueden ser registrados y analizados mediante el software (PASCO, 2024) PASCO Capstone, asimismo se muestra en interfaz gráfica, cuenta con dos orificios pasantes en la base para poder ser asegurado a la mesa mediante pernos.

Figura 2-2

Sistema integral de ensayo de materiales modelo ME-8244



Nota. Fuente PASCO (2024)

2.2.2.3 MATEST (HO17) Máquina Universal Educativa de Ensayos 20 kN

Este producto ha sido desarrollado por la compañía MATEST para propósitos educativos, tiene una capacidad máxima de 20 kN, fue diseñada para realizar pruebas de tracción, compresión, cizallamiento, flexión y dureza Brinell. Sus especificaciones son: incluye un manómetro de 30 kN, transductor de presión de 250 bar, transductor digital de desplazamiento de 50 mm y un indicador digital de ocho canales. Cuenta con un peso de 60 Kg y dimensiones de 600 × 600 × 850 mm (MATEST, 2024). En la Figura 2-3, se observa que tiene un diseño similar al módulo educativo ofrecido por GUNT Figura 2-1.

Figura 2-3

MATEST (HO17) Máquina Universal Educativa De Ensayos de 20 kN



Nota. Fuente (MATEST, 2024)

2.2.2.4 PA HILTON - (HSM58) Máquina Universal de 35 kN

Este módulo educativo desarrollado por PA HILTON tiene un peso de 51 Kg y dimensiones de 250 × 630 × 800 mm con un costo de S/ 115,000.00 soles para el ensayo de tracción, corte y

dureza por el método de Brinell este módulo de código de producto HSM58 se muestra compacto y seguro para realizar pruebas de tracción, compresión, corte y dureza debido a que cuenta con una cubierta transparente de seguridad. Sus especificaciones son: capacidad máxima de 35 kN, un extensómetro digital preciso de 3 decimales, una interfaz electrónica para la adquisición de datos con una pantalla LCD y un software de adquisición de datos (PA Hilton, 2024). El fabricante resalta entre sus especificaciones que los accesorios de fijación y demás componentes están diseñados con factor de seguridad de 2.5. Los experimentos que se pueden realizar son el módulo de Young, ley de Hooke, coeficiente de Poisson, módulo de corte, y medición de la dureza método Brinell (PA Hilton, 2024). En la **Figura 2-4** se presenta la imagen del módulo con una protección de seguridad alrededor que la distingue fácilmente de los demás fabricantes.

Figura 2-4

PA HILTON - (HSM58) Máquina Universal De 35 kN



Nota. Fuente (PA Hilton, 2024)

2.2.2.5 TECQUIPMENT – (SM1002) Máquina de Ensayo de Tracción de Sobremesa de 20 kN

La máquina de sobremesa desarrollada por la marca TECQUIPMENT para uso educativo permite realizar ensayos de tracción de probetas metálicas, con una capacidad máxima de 20 kN. Sus especificaciones son las siguientes: el accionamiento para la carga es manual mediante engranajes, la carga se mide mediante una célula de carga conectada a una pantalla digital controlada por un microprocesador, un extensómetro de precisión opcional para medir el módulo de Young del material, incluye pinzas de sujeción, tiene como dimensiones 1100 mm x 350 mm x 400 mm y un peso de 41.5 Kg (TECQUIPMENT, 2024). La característica distintiva del módulo presentado por Tecquipment es su disposición horizontal (ver **Figura 2-5**).

Figura 2-5

TECQUIPMENT – (SM1002) Máquina De Ensayo De Tracción De Sobremesa De 20 kN



Nota. Fuente (TECQUIPMENT, 2024)

Al realizar la revisión de los trabajos académicos se observó que la mayoría tiene por título “diseñar y construir una máquina”, es decir, una máquina que busca obtener datos confiables de la prueba. Sin embargo, presentan variaciones significativas en los resultados comparado a máquinas

estandarizadas. En algunos casos no realizan la validación de los resultados, por consiguiente, no ofrecen resultados fiables para llevar a cabo investigaciones, la ASTM exige una precisión del 1% de la carga indicada por encima del 10% de cada rango de escala (Davis, 2004). Uno de los proyectos académicos con enfoque didáctico es de gran capacidad; sin embargo, no cuenta con dispositivos para medir fuerza y elongación, por lo tanto, no registra datos durante la prueba, únicamente se obtienen datos finales de alargamiento, resistencia a la rotura y área de sección transversal y en consecuencia no se obtiene la curva esfuerzo – deformación.

Respecto a los módulos educativos comerciales, estos ofrecen múltiples ensayos como: tracción, compresión, flexión, dureza, pandeo y otros debido a esto, presentan un elevado costo de adquisición y complejidad para operarlos, asimismo las probetas son provistas únicamente por los fabricantes, lo cual supone una dificultad logística (ver **Tabla B-0-2** **Tabla B-0-2** Módulos de tracción disponibles en el mercado y en proyecto (Benchmarking)).

Estas brechas y desafíos encontrados en el estado de la tecnología son abordados con el presente proyecto, realizando el diseño y fabricación de un módulo educativo para ensayos de tracción con un balance de costo y funcionalidad dado que el módulo podrá ser fabricado y ensamblado en la región del Cusco, con un diseño confiable y que brinde un valor educativo alineado a los avances tecnológicos.

2.3 Marco Teórico

En esta parte de la tesis se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales con el fin de obtener las herramientas académicas necesarias que hacen posible el desarrollo del trabajo de tesis de ingeniería mecánica. Del título de la tesis se identifican términos individuales como comportamiento mecánico, acero ASTM A36, ensayo de tracción, diseño, fabricación, módulo

educativo; los cuales permiten estructurar el marco teórico en: comportamiento mecánico, ensayo de tracción, ASTM A36, diseño en ingeniería y procesos de manufactura.

Para desarrollar la presente sección se realiza la búsqueda de información específicamente en libros que aborden los términos mencionados anteriormente. Se hace la búsqueda de libros enfocados en ingeniería mecánica, de materiales y manufactura. Luego de revisar la información y contrastar entre distintos libros y autores que aborden un mismo tema, se analiza la información y se presenta una síntesis de los fundamentos teóricos y conceptuales.

2.3.1 *Comportamiento Mecánico y Propiedades Mecánicas Principales*

2.3.1.1 Comportamiento Mecánico.

El comportamiento mecánico es una parte importante de la ingeniería que estudia la relación entre las cargas actuantes sobre un cuerpo sólido y las fuerzas y deformaciones internas producto de dicha acción, el comportamiento mecánico se describe mediante las propiedades mecánicas del material. Este estudio solo considera fuerzas superficiales como tracción y presión y no del cuerpo porque no deforman significativamente los materiales. Para analizar el comportamiento mecánico del cuerpo sólido, se considera continuo, homogéneo e isotrópico (González-Velázquez, 2019).

2.3.1.2 Propiedades Mecánicas.

Las propiedades mecánicas son aquellas propiedades físicas que describen el comportamiento mecánico cuando un material está sometido a cargas mecánicas, generalmente estas propiedades se expresan en función del esfuerzo, deformación o ambas. Entre las propiedades mecánicas principales están: la resistencia, rigidez, elasticidad, plasticidad, capacidad energética y dureza. A continuación, se describe cada una de ellas (Horath, 2019).

Resistencia: La resistencia es la capacidad de un material para resistir la fuerza aplicada antes de producir una falla, la falla puede considerarse una ruptura, una deformación excesiva o cuando el material deja de ser elástico. La resistencia se determina a partir del esfuerzo, existen varios tipos de resistencia de acuerdo al tipo de carga (Horath, 2019).

Rigidez: La rigidez se entiende como la resistencia que ofrece un material a la deformación debido a una carga mientras esta se encuentre en la zona elástica, se determina mediante el módulo de elasticidad (Horath, 2019)

Elasticidad: La elasticidad es la capacidad de un material para deformarse y no sufrir una deformación permanente después de liberar la carga (Horath, 2019).

Plasticidad: La plasticidad se refiere a la capacidad que tiene un material para deformarse después del rango elástico hasta antes de la ruptura (Horath, 2019).

Capacidad energética: Es la capacidad de un material para absorber energía, se expresa mediante la resiliencia y la tenacidad (Horath, 2019).

Dureza: La dureza es la resistencia de un material a la rayadura, indentación o abrasión, es considerado también como un indicador de la resistencia de un material (Horath, 2019).

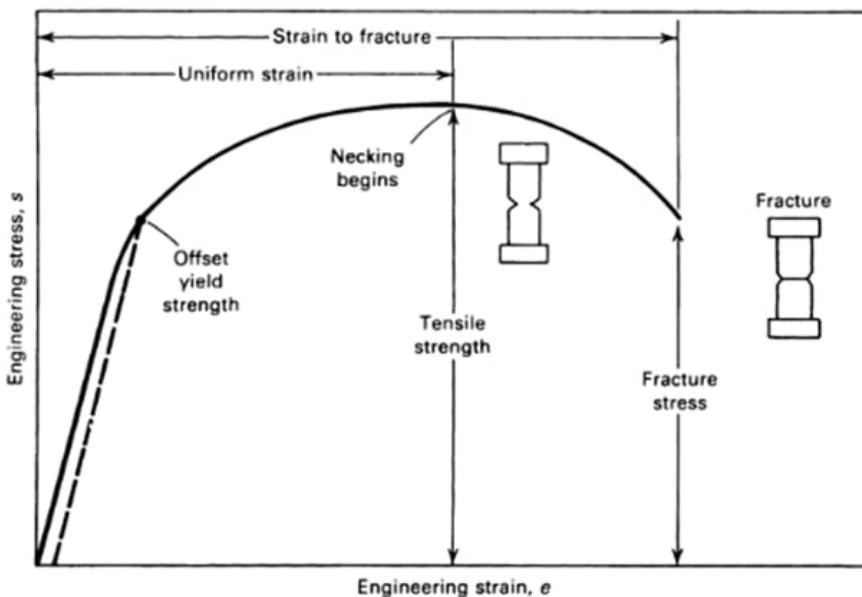
2.3.2 Ensayo de Tracción

El ensayo de tracción es un método de prueba fundamental, universal y el más importante para describir, evaluar y entender el comportamiento mecánico de los materiales (Czichos et al., 2011; Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024). El ensayo de tracción consiste en estirar lentamente una probeta mediante una fuerza uniaxial hasta que se produzca la ruptura, durante la prueba se miden y se registran los datos de fuerza con respecto a la elongación, estos datos se utilizarán para trazar la curva esfuerzo deformación (González-Velázquez, 2019). En la **Figura 2-6** se presenta el estado de la probeta antes de aplicar la carga y en el momento de aplicar la máxima carga durante el

ensayo de tracción.

Figura 2-6

Probeta durante el ensayo de tracción.



Nota. Tomado de (Davis, 2004, p. 14).

Mediante este ensayo se determinan las propiedades mecánicas de tracción más importantes de materiales de ingeniería como: módulo de elasticidad (E), relación de Poisson, resistencia a la fluencia, resistencia última a la tracción, ductilidad, resiliencia y tenacidad (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024).

El ensayo de tracción es considerado un ensayo de tipo cuasiestático o simplemente estático de acuerdo a su velocidad de carga (Czichos et al., 2011). Durante un ensayo de tracción los efectos de inercia y propagación de ondas son menos perceptibles debido a las velocidades bajas de deformación (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024).

El estándar ASTM E8/E8M (ASTM International, 2024), establece que los ensayos de tracción proporcionan información sobre la resistencia y la ductilidad de los materiales sometidos a esfuerzos de tracción uniaxiales. Esta información es útil para comparar materiales, desarrollar

nuevas aleaciones, diseñar en casos determinados y en el control de calidad, por ejemplo, en la aceptación de envíos comerciales.

2.3.2.1 Historia

El desarrollo de las máquinas para realizar pruebas de tracción se remonta a la época antigua en las diferentes civilizaciones, con desarrollos empíricos y simples de prueba y error hasta equipos modernos computarizados en la actualidad.

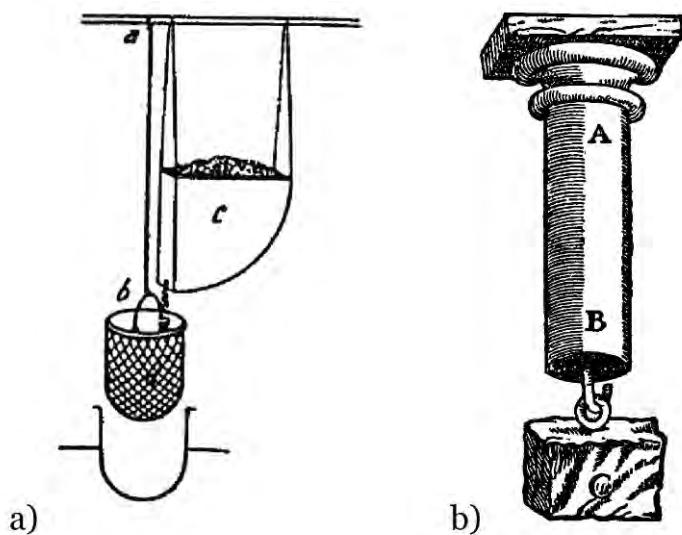
El primer documento escrito que describe el experimento de una prueba de tracción es el de Leonardo Da Vinci (1452 - 1519), el experimento titulado “Prueba de la resistencia de los alambres de hierro de varias longitudes”, el experimento (ver **Figura 2-7-a**) muestra un bosquejo con apuntes, donde se observa el alambre de prueba, la canasta en el que se deja caer la arena (b) y el recipiente que contiene la arena (c), tiene como principio aplicar la carga dejando caer arena del recipiente (c) en una canasta (b), suspendida del alambre (a) hasta lograr la ruptura de este (Tóth & Rossmanith, 1999).

Da Vinci registro experimentalmente la carga de falla para alambres de diferentes longitudes y observo que los alambres más largos eran menos resistentes que los más cortos, sin embargo, no pudo explicarlo con los conceptos de mecánica de materiales que en ese entonces no había (Sharpe, 2008).

En 1638 Galileo Galilei (1564 - 1641) en su libro titulado “Discurso y Demostraciones Matemáticas en torno a dos nuevas Ciencias” afirmó que: “la resistencia de una barra en tracción era proporcional al área de la sección transversal e independiente de la longitud” (Galilei, 1648). En la **Figura 2-7-b**, se muestra el experimento realizado por Galileo Galilei, una barra fijada en un extremo y con un peso que genera una carga axial en un extremo.

Figura 2-7

a) Experimento de Da Vinci, b) Barra cilíndrica de madera

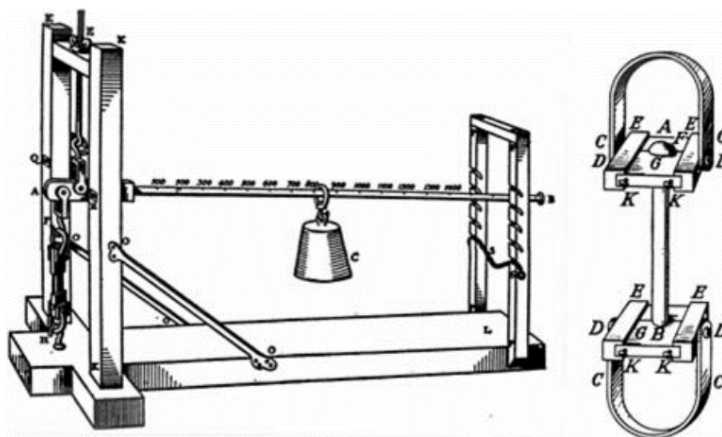


Nota. Imagen recuperada de (Galilei, 1648; Sharpe, 2008).

En 1729 se publicó el diseño de Pieter van Musschenbroek (1692 - 1761), una máquina de ensayo de tracción que consistía en utilizar una palanca como amplificador de la aplicación de la fuerza (Hosford, 2010).

Figura 2-8

Máquina de ensayo de tracción desarrollada por Musschenbroek



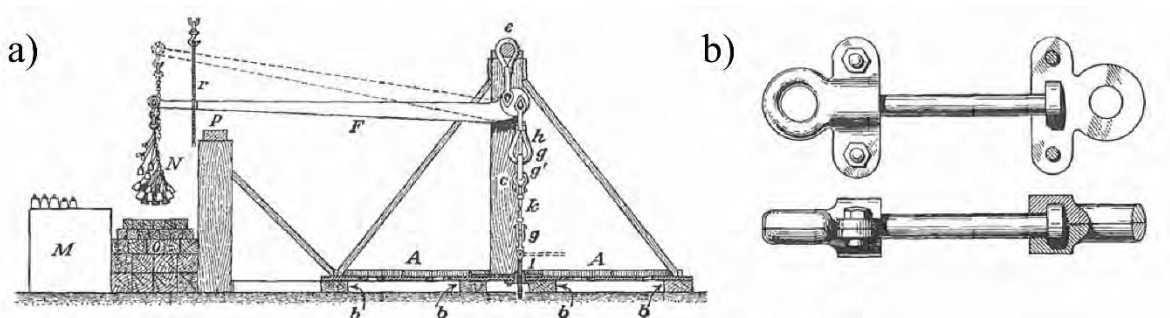
Nota. Imagen tomada de (Hosford, 2010).

Con esta máquina Pieter van Musschenbroek desarrollo el primer concepto de la prueba de tracción sentando las bases para los ensayos de tracción modernos. En la **Figura 2-8**, se presenta la máquina con una palanca donde se puede regular la carga aplicada a la probeta y las sujeciones de la probeta en la parte derecha.

En 1858 en Inglaterra David Kirkaldy comenzó pruebas con un aparato que construyo para la prueba de materiales que recientemente se habían introducido en la fabricación de calderas de alta presión y maquinaria marina. En la **Figura 2-9** se observa la maquina construida por Kirkaldy en conjunto a la probeta y sus accesorios.

Figura 2-9

Máquina de ensayo de Kirkaldy



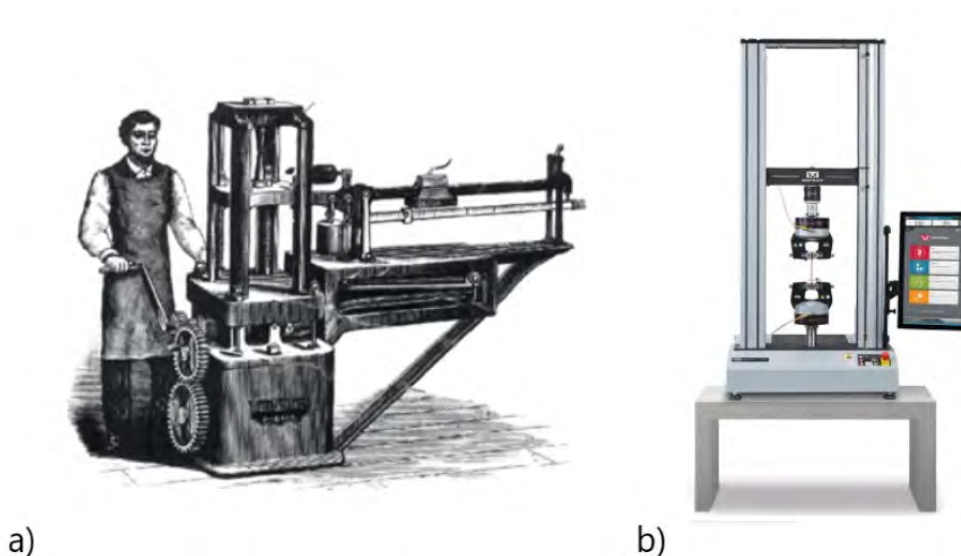
Nota: a) máquina de ensayo, b) probeta con fijaciones. (Timoshenko, 1953).

Con este aparato Kirkaldy logro obtener resultados muy importantes y en su momento su libro publicado contenía la descripción más completa de la época acerca de las propiedades mecánicas del hierro y del acero. Kirkaldy demostró que la muestra se estiraba uniformemente y mantenía su forma cilíndrica en la mayor parte de su longitud y por otro lado solo las zonas cercanas a la fractura mostraban mayor deformación con una gran contracción de la sección transversal, concluyendo que el alargamiento total y la longitud inicial dependía de la proporción de la muestra. También reconoció el efecto de formas de las muestras de material en la resistencia máxima del material (Timoshenko, 1953, p. 277).

En 1890 se le concedió una patente a Tinius Olsen (1845 - 1933), sobre el desarrollo de una máquina de pruebas de tracción para placas de caldera con capacidad de 180 kN (40) conocida como “Little Giant” o “El pequeño gigante” en español, el accionamiento por medio de una manivela (ver Figura 2-10-a). Esta fue la primera máquina autográfica para obtener la curva esfuerzo – deformación, en otras palabras, era la primera máquina que podía obtener la gráfica esfuerzo – deformación durante la prueba (Davis, 2004; Tinius Olsen Testing Machine Company, 2022).

Figura 2-10

a) “Little Giant” Tinius Olsen, b) UTM Instron actual



Nota. Imágenes obtenidas de (Instron Industrial Machinery Manufacturing, 2024; Tinius Olsen Testing Machine Company, 2022)

En 1946 la compañía fabricante de equipos de prueba (Instron), integró y desarrolló dispositivos electrónicos para el control de la máquina, la medición de la carga y el desplazamiento. Los primeros desarrollos fueron con tecnología de tubos de vacío. En la actualidad se basan en circuitos digitales modernos (ver Figura 2-10-b) (Dowling et al., 2019).

2.3.2.2 Máquinas de Ensayo de Tracción

La máquina de ensayos es aquella máquina diseñada para poder aplicar una fuerza a una muestra de prueba o probeta, se utiliza para poder evaluar las propiedades mecánicas de los materiales. La más conocida y de mayor uso es la máquina universal de ensayos (UTM), esta máquina es la más versátil capaz de realizar ensayos de tracción, compresión y flexión utilizando diferentes accesorios. Esta máquina mide y registra datos de fuerza y desplazamiento (Davis, 2004).

Durante el ensayo de tracción la máquina impulsa un cabezal móvil con una velocidad controlada, de esta manera se aplica una carga de tracción uniaxial sobre la muestra de prueba estirándola hasta lograr la falla (Davis, 2004). Las máquinas de tracción generalmente se distinguen por el tipo de accionamiento de la carga, existen dos tipos:

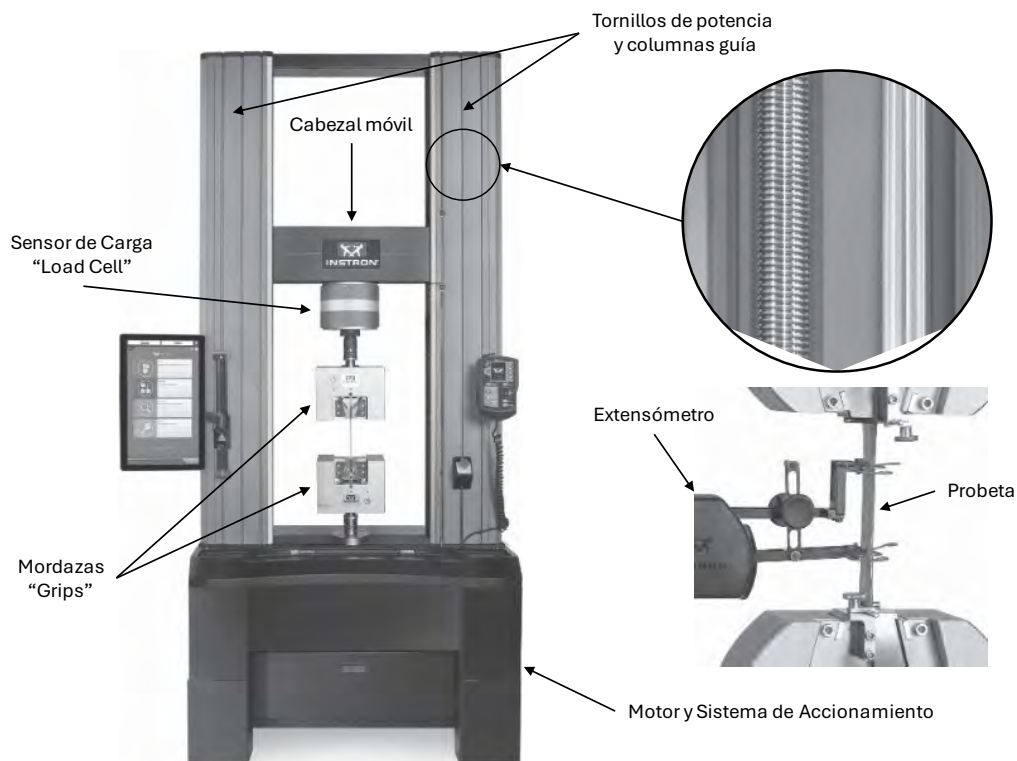
Electromecánico: Este tipo de accionamiento utiliza un motor eléctrico, un sistema de engranajes y tornillos de potencia para mover el cabezal móvil, este sistema logra una amplia variedad de velocidades y mayores desplazamientos para el cabezal móvil (Davis, 2004).

Hidráulico: Este tipo de accionamiento utiliza un cilindro hidráulico de simple o doble efecto para mover el cabezal móvil, se caracterizan por generar grandes cargas, pero requieren mayor mantenimiento (Davis, 2004).

En la **Figura 2-11**, se presenta una máquina con un sistema electromecánico de la marca Instron. El cabezal móvil es accionado por dos tornillos de potencia los cuales son accionados por un motor eléctrico, las columnas guía aseguran que el cabezal se desplace perfectamente alineado. Esta máquina cuenta con sujetadores tipo cuña para fijar la probeta. Los datos de fuerza se registran por medio del sensor de carga “*load cell*” y la deformación “*strain*” con el extensómetro de contacto.

Figura 2-11

Sistema electromecánico de ensayo de materiales de doble columna



Nota. Fuente (Dowling et al., 2019; Instron Industrial Machinery Manufacturing, 2024).

2.3.2.2.1 Aparatos para registrar datos de fuerza, desplazamiento y deformación

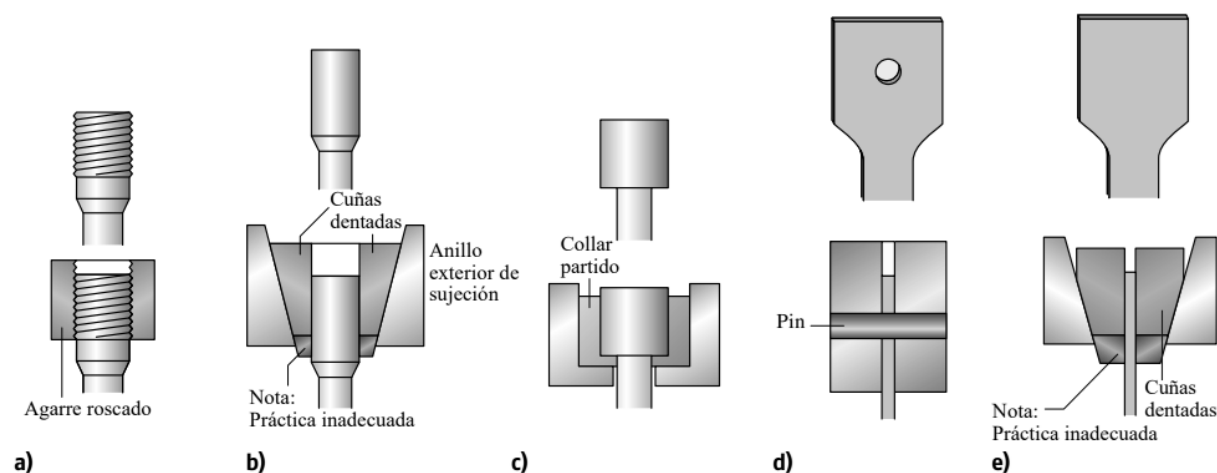
En los ensayos de tracción la adquisición precisa de datos de fuerza, desplazamiento y deformación es fundamental para poder obtener resultados óptimos y realizar un correcto análisis. Actualmente el uso de equipos electrónicos de medición es el estándar de aplicación.

Medición de la fuerza de tracción uniaxial: La fuerza es un parámetro fundamental en el ensayo de tracción. La medición de este parámetro se realiza mediante células de carga – *load cells*, que es un transductor que convierte la fuerza física en señales eléctricas que se pueden procesar y obtener mediciones. Las células de carga “*load cell*” por lo general son del tipo S y tipo cilíndrico. También se puede medir hidráulicamente si se usa actuadores hidráulicos.

Medición del desplazamiento o elongación: La medición de este parámetro durante el ensayo es fundamental para construir la curva fuerza desplazamiento, que analíticamente se puede transformar en esfuerzo – deformación. Los dispositivos utilizados para medir el cambio de longitud son: extensómetros de contacto, laser y video para aplicaciones de alta precisión y la unidad de escala lineal digital o digital linear scale para módulos educativos.

Figura 2-12

Tipos y métodos de sujeción de probetas en una máquina universal de ensayos



Nota. Imagen tomada de (ASTM International, 2022; Czichos et al., 2011).

Medición de la deformación (*strain*): La deformación es un parámetro derivado del desplazamiento, es la división entre el cambio de longitud y la longitud inicial. Existen dispositivos como los strain gauges entre los más utilizados que registran directamente este parámetro, también se dispone de sensores ópticos.

2.3.2.2.2 Sistema de agarre

El sistema de agarre de las máquinas de ensayo de tracción varía en su configuración de acuerdo a la geometría de la probeta, el material de la probeta y el área de sección transversal.

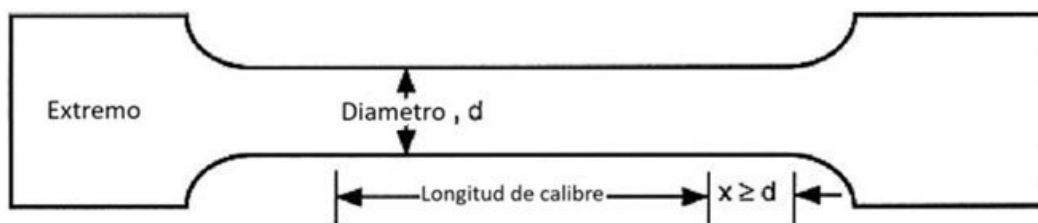
Estas condiciones de la probeta hacen que se requiera un tipo de agarre especial para cada tipo de probeta. En la siguiente **Figura 2-12** se muestran los distintos tipos de agarre para una probeta en particular: cilíndrica, cilíndrica roscada, plana, plana con extremo para soporte tipo pin.

2.3.2.3 Probetas de Ensayo de Tracción

La probeta de tracción es la muestra significativa de un material en el que se aplicara una carga axial hasta producir un fallo. En la **Figura 2-13** se observan sus características principales: presenta unos extremos agrandados para el agarre, la sección transversal es de tipo circular o rectangular y la parte más importante es la sección de calibre, esta se caracteriza por tener un área menor con respecto a los extremos garantizando que la deformación ocurra en esta zona (Hosford, 2010).

Figura 2-13

Típica probeta de tracción con una sección de calibre reducida y extremos agrandados

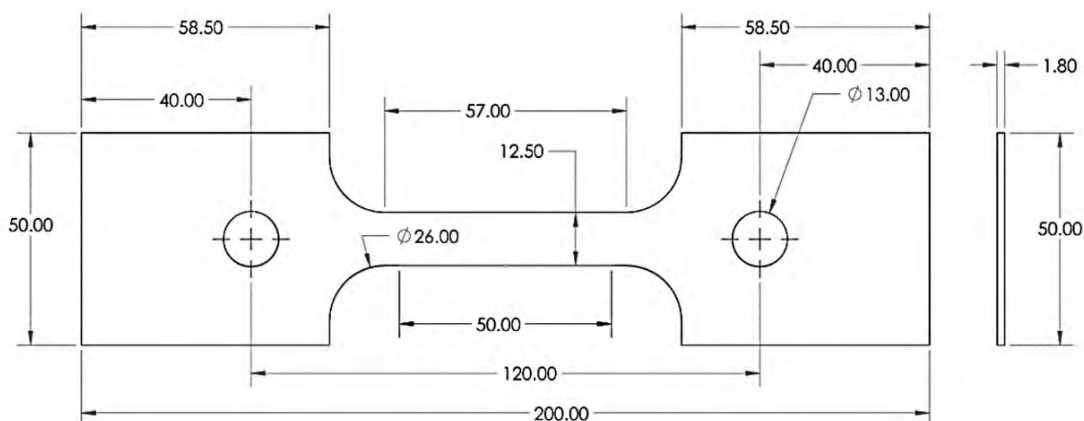


Nota. Obtenida de (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024).

El estándar ASTM E8/E8M establece distintas configuraciones geométricas de probetas metálicas, con excepciones como aleaciones de aluminio y magnesio, se selecciona la probeta tipo lámina (sheet-type) con extremos de pasador (pin-loaded). En la **Figura 2-14**, se presenta la probeta a escala con sus dimensiones. El espesor de la probeta depende del espesor del producto que se va realizar el ensayo, siendo 16 mm el valor máximo, el ancho de la sección de agarre puede ser reducido, sin embargo, se debe tener un especial cuidado en con los hombros.

Figura 2-14

Probeta tipo lámina con extremos de pasador (pin-loaded sheet-type)



Nota: Probeta tipo lámina - extremos de pasador de acuerdo a (ASTM International, 2024, p. 8)

2.3.3 Curva Esfuerzo – Deformación y Propiedades de Tracción

2.3.3.1 Curva Esfuerzo Deformación

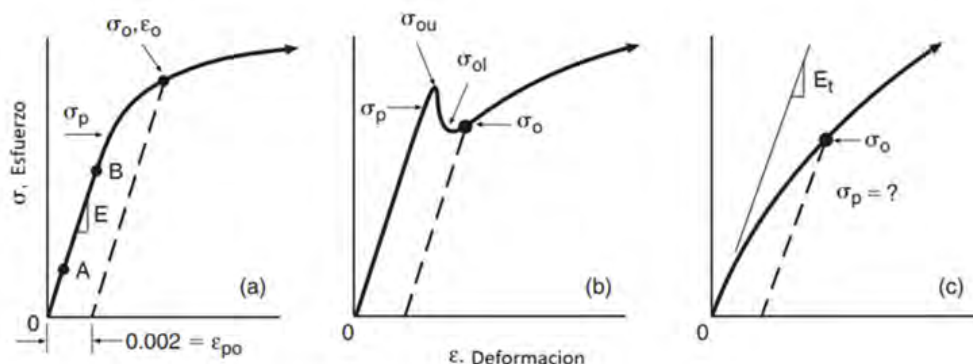
La curva esfuerzo deformación o llamado también diagrama esfuerzo deformación de ingeniería, es el principal resultado que se obtiene del ensayo de tracción (Dowling et al., 2019). Expresa la relación entre la carga aplicada y la elongación en la probeta, mostrando un perfil completo de ensayo de tracción. Este grafico varia ampliamente en los diferentes materiales de ingeniería (Huda, 2022). Sin embargo, se debe mencionar que el primer resultado del ensayo de tracción es un gráfico fuerza elongación, pero al depender de las dimensiones de la muestra tiene poco valor (Komvopoulos, 2016).

En la siguiente **Figura 2-15** se presentan las curvas características más generales que describen el comportamiento mecánico de los materiales, indicando los puntos característicos. La primera curva es característica de materiales frágiles o de alta resistencia como los aceros de alto carbono. La segunda curva es propia de materiales dúctiles como el acero ASTM A36, esta curva es la que generalmente se estudia puesto que presenta todas las zonas y puntos característicos.

También se presenta la línea tangente “offset” que es un método estandarizado para determinar el punto el límite elástico puesto que los materiales no presentan un límite elástico definido

Figura 2-15

Puntos característicos en la parte inicial de la curva esfuerzo – deformación.



Nota. a) Varios metales y aleaciones, b) Metales que presentan una caída de fluencia y c)

Materiales que no presentan región lineal (Dowling et al., 2019).

En la **Figura 2-16** se observa la diferencia entre las curvas de ingeniería y real del ensayo de tracción obtenidas con extensómetro y sin extensómetro. La región elástica es mayor en la curva obtenida sin el extensómetro, dado que la deformación se obtiene de medir la elongación completa de la probeta y no solo del calibre como en la curva b. Durante el ensayo de tracción las zonas fuera de la región paralela, es decir el calibre, experimentan deformaciones elásticas, si bien son mínimas estas son registradas por el sensor de desplazamiento.

El módulo de elasticidad E solo puede ser obtenido de la segunda curva al igual que las propiedades de fluencia. La curva obtenida con extensómetro es obtenida hasta antes de llegar a la fractura para no causar daño en el extensómetro, por el contrario, la curva obtenida sin extensómetro se obtiene con la carga de tracción hasta la fractura.

Entonces para obtener la curva esfuerzo deformación a partir de los datos de fuerza elongación se utilizan las siguientes formulas:

2.3.3.1.1 Esfuerzo de Ingeniería (σ).

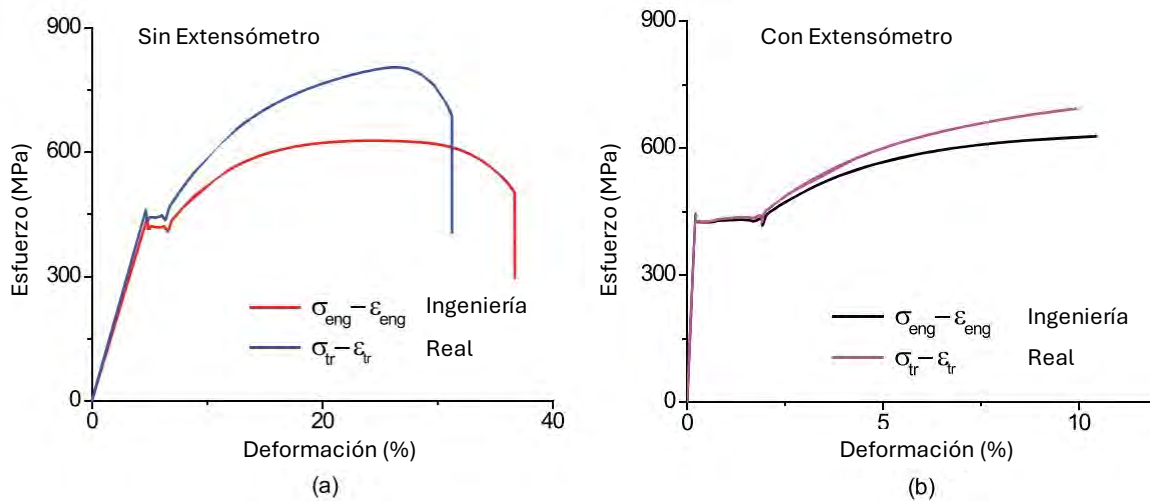
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

Donde:

- σ = Esfuerzo de ingeniería (MPa) (lb/in²)
- F = Fuerza aplicada sobre la muestra (N) (lb)
- A_0 = Área de sección transversal original de la muestra (mm²) (in²)

Figura 2-16

Comparación de las curvas real y de ingeniería para un acero AISI 1045 a 6 mm/min



Nota. a) Sin extensómetro con carga de tracción hasta la fractura, b) Con extensómetro hasta un nivel de deformación de ~10% (Komvopoulos, 2016).

2.3.3.1.2 Deformación de Ingeniería (ϵ).

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} \quad (2.2)$$

Donde:

- ϵ = Deformación unitaria axial (mm/mm) (in/in)
- L_0 = Longitud original de la probeta o longitud original de calibre (mm) (cm) (in)

- L_f = Longitud final de la probeta o longitud final de calibre (mm) (cm) (in)

2.3.3.1.3 Módulo de Elasticidad (E).

Módulo de elasticidad o llamado también módulo de Young es una constante de proporcionalidad que está presente en el rango elástico o la primera porción de la curva esfuerzo deformación. Indica la rigidez del material en tracción (Huda, 2022). Se puede determinar de diferentes formas:

Utilizando la Ley de Hook en la primera parte de la curva esfuerzo deformación, el comportamiento lineal elástico se puede expresar como:

$$\sigma = E \varepsilon_e \quad (2.3)$$

Donde:

- σ = Esfuerzo en el rango elástico (MPa) (lb/in²)
- ε_e = deformacion elástica (mm/mm) (in/in)
- E = Módulo de elasticidad o módulo de Young (MPa) (lb/in²)

El módulo de elasticidad (E) representa la pendiente de la línea recta en la primera porción de la curva y se puede determinar utilizando dos puntos de esta línea, se recomienda que estos puntos estén lo más alejados posible (Dowling et al., 2019)

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} \quad (2.4)$$

En el caso de tener datos de laboratorio de esfuerzo deformación, estos se deben ajustar utilizando la herramienta de mínimos cuadrados para lograr obtener la pendiente E (Dowling et al., 2019).

En el caso de no encontrar una región lineal clara, se puede utilizar el módulo tangente (E_t), esta es la pendiente de una línea recta tangente a la curva esfuerzo deformación al origen (Dowling et al., 2019).

2.3.3.2 Medidas de Resistencia (Ingeniería)

2.3.3.2.1 Resistencia Última a la Tracción (σ_u).

Resistencia ultima a la tracción o resistencia a la tracción es el esfuerzo máximo alcanzado antes de sufrir la ruptura. En la curva esfuerzo deformación para materiales dúctiles se localiza como el punto máximo alcanzado y para materiales frágiles es igual al punto de ruptura. Se determina dividiendo la fuerza máxima alcanzada entre el área de sección transversal original:

$$\sigma_u = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (2.5)$$

Donde:

- σ_u = Resistencia ultima a la tracción o resistencia a la tracción (MPa) (lb/in²)
- F_{max} = Fuerza máxima (N) (lb)
- A_0 = Área de sección transversal original de la muestra (mm²) (in²)

2.3.3.2.2 Resistencia a la Fractura (σ_f).

La resistencia a la fractura se obtiene dividiendo la fuerza en la fractura entre el área de sección transversal original.

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_0} \quad (2.6)$$

Donde:

- σ_f = Resistencia a la fractura (MPa) (lb/in²)
- F_f = Fuerza en la fractura (N) (lb)
- A_0 = Área de sección transversal original de la muestra (mm²) (in²)
- Para materiales frágiles se tiene: $\sigma_u = \sigma_f$

2.3.3.2.3 Resistencia Elástica (Fluencia).

Existen tres enfoques para identificar la fluencia en la curva esfuerzo deformación:

Limite Proporcional: Se conoce como límite proporcional σ_p al esfuerzo donde se produce la primera desviación de la linealidad, este es difícil de identificar con precisión por lo que se define a criterio, pero logra ser una cantidad no bien definida (Dowling et al., 2019)

Limite elástico: El límite elástico se define como el esfuerzo más alto que no provoca una deformación permanente o deformación plástica, su determinación también es difícil, tedioso y no practico debido a que se requiere una descarga repetitiva hasta encontrar la deformación permanente (Dowling et al., 2019).

Resistencia a la fluencia: La resistencia a la fluencia es el parámetro más satisfactorio y eficiente para definir la fluencia. la resistencia a la fluencia se define como el esfuerzo a partir del cual el material comienza a deformarse plásticamente (Komvopoulos, 2016, p. 32), puede determinar mediante el método de compensación por lo que no está sujeto a criterio, este método consiste en graficar una línea recta paralela a la pendiente elástica con un desplazamiento y realizar una intersección con la curva para encontrar un punto bien definido, el desplazamiento generalmente se considera 0.2% de la deformación. Para materiales como los aceros con bajo contenido de carbono donde presentan un punto de fluencia superior y un punto de fluencia inferior, el método de compensación se aproxima al punto de fluencia inferior determinando de esta manera la resistencia a la fluencia (Dowling et al., 2019). Este parámetro es determinado para poder ser utilizado en el diseño mecánico (Czichos et al., 2011). Experimentalmente es posible determinar estos tres parámetros, sin embargo, dependen en gran medida de la precisión de los dispositivos para medir la deformación.

2.3.3.2.4 Ductilidad.

La ductilidad es la capacidad que tiene un material de deformarse sin provocar una ruptura o hasta antes de la ruptura bajo una carga de tracción (Dowling et al., 2019).

Se determina de dos maneras:

Porcentaje de elongación:

$$\% \text{ Elongacion} = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100 \quad (2.7)$$

Porcentaje de reducción de área:

$$\% \text{ Reduccion de Area} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100 \quad (2.8)$$

Para probetas de sección transversal tipo circular, con diámetro inicial (d_0) y diámetro final (d_f), es conveniente utilizar la siguiente formula:

$$\% \text{ Reduccion de Area} = \frac{d_0^2 - d_f^2}{d_0^2} * 100 \quad (2.9)$$

2.3.3.2.5 Resiliencia.

La resiliencia es la capacidad que tiene un material de absorber y liberar energía mientras se deforma elásticamente (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024). La resiliencia se mide a partir del módulo de resiliencia, esta es la energía de deformación por unidad de volumen necesaria para esforzar el material desde el esfuerzo inicial cero hasta el esfuerzo de fluencia, se expresa con la siguiente formula (Horath, 2019):

$$U_R = \frac{\sigma_0^2}{2E} \quad (2.10)$$

Donde:

- U_R = Módulo de resiliencia (J/m³) (Pa)
- σ_0 = Esfuerzo en el punto de fluencia (MPa) (lb/in²)
- E = Módulo de elasticidad o módulo de Young (MPa) (lb/in²)

En la curva esfuerzo deformación la resiliencia de un material se determina como el área bajo la curva hasta antes del punto de fluencia (Gdoutos & Konsta-Gdoutos, 2024).

2.3.3.2.6 Tenacidad.

La tenacidad es la capacidad que tiene un material de absorber energía en el rango plástico o antes de fracturarse, en la curva esfuerzo deformación se determina como el área total bajo la curva, esta indica la cantidad de trabajo por unidad de volumen que se puede realizar sobre un material sin provocar su fractura (Horath, 2019).

Para metales dúctiles el área bajo la curva se aproxima mediante la siguiente formula:

$$U_T = \left(\frac{\sigma_0 + \sigma_u}{2} \right) \varepsilon_f \quad (2.11)$$

Donde:

- U_T = Módulo de tenacidad (J/m³) (Pa)
- σ_0 = Esfuerzo en el punto de fluencia (MPa) (lb/in²)
- σ_u = Esfuerzo en el punto de fractura o ruptura (MPa) (lb/in²)
- ε_f = Deformación de fractura o ruptura mm/mm) (in/in)

Para materiales frágiles la curva esfuerzo deformación se aproxima mediante una parábola y se determina de la siguiente manera:

$$U_T = \frac{2}{3} \sigma_f \varepsilon_f \quad (2.12)$$

Donde:

- U_T = Módulo de tenacidad (J/m³) (Pa)
- σ_f, σ_u = Esfuerzo en el punto de fractura o esfuerzo ultimo (MPa) (lb/in²)
- ε_f = Deformación de fractura o ruptura mm/mm) (in/in)

2.3.4 Acero ASTM A36

El estándar A36/A36M “Especificación estándar para acero estructural al carbono”, de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) cubre perfiles, placas y barras de acero al

carbono con calidad estructural (ASTM International, 2019). Para su uso en la construcción de puentes y edificios, así como para otros fines estructurales, estos materiales pueden unirse mediante remaches, tornillos o soldadura.

Se indica su composición química y los requerimientos de tracción, que son sus propiedades mecánicas. Asimismo, se indica su aplicación a otras configuraciones que no están incluidas en su ámbito de aplicación, como remaches, pernos, tuercas, fundición y chapas laminadas en caliente, entre otros.

En el caso de láminas o chapas laminadas en caliente “*Hot-rolled sheets*”, el estándar ASTM A36 indica consultar el estándar A 1011/A 1011M, SS grado 36, tipo 1 o tipo 2 (ASTM International, 2019, p. 2). El estándar A 1011/A 1011M, en la tabla de requisitos de propiedades mecánicas para los grados 36 tipo 1 y 2 (ASTM International, 2018), indica una resistencia a la fluencia mínima de 36 ksi (250 MPa) para ambos tipos; y una resistencia a la tracción mínima de 53 ksi (365 MPa) para el tipo 1; para el tipo 2, indica una resistencia a la tracción mínima en un rango de 58-80 ksi (400-550 MPa).

2.3.5 Conceptos Generales de Diseño en Ingeniería Mecánica

El presente proyecto de tesis consta de una parte que requiere la aplicación del diseño en ingeniería mecánica por tanto se requiere de una sólida comprensión de los conceptos teóricos que abarca el diseño en ingeniería mecánica. La bibliografía consultada es bastante variada respecto a definir y clasificar en forma estructurada el diseño en ingeniería mecánica.

Por consiguiente, se presenta una estructura propia que parte de lo general a lo específico: diseño, diseño en ingeniería, diseño en ingeniería mecánica, diseño mecánico, metodología de diseño. Subsecuentemente se describe en detalle la metodología de diseño y el diseño en ingeniería mecánica para establecer una secuencia fluida de los fundamentos teóricos de diseño.

2.3.5.1 Diseño

Diseño es un término que tiene diferentes definiciones de acuerdo al contexto donde se utilice. En el contexto estrictamente de ingeniería mecánica la definición de diseño es desarrollar un plan para satisfacer o resolver un problema específico, este plan da como resultado la creación de algo físico que debe ser seguro, confiable, que se pueda manufacturar y comercializar (Budynas & Nisbett, 2021, p. 45).

2.3.5.2 Diseño en Ingeniería

El diseño en ingeniería se puede definir como: el proceso de aplicar la ciencia y la ingeniería para especificar un componente o sistema en gran detalle para su manufactura (Ugural, 2022).

Por otro lado, el Consejo de Acreditación de Ingeniería y Tecnología -ABET “*Accreditation Board for Engineering and Technology*”, una organización no gubernamental sin fines de lucro encargada de acreditar programas universitarios en ingeniería y tecnología, adicional a las acreditaciones nacionales y regionales, define el diseño de ingeniería como “un proceso que se caracteriza por ser iterativo, creativo y en el que se toman decisiones para concebir un componente, sistema o proceso que satisfaga una necesidad deseada. Para ello, se aplican las ciencias básicas, las matemáticas y las ciencias de la ingeniería con el fin de alcanzar un objetivo establecido dentro de unos límites.” (ABET, 2024).

De igual modo, la ABET define a las ciencias de la ingeniería como los estudios que forman un puente entre las matemáticas y las ciencias básicas de un lado y por otro la práctica de la ingeniería. Las ciencias de la ingeniería están basadas en las matemáticas y ciencias básicas como la física y la química, pero son una aplicación creativa necesaria que hace posible resolver problemas de ingeniería (ABET, 2024).

2.3.5.3 Diseño en Ingeniería Mecánica:

La forma de referirse al diseño en ingeniería mecánica es distinta, y en algunos casos, superpuesta y ambigua según la bibliografía que se consulte; sin embargo, en cuanto a la definición, son bastante similares. Estas son algunas formas en las que se presenta: diseño en ingeniería mecánica, modelo de procedimiento general de diseño, ingeniería de diseño, teoría de diseño, diseño metodológico, metodología de diseño, desarrollo metodológico de productos técnicos, proceso de diseño, proceso de diseño mecánico. Entre las causas de estas diferencias se encuentran el contexto geográfico, el área profesional, la industria y el idioma.

En síntesis, el diseño en ingeniería mecánica se refiere al conjunto de pasos con un enfoque metodológico y sistemático para la concepción, el diseño y desarrollo de un producto mecánico (Ugural, 2022, p. 4; Vajna, 2020, p. 22). Se puede afirmar que la metodología de diseño es el conjunto estructurado de pasos secuenciales e iterativos que utiliza métodos o técnicas; es decir, el proceso de diseño que conduce al diseño en ingeniería mecánica.

El diseño en ingeniería mecánica abarca todas las disciplinas de esta especialidad, entre las más importantes se encuentran la mecánica de materiales, mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor y masa, procesos de manufactura, ingeniería de los materiales, electrotecnia, electrónica, teoría de control y teorías de la información. Las características más importantes del diseño en ingeniería mecánica son: secuencial, iterativo, innovador, un proceso creativo de toma de decisiones y resolución de problemas abiertos.

2.3.5.4 Diseño Mecánico

El diseño mecánico se refiere al diseño de componentes y sistemas de naturaleza mecánica que realicen una función específica, como máquinas, estructuras, dispositivos e instrumentos. Una

máquina es el conjunto de elementos de máquina interrelacionados que modifican la fuerza, movimiento o energía (Ugural, 2022, p. 4).

2.3.5.5 Metodología de Diseño y Modelo de Proceso de Diseño

En cuanto al desarrollo del diseño metódico se remonta hasta finales del siglo XIX, (Vajna, 2020, p. 22-23) nombra a Redtenbacher como el pionero en desarrollar la ingeniería mecánica científica, realizando la transición de una base empírica a una base fundamentada en las matemáticas. Fue a mediados del siglo XX cuando comenzaron las investigaciones sobre el diseño con un enfoque más racional, utilizando el término “diseño metodológico”. Como resultado, se desarrollaron diversos y numerosos modelos de proceso de diseño que, en Alemania, dieron lugar a las directrices publicadas por la VDI (Verein Deutscher Ingenieure - Asociación de Ingenieros Alemanes).

Cross (1984), define la metodología como el estudio de principios, prácticas y procedimientos en un sentido amplio y general; su interés principal se enfoca en cómo se lleva a cabo el diseño y cómo se puede diseñar, incluyendo cómo piensan y trabajan los diseñadores. La metodología establece una estructura apropiada para el proceso de diseño, para lo cual se desarrollan y aplican métodos, técnicas y procesos de diseño que se adecuan a una aplicación específica o a un problema de diseño.

Las metodologías de proceso de diseño se presentan en forma de modelos de procesos, que son representaciones visuales ilustrativas de la metodología. Por lo general se presentan en diagramas de flujo estructurados en actividades y/o fases que reflejan claramente el enfoque metódico y la lógica de resolución de problemas.

El enfoque secuencial, iterativo y paso a paso garantiza que no se pase por alto ni se omita ningún requerimiento clave en el desarrollo de productos técnicos. Además, facilita la toma de

decisiones y se reduce el tiempo, lo que permite obtener mejores resultados a los diseñadores (Bender & Gericke, 2021).

En la práctica, e incluso teóricamente, las fases y/o actividades de trabajo no siempre se pueden completar secuencialmente debido a la coevolución del problema y la solución. En algunos casos, existen requisitos técnicos que solo se pueden encontrar después de realizar una solución técnica (Bender & Gericke, 2021).

Asimismo, se da el caso de realizar actividades en paralelo, lo que ocasiona que no se distinga claramente dónde empiezan y terminan las fases que incluyen las actividades de trabajo.

Respecto a la presentación de los modelos de procesos específicos para ingeniería mecánica, se presentan de forma abstracta para proporcionar un enfoque más amplio y general, sin centrarse en un producto o sistema en particular. Esto hace que, se observen similitudes a pesar de diferir en la terminología y en la visualización de las fases y actividades (Bender & Gericke, 2021, p. 82).

El diseño del módulo educativo de ensayo de tracción se desarrolla de acuerdo a la última edición de 2019 de la directriz VDI 2221, que se describe en el siguiente apartado.

2.3.6 Directriz VDI 2221/19

La directriz de diseño VDI 2221 es una guía o documento técnico reconocido realizado por expertos, que constituye un marco de referencia para el desarrollo del diseño de productos y sistemas técnicos en el ámbito industrial y académico.

Es publicado por la *Verein Deutscher Ingenieure* [Asociación de Ingenieros Alemanes] (VDI) bajo el título de: “*Richtlinie VDI 2221 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme*” y su traducción al español es: “Directriz VDI 2221 - Diseño de productos y sistemas técnicos”. La última edición de 2019, se presenta en dos partes “*Blatt 1 & 2*”, la primera se centra en el modelo

de diseño de productos y la segunda parte en la configuración de procesos individuales de diseño de productos (VDI, 2024c).

En detalle, la primera parte de la directriz aborda los fundamentos del desarrollo metódico en general para una aplicación interdisciplinar en la industria y también define los objetivos, así como las actividades y los resultados del trabajo en un modelo de desarrollo de productos y sistemas técnicos (VDI, 2024a).

La segunda parte adapta el modelo general de la primera para su aplicación en un contexto específico, y se centra en productos y sistemas complejos, ofreciendo instrucciones sistemáticas y orientaciones mediante casos de estudio (VDI, 2024b).

Respecto a, la obligatoriedad e importancia jurídica, la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI, 2024c), describe a una directriz como un documento de trabajo con recomendaciones y mejores prácticas de carácter orientativo y práctico. En principio, su aplicación es voluntaria y no obligatoria. La aplicación de una directriz es responsabilidad exclusiva de la empresa, el jefe de diseño o el usuario y no exime a nadie de la responsabilidad de sus propios actos. Sin embargo, si existe un contrato legal entre dos partes que haga referencia explícita a una directriz VDI, las especificaciones de esta pasan a ser legalmente vinculantes de forma automática (VDI, 2024c).

El modelo de proceso de la directriz VDI 2221-1/19 se presenta de forma general, mostrando la lógica del proceso secuencial e iterativo. Se presenta de esta forma para que pueda adaptarse al desarrollo de un producto específico según el contexto de su aplicación. Este modelo de proceso se caracteriza por su alto grado de documentación, es decir, que se obtienen entregables o documentos al completar cada actividad o fase de trabajo. Esta última versión de 2019 de la directriz VDI 2221 está más orientada al proceso que la versión de 1997, pues se identifican 4

secciones, a diferencia de las 3 de la versión anterior. A continuación, se describen las principales características de esta nueva versión:

- El diagrama ilustra claramente el inicio, “Planificación del producto”, y el final, “Publicación de la documentación del producto”, del proceso de diseño.
- En este nuevo modelo de proceso se identifican claramente las entradas de información, “requerimientos”, y las salidas, “documentos del producto”.
- Se presenta una nueva sección específica para emitir la solicitud de diseño al área de diseño, que se titula “Objetivos”.
- En la segunda sección, “Actividades”, se presentan los pasos de trabajo, que ahora se llaman actividades de trabajo. En esta versión, se sugieren 8 actividades, una más que en la anterior.
- La tercera columna permanece similar a la edición anterior, excepto por el cambio en la terminología, que se extiende a lo largo de todo el modelo de proceso.
- Al igual que la versión anterior, la adaptación de las fases a contextos específicos se describen en detalle en la segunda parte, que se centra en la configuración del modelo de proceso de diseño general de la primera parte.

En general, se muestran tres columnas interrelacionadas: la primera se centra en los objetivos, la segunda en las actividades y la tercera en los documentos que son resultados de las actividades de trabajo.

Como se mencionó anteriormente, esta directriz es un documento que ofrece recomendaciones y mejores prácticas que establecen un marco de referencia flexible y no rígido como algo prescrito. Por tanto, es posible realizar modificaciones para su adaptación a un producto o sistema específico.

La segunda parte “*Blatt 2*” de la directriz VDI 2221 describe en detalle la adaptación o configuración del modelo general presentado en la primera parte. Sugiere la adaptación de las fases del proceso, que en la anterior versión eran 4 fases y ahora pueden ser hasta 7. Las características más importantes son las siguientes (Bender & Gericke, 2021):

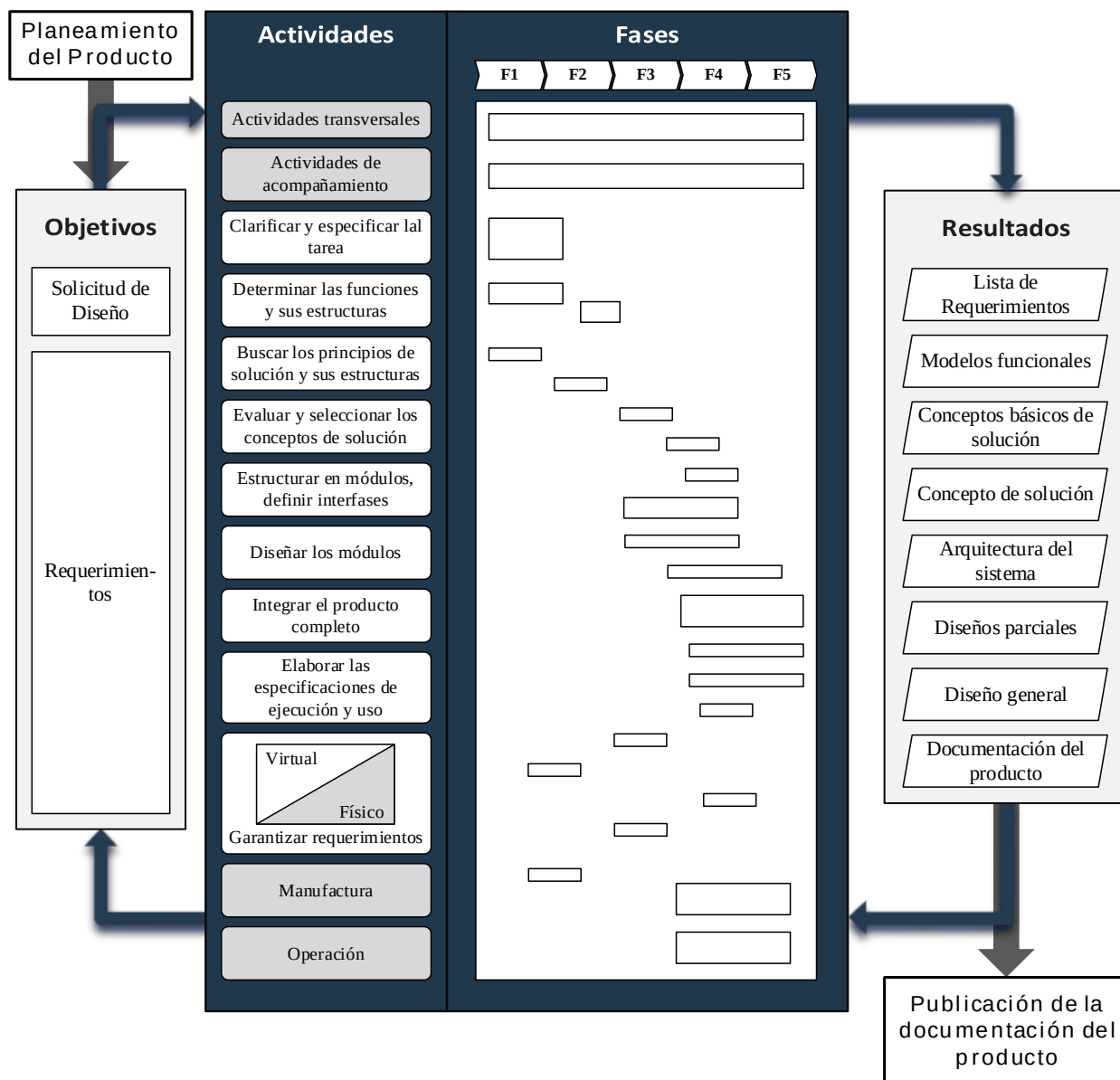
- Se permite el cambio en la terminología de las actividades y fases de trabajo dentro de una compañía.
- Se pueden añadir o retirar actividades de trabajo según el contexto de aplicación o industria.
- Las actividades se subdividen en forma secuencial según se requiera.
- Algunas actividades se pueden realizar antes que otras.
- Las actividades se pueden realizar de forma paralela es decir al mismo tiempo.
- El modelo de proceso se puede subdividir en sub procesos de acuerdo a la complejidad del producto o sistema técnico.

En síntesis, la segunda parte de la directriz VDI 2221/19 se presenta como un modelo de proceso flexible en el cual se da las instrucciones para su adaptación a una aplicación específica que abarca el campo industrial y académico. En la parte 2 de la directriz VDI 2221, las fases se presentan al lado derecho de la sección de actividades. Para realizar cada actividad, se agrupan en fases en sentido horizontal mientras las actividades están agrupadas verticalmente en una sección al lado izquierdo, que visualmente se observa como el diagrama de Gantt; las actividades en función de las fases que a su vez están en función del tiempo.

La aplicación apropiada de la directriz VDI 2221/19 para el presente proyecto de tesis se realiza utilizando las dos partes de la directriz (Blatt 1 y 2), dado que se realiza el diseño y la concretización del modelo físico del módulo educativo de ensayo de tracción

Figura 2-17

Modelo de proceso VDI 2221/19 adaptado al desarrollo del módulo educativo



Nota. F1 → Investigación, F2 → Perfil, F3 → Ideas, F4 → Concepto (Diseño) y F5 → Prototipo. Basado en VDI 2221/19 parte 1 y 2 (VDI, 2024a, 2024b).

Tomando como referencia uno de los casos de estudio propuestos por la directriz VDI 2221 parte 2, se configura el modelo de diseño general para el proyecto. Se analiza el contexto e identifican factores importantes que influyan en el diseño. Estos son los siguientes: el ámbito académico, presupuesto, plazo del proyecto, métodos, requerimientos de diseño, manufactura, la operación (ensayo de tracción), entre otros.

En este caso de estudio, denominado “Proyecto de diseño del estudiante”, se enfatiza que uno de los principales objetivos es demostrar la viabilidad técnica y económica del producto técnico obtenido. Además, se señala que, en comparación con una aplicación industrial, esta aplicación académica se caracteriza por tener una estructura de proceso flexible y se recomienda el uso intensivo de diferentes métodos y herramientas de diseño (VDI, 2024b).

En la **Figura 2-17** se presenta el modelo de proceso adaptado para el desarrollo del módulo educativo de ensayo de tracción. Este diagrama presenta claramente el proceso completo del ciclo de vida del producto y adicionalmente los procesos de acompañamiento junto a los transversales. El desarrollo o generación del producto abarca desde el planeamiento del producto, diseño metodológico hasta la operación pasando por la implementación o manufactura.

2.3.7 Diseño en Ingeniería Mecánica

2.3.7.1 Factor de Seguridad, Estándares y Documentos Técnicos

En el diseño de componentes y estructuras se realizan abstracciones matemáticas del modelo real al modelo analítico, se asumen condiciones de operación, se asume que el material es isotrópico y otros factores con el objetivo de hacer posible el cálculo de esfuerzos y deformaciones. Estos supuestos o consideraciones realizadas conllevan a generar un área de incertidumbre. Los ingenieros utilizan un factor de seguridad para garantizar que un elemento no trabaje con una carga

mayor a la que puede soportar, el factor de seguridad (η), es la relación entre la carga máxima que produce el fallo y la carga permisible en condiciones de servicio (Ugural, 2022).

Esta relación siempre debe ser mayor a la unidad. Generalmente se usa el factor de seguridad en términos de esfuerzo (Ugural, 2022):

$$\eta = \frac{\text{Resistencia del material}}{\text{Esfuerzo permisible}} \quad (2.13)$$

La resistencia del material se refiere al esfuerzo de fluencia o esfuerzo último del material en condiciones estáticas y al límite de resistencia en condiciones dinámicas o fatiga (Ugural, 2022).

Los valores del factor de seguridad se pueden obtener de bibliografías, sin embargo, el uso de estándares, normas y códigos ofrecen a los ingenieros valores del factor de seguridad respaldados por el estado de la tecnología, es decir valores recomendados por fabricantes y sociedades. En algunos estas recomendaciones pasan a ser obligatorias, es decir son exigidos por regulaciones por medio de leyes, por ejemplo, el código ASME para recipientes a presión.

En el contexto de Estados Unidos que es un país de referencia en cuanto a la bibliografía utilizada para el presente proyecto de tesis, se distingue entre estándares y códigos, por el nivel de exigencia de su utilización, jerárquicamente los códigos tienen mayor peso que los estándares. Los códigos son respaldados por leyes y los estándares por sociedades y fabricantes.

En el contexto alemán, se mencionan 3 términos diferentes (*Normen, Richtlinien y Standards*) (Peterjohann - Consulting, 2024), traducidos al español serían: Normas, Directrices y Estándares la diferencia entre los 3 es el grupo que respalda a cada uno y en consecuencia la importancia y el nivel de obligatoriedad que puedan tener. Las normas son generalmente obligatorias respaldadas por una institución autorizada como ISO a nivel internacional, CEN a nivel de Europa y DIN a nivel nacional en Alemania. Los estándares son certificaciones

respaldadas por instituciones y sociedades, pero no son obligatorias por ley, Las directrices son realizadas por sociedades como la VDI, VDG, DVS, etc.

En el presente proyecto de tesis, principalmente se toma como marco de referencia el estándar ASTM E8/E8M para el ensayo de tracción y la Directriz VDI 2221/19 para el proceso de diseño, conjuntamente con estándares y directrices adicionales para el diseño de los componentes mecánicos y el ensayo de tracción que se presentan a continuación:

- | | |
|-------------------|--------------------------|
| - VDI 2221/19 | - ASTM A36/A36M - 19 |
| - VDI 2803 | - ASTM A 1011/A 1011M-18 |
| - VDI 2225 | - ASTM E29 - 22 |
| - ASTM E8/E8M -24 | - ISO 6892 – 2 2019 |
| - ASTM A370-24a | - |

2.3.7.2 Criterios de Diseño

Los criterios de diseño se establecen de los modos de falla, los principales son: resistencia, rigidez, vida útil y desgaste. Además, existen otros como los criterios dinámicos y de fiabilidad. En esta investigación se emplearán principalmente los criterios de resistencia y rigidez (Jiang, 2019, p. 33).

Criterio de Resistencia:

El criterio de resistencia indica q los esfuerzos reales (σ) en un punto crítico de un componente deben ser menores o iguales a la resistencia permisible del material es decir $\sigma \leq [\sigma]$. La mayoría de los tipos de falla ocurren por que el material no tiene la resistencia suficiente para soportar las cargas.

El esfuerzo permisible es una condición que depende de las propiedades del material y se calcula dividiendo la resistencia del material entre el factor de seguridad permisible. De manera

alternativa, el criterio de resistencia puede expresarse mediante el factor de seguridad FS . Este factor brinda al diseñador un margen adicional frente a las incertidumbres y variabilidades asociadas a las cargas resistencia del material, calidad de manufactura y condiciones de trabajo. (Jiang, 2019, p. 33). Se expresa de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\sigma_{lim}}{\sigma} \geq [FS]$$

Criterio de Rigidez:

El criterio de rigidez se analiza cuando la deflexión resulta ser crítica para la seguridad o rendimiento de un elemento. La rigidez garantiza que una máquina tenga un funcionamiento preciso y exacto ya que una deformación o deflexión excesiva podría ocasionar interferencias o fallas.

Para evaluar la rigidez de un elemento varía de acuerdo a formas de deflexión: En el caso que un elemento este bajo un momento de flexión M debe satisfacer la deflexión $Y \leq [Y]$ y la pendiente $\theta \leq [\theta]$. En cambio, cuando el elemento está bajo una carga de torsión la deflexión angular debe satisfacer $\phi \leq [\phi]$; siendo $[Y]$, $[\theta]$, $[\phi]$ valores permisibles de deflexión, pendiente y deflexión angular (Jiang, 2019, p. 34).

2.3.7.3 Elementos de máquina

Los elementos de máquina son partes fundamentales de subsistemas que conforman una máquina y maquinaria. Los elementos de máquina son bastantes y muy específicos en algunos casos de acuerdo a una aplicación específica, sin embargo, los principales son los ejes, rodamientos, engranajes, fajas, cadenas, embragues, frenos, resortes, elementos roscados, remaches, soldadura, tornillos de potencia, recipientes a presión, volantes de inercia, y otros.

2.3.8 Manufactura y Ensamblaje

La manufactura es en gran medida dependiente del proceso de diseño. Los procesos de manufactura requeridos se determinan en la etapa de concepción de la solución, en consecuencia, las decisiones tomadas en esta etapa tienen un gran impacto en el costo y la complejidad de manufactura del producto. Por otro lado, el ensamblaje es también condicionado en esta etapa inicial del proceso de diseño. Un enfoque ampliamente utilizado por los ingenieros de diseño es el diseño para la manufactura y el ensamblaje DFMA, que es la combinación del diseño para la manufactura DFM y el diseño para el ensamblaje DFA. El primero se centra en facilitar la manufactura y el segundo el ensamblaje.

El enfoque DFMA en esta tesis se utiliza para las siguientes actividades (Boothroyd et al., 2010):

- Simplificar la estructura del producto para lograr costos económicos de fabricación, ensamblaje y cuantificar mejoras.
- Realizar una comparación estructurada de los productos existentes y cuantificar las dificultades de fabricación, montaje y operación.

Capítulo 3:

Diseño del Módulo Educativo de Ensayo de Tracción

En el presente capítulo se presenta el desarrollo del diseño del producto o diseño metodológico del módulo educativo de ensayo de tracción. Como se presentó previamente en el marco teórico la directriz VDI 2221/19 recomienda agrupar las actividades en fases para presentar la documentación de la realización de las actividades y los resultados obtenidos.

El desarrollo del módulo educativo de ensayo de tracción se estructura en cinco fases que agrupan las actividades de la siguiente manera:

- i. **Fase 1 - Investigación:**
 - Objetivos y requerimientos
- ii. **Fase 2 - Perfil:**
 - Clarificar y especificar la tarea
- iii. **Fase 3 - Ideas:**
 - Determinar las funciones y sus estructuras
 - Buscar los principios de solución y sus estructuras
 - Evaluar y seleccionar los conceptos de solución
- iv. **Fase 4 – Concepto (Diseño):**
 - Estructurar en módulos, definir interfases
 - Diseñar los módulos
 - Integrar el producto completo
 - Elaborar las especificaciones de ejecución y uso
- v. **Fase 5 - Prototipo:**
 - Manufactura

● Operación

En este capítulo se presenta el desarrollo las fases 1, 2, 3 y 4

3.1 Fase 1 - Investigación:

La primera fase es la de investigación, que corresponde al espacio del problema. En esta fase, se define la tarea a partir del problema de investigación y se examina un campo de búsqueda específico, en el cual se analiza y sintetiza la información necesaria del mercado, el estado de la tecnología y las tendencias futuras (VDI, 2024b).

Es necesario obtener los requerimientos (especificaciones funcionales) de forma separada a la lista de requerimientos (Especificaciones de implementación) para establecer e identificar una división clara entre el espacio del problema y el espacio de la solución. Los requerimientos se utilizan para verificar y validar los resultados de las siguientes fases. La fase concluye con la solicitud de diseño, el cual es un documento que contiene el objetivo (tarea) y los requerimientos preliminares. Se emplean herramientas como las necesidades del usuario/cliente y el benchmarking para identificar y determinar las necesidades.

Especificación de la tarea de diseño: Diseñar un módulo educativo de tracción capaz de realizar el ensayo de tracción experimental y obtener la curva esfuerzo deformación para describir el comportamiento mecánico del acero ASTM A36.

Identificación de las Necesidades:

- Enfoque educativo
- Realizar el ensayo de tracción del acero ASTM A36
- Registrar datos de fuerza y desplazamiento
- Mostrar la curva esfuerzo deformación en tiempo real
- Compacto y portable

- Coste económico
- Software de código abierto (open source)
- Seguro y confiable

3.2 Fase 2 - Perfil:

A partir de esta segunda fase “Perfil” (VDI, 2024b), la tarea se encuentra en el espacio de la solución; aquí se realiza la actividad de “clarificar y especificar la tarea”. Esta actividad consiste en obtener o recopilar información para especificar la tarea, esto incluye al estado del arte y el marco teórico vistos en el capítulo 2, también se toma en cuenta la información obtenida en la fase anterior (VDI, 2024a).

La lista de requerimientos Tabla 3-1, es el resultado de esta fase, esta puede ser modificada a lo largo del proceso de diseño. Los requerimientos pueden ser cualitativos y cuantitativos para lo cual se utiliza el “checklist para identificar requerimientos” (Bender & Gericke, 2021, p. 195).

Es posible indicar cantidades numéricas de los parámetros de diseño en la lista de requerimientos. Para establecer la fuerza máxima que proporcionará el módulo educativo de ensayo de tracción se realiza el cálculo con la probeta seleccionada y adicionalmente se determina el espesor máximo de la probeta de acero ASTM A36.

Tabla 3-1

Lista de requerimientos del módulo educativo de ensayo de tracción

EPIM		Lista de Requerimientos: Módulo educativo de ensayo de tracción	Fecha: 06/06/2025 Resp:
N	E/D	Requerimientos	Responsables
1.	D	Geometría	J.D.A.V.
		Compacto	J.C.A.V.
2.		Cinemática	J.D.A.V.

	E	Velocidad del travesaño móvil: 2.5-25 mm/min (ASTM E8/E8M)	J.C.A.V.
3.		Fuerza	J.D.A.V.
	E	Fuerza Axial ~ 20 kN (Probeta Figura 2-14 y Benchmarking)	J.C.A.V.
4.		Energía	J.D.A.V.
	E	Accionamiento mecánico manual	J.C.A.V.
5.		Material	J.D.A.V.
	E	Probeta de acero ASTM A36	J.C.A.V.
	E	Componentes y Bastidor: Acero ASTM A36	
	D	Cubiertas: Plásticas	
6.		Señal	
	E	Sensor de fuerza y desplazamiento	J.D.A.V.
	E	Transferir datos al computador.	J.C.A.V.
	D	Display digital.	
7.		Software	J.D.A.V.
	D	Implementación de software de código abierto (<i>open-source</i>)	J.C.A.V.
	D	Visualización de la curva esfuerzo-deformación en tiempo real.	
8.		Seguridad	J.D.A.V.
	D	Cubierta protectora contra fragmentos	J.C.A.V.
	E	Cubierta de componentes expuestos	
	E	Instrucciones de operación y seguridad.	
9.		Ergonomía	J.D.A.V.
	D	Montaje rápido y preciso de la probeta.	J.C.A.V.
10.		Manufactura	J.D.A.V.

	D	Manufactura convencional.	J.C.A.V.
	D	Uso de componentes estándar siempre que sea posible.	
11.		Control de Calidad	J.D.A.V.
	E	Validación estadística de la operación (ensayo de tracción).	J.C.A.V.
12.		Ensamblaje	J.D.A.V.
	D	Diseño modular.	J.C.A.V.
13.		Transporte	J.D.A.V.
	E	Portable: transportable por 2 personas.	J.C.A.V.
14.		Diseño Industrial	J.D.A.V.
	D	Estética moderna de laboratorio.	J.C.A.V.
15.		Uso / Operación	J.D.A.V.
	E	Uso académico para estudiantes universitarios	J.C.A.V.
	E	Demostrar el comportamiento mecánico a la tracción del acero ASTM A36.	
16.		Mantenimiento	J.D.A.V.
	D	Los componentes desgastados pueden sustituirse de forma sencilla y económica.	J.C.A.V.
17.		Reciclaje	J.D.A.V.
	D	Uso de materiales que se puedan reciclar.	J.C.A.V.
18.		Costo	J.D.A.V.
	E	Costo económico (Más económico que un módulo comercial)	J.C.A.V.
19.		Plazo	J.D.A.V.
	E	≤ 8 meses	J.C.A.V.

Nota: E → Exigencia, D → Deseo.

3.2.1 Diseño de la probeta

La probeta seleccionada para el ensayo de tracción es la probeta tipo lámina con extremos de pasador (pin-loaded sheet-type) que se muestra en la **Figura 2-14** con sus dimensiones. El espesor de la probeta se determina con el cálculo de la fuerza máxima que se describe a continuación.

En la sección 2.3.4 “Acero ASTM A36” del marco teórico se indica los valores de resistencia a la tracción de 58 a 80 ksi (400-550 MPa) obtenidos del estándar A 1011/ A 1011M (ASTM International, 2018, p. 5) para el acero estructural SS grado 36 tipo 2.

La fuerza máxima se calcula con un enfoque conservador, tomando el valor máximo del rango de 400 – 550 MPa de la resistencia a la tracción y aplicando un factor de sobrecarga de 1.5 veces el valor obtenido por el cálculo analítico. También se toma en cuenta la capacidad de los módulos educativos comerciales. Los módulos de Gunt, Matest, Tecquipment presentan una capacidad igual a 20 kN, mientras que el módulo de Pasco y PA Hilton presentan capacidades de 7.1 kN y 35 kN respectivamente.

Se elige el valor de 550 MPa como resistencia a la tracción, con el cual se obtiene el valor de la fuerza máxima durante el ensayo de tracción. Para el acero ASTM A36 se cumple que el punto de la fuerza máxima coincide con el punto de la resistencia a la tracción. El valor de sobrecarga es de 1.5, lo que incrementa la fuerza en un 50 %, obteniendo así el parámetro para el diseño de los componentes del módulo educativo de ensayo de tracción. La capacidad de referencia elegida es de 20 kN.

El área de la sección de calibre de la probeta se determina por la siguiente ecuación:

$$A_0 = W \times t \quad (3.1)$$

Reemplazando el área A_0 en la ecuación (2.5), y despejando T se obtiene:

$$t = \frac{F_{max}}{W \times \sigma_u} \quad (3.2)$$

Añadiendo el valor de sobrecarga de 1.5 se obtiene el espesor t :

$$t = \frac{F_{max}}{1.5 * W * \sigma_u} \quad (3.3)$$

$$t = \frac{20 * 10^3}{1.5 * 12.5 * 550}$$

$$t = 1.94 \text{ mm}$$

El espesor máximo de la probeta t es de 1.94 mm, sin embargo, se toma un espesor comercial de lámina de 1.8 mm. El anexo H presenta espesores máximos para otros materiales.

3.3 Fase 3 - Ideas:

En esta tercera fase, denominada “Ideas” (VDI, 2024b), el objetivo es obtener el concepto de solución a partir de la lista de requerimientos, para lo cual se realizan tres actividades.

3.3.1 Determinar las funciones y sus estructuras

Esta actividad se centra en definir la función que el producto realiza o debe realizar como un todo y separado en subsistemas (VDI, 2024a). Se utilizan herramientas como la caja negra “Black Box” para abstraer la función principal del sistema y su interacción con el entorno (ver **Figura 3-1**). Esto permite describir cómo se ve el sistema desde el exterior. Por otro lado, la caja transparente “White Box” se utiliza para detallar la estructura interna y las funciones del sistema (ver **Figura 3-2**). Adicionalmente el árbol de funciones es una herramienta que permite comprender las funciones para su análisis y formulación (ver **Figura 3-3**). Desde el punto de vista tecnológico las funciones y sus estructuras deben ser lo más neutral posible.

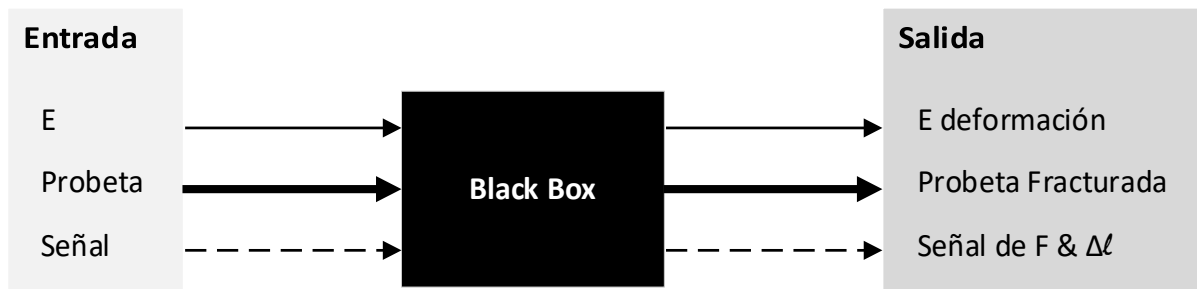
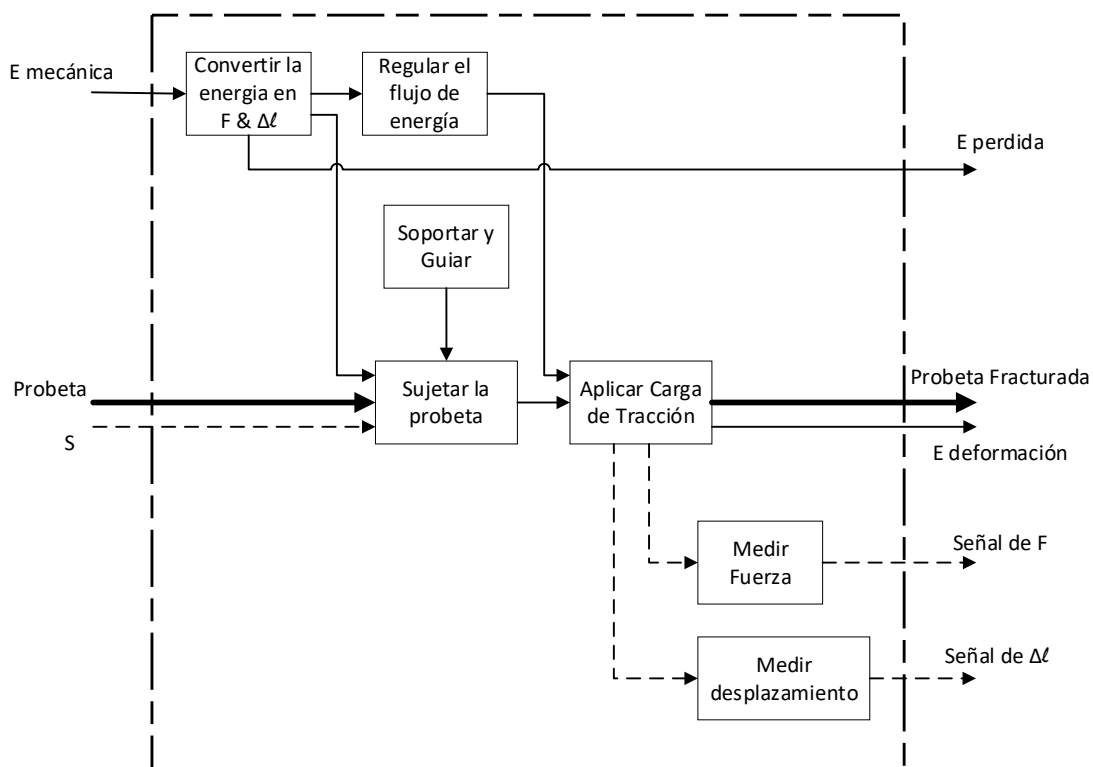
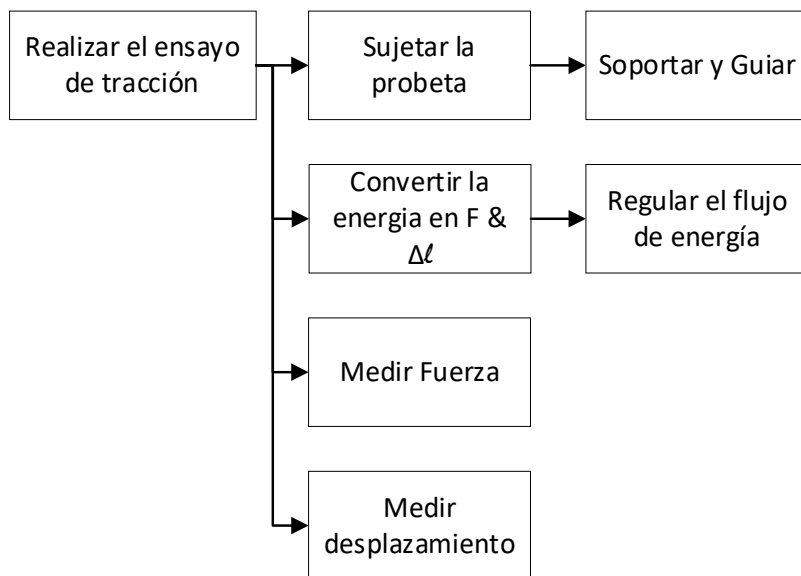
Figura 3-1*Black Box**Nota: Black box o caja negra.***Figura 3-2***Caja transparente “White Box”*

Figura 3-3*Árbol de funciones*

Nota: De acuerdo a la directriz VDI 2803.

3.3.2 Buscar los principios de solución y sus estructuras

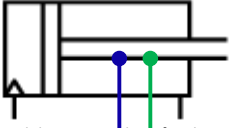
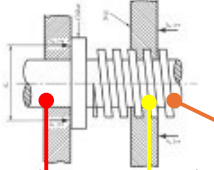
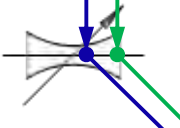
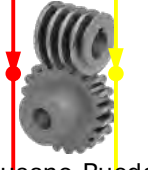
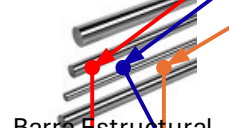
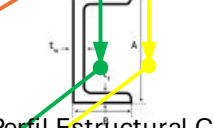
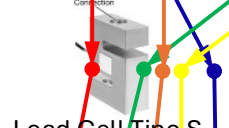
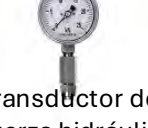
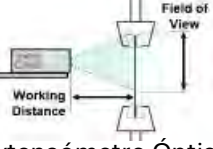
En esta actividad se buscan principios efectivos para las funciones parciales, la combinación de estos principios genera estructuras que describen la función general. El método de caja morfológica es recomendado para obtener una o varias estructuras funcionales del producto que se va a diseñar. El resultado de esta actividad se puede documentar verbalmente, con bocetos, dibujos o modelos que reflejen la arquitectura lógica del producto (VDI, 2024a).

En la **Figura 3-4**, se presenta la caja morfológica de la cual se obtienen 5 principios de solución que se detallan subsecuentemente de las imágenes de la caja morfológica y la presentación de los bocetos de los conceptos de solución preliminares.

A partir de la caja morfológica se obtienen cinco conceptos de solución, los cuales se presentan y describen gráficamente en bocetos (ver **Figura 3-5**) que detallan sus componentes, configuración y disposición.

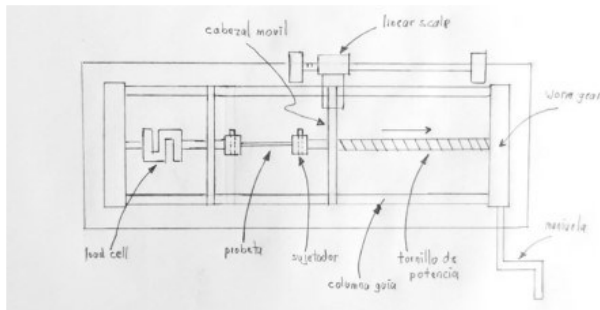
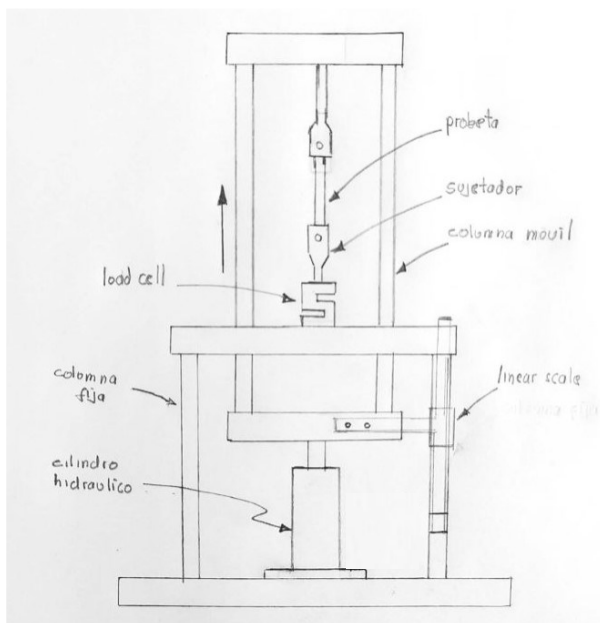
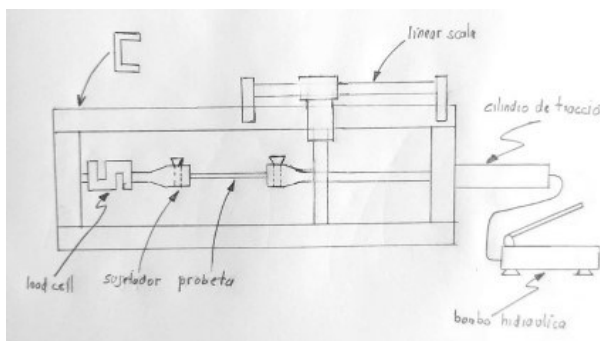
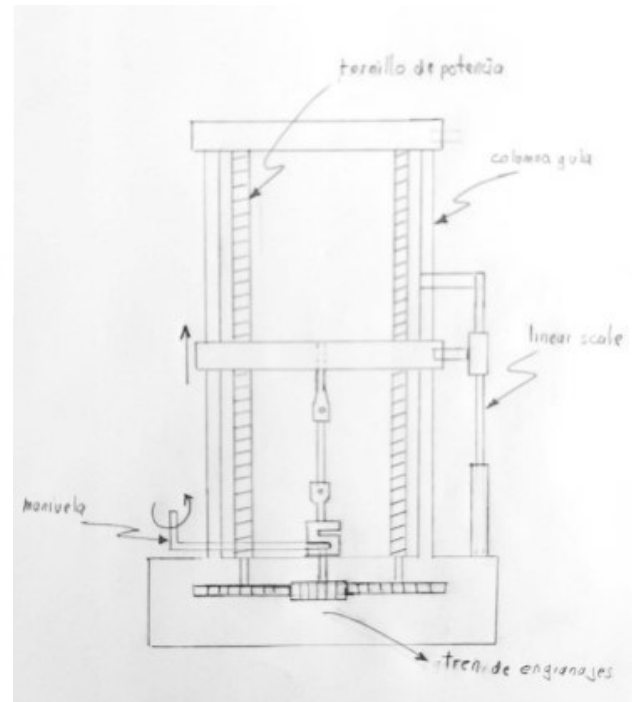
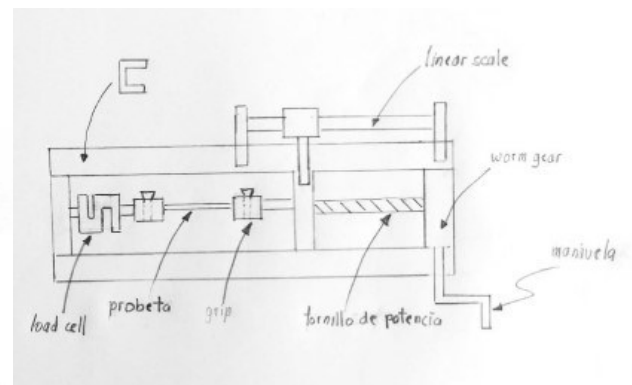
Figura 3-4

Caja morfológica

Soluciones		1	2	3	4
Sub funciones					
1	Convertir la energía en F & Δ	 Cilindro Hidráulico	 Tornillo de Potencia	 Piñon-Cremallera	
	Regular el flujo de energía	 Válvula	 Gusano-Rueda	 Engranaje Planetario	 Engranajes Rectos
2	Sujetar la probeta	 Sujetador tipo cuña	 Sujetador tipo pin		
	Soportar y Guiar	 Barra Estructural	 Perfil Estructural C		
3	Medir Fuerza	 Load Cell Tipo S	 Load Cell Circular	 Transductor de fuerza hidráulico	
4	Medir desplazamiento	 Linear Scale	 Dial Indicator	 Extensómetro Óptico	 Extensómetro Clip-on

S1 S3 S2 S4 S5

Nota: S1 ► rojo, S2 ► azul, S3 ► verde, S4 ► anaranjado y S5 ► amarillo.

Figura 3-5*Bocetos de los conceptos de solución***► Solución 1****► Solución 2****► Solución 3****► Solución 4****► Solución 5***Nota: Representación gráfica de los conceptos de solución obtenidos de la caja morfológica.*

Los conceptos de solución encontrados a partir de la caja morfológica se identifican con claridad por el accionamiento que poseen. S1 (mecánico)→ tornillo de potencia + gusano – rueda + sujetador tipo pin + barras de acero + sensor de fuerza tipo S + sensor de desplazamiento tipo DRO. S2 (hidráulico) → cilindro hidráulico + regulador + sujetador tipo pin + barras de acero – sensor tipo s + sensor de desplazamiento tipo DRO. S3 (hidráulico)→cilindro hidráulico + regulador + sujetador tipo pin + perfil tipo c + sensor de fuerza tipo S + sensor de desplazamiento tipo DRO. S4 (mecánico)→ tornillo de potencia + engranajes rectos + barras de acero + sensor de fuerza tipo S+ sensor de desplazamiento tipo DRO. S5 (mecánico)→ tornillo de potencia + gusano – rueda + sujetador tipo pin+ perfil C + sensor de fuerza tipo S + sensor de desplazamiento tipo DRO.

3.3.3 *Evaluar y seleccionar los conceptos de solución*

La comparación continua de los resultados obtenidos en cada actividad con los requerimientos limita la cantidad de posibles soluciones, sin embargo, es necesario definir un criterio o método de evaluación apropiado (VDI, 2024a). La directriz VDI 2225, permite evaluar los conceptos de solución de acuerdo a criterios técnicos y económicos los cuales se evalúan asignando pesos ponderados a los criterios y asignando una puntuación de 0 a 4 a cada uno, siendo 4 la puntuación ideal (ver **Tabla 3-4** y **Tabla 3-5**) (VDI, 1998). Los criterios de evaluación se deben escribir en forma positiva. Los pesos ponderados se obtienen de acuerdo al método de ponderación por procedimiento de clasificación asignando valores de 0 a 2, siendo 2 el más importante (Skolaut, 2014) (ver **Tabla 3-2** y **Tabla 3-3**).

En la **Figura 3-6**, se presenta el diagrama de intensidad “*s-Diagramm*”, con el método de la línea y la hipérbola. La correlación de las soluciones se denomina intensidad “*Stärke-s*” (VDI, 1998, p. 10) y se ubican en coordenadas: horizontal (técnico) y vertical (económico). El método

hiperbólico es preferible, dado que compensa de forma óptima las grandes variaciones entre los valores técnicos y económicos por su carácter reductor progresivo (Feldhusen & Grote, 2013).

Tabla 3-2

Ponderación por procedimiento de clasificación técnico

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	SUMA	Pond. rel. (W)
A1		0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7	0.06
A2	2		1	1	2	2	1	2	1	2	2	16	0.14
A3	2	1		1	2	2	1	2	1	2	2	16	0.14
A4	1	1	1		2	2	1	2	1	2	2	15	0.13
A5	1	0	0	0		1	1	1	1	1	1	7	0.06
A6	2	1	1	1	1		1	1	1	2	1	12	0.10
A7	2	1	1	1	2	1		1	1	2	1	13	0.11
A8	1	0	0	0	1	1	1		1	2	1	8	0.07
A9	2	1	1	1	2	1	1	1		2	1	13	0.11
A10	1	0	0	0	1	0	0	0	1		0	3	0.03
A11	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2		8	0.07
SUMA												118	1.00

Nota: Los valores de A, corresponden a los criterios de evaluación, los cuales son técnicos o económicos para cada ponderación.

Tabla 3-3

Ponderación por procedimiento de clasificación económico

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	SUMA	Pond. rel. (W)
A1		1	0	0	0	1	1	1	4	0.07
A2	1		0	0	1	0	1	1	4	0.07
A3	2	1		1	1	1	2	1	9	0.16
A4	2	2	1		1	1	1	1	9	0.16
A5	1	1	1	1		1	2	1	8	0.15
A6	2	2	1	1	1		2	1	10	0.18
A7	1	1	0	0	0	1		0	3	0.05
A8	1	1	1	1	1	1	2		8	0.15
SUMA									55	1

Nota: Ponderación por procedimiento de clasificación (2 es “más importante que”, 1 es “igualmente importante” y 0 es “menos importante”)

Tabla 3-4*Evaluación técnica*

Evaluación técnica														
Nro.	Criterios de Evaluación	w	S1		S2		S3		S4		S5		SI (I)	
			p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p
1	Geometría compacta	0.06	3	0.178	2	0.119	2	0.119	2	0.119	3	0.178	4	0.24
2	Velocidad constante	0.14	3	0.407	2	0.271	2	0.271	3	0.407	3	0.407	4	0.54
3	Fuerza constante	0.14	3	0.407	2	0.271	2	0.271	3	0.407	3	0.407	4	0.54
4	Energía de accionamiento	0.13	3	0.381	3	0.381	3	0.381	3	0.381	3	0.381	4	0.51
5	Menor número de componentes	0.06	2	0.119	3	0.178	2	0.119	1	0.059	2	0.119	4	0.24
6	Menor grado de complejidad de diseño	0.10	2	0.203	3	0.305	2	0.203	2	0.203	2	0.203	4	0.41
7	Manufactura convencional	0.11	2	0.220	3	0.331	3	0.331	2	0.220	2	0.220	4	0.44
8	Uso de componentes estándar	0.07	2	0.136	3	0.203	3	0.203	2	0.136	2	0.136	4	0.27
9	Diseño modular	0.11	2	0.220	3	0.331	3	0.331	1	0.110	2	0.220	4	0.44
10	Peso < 50 kg	0.03	3	0.076	3	0.076	3	0.076	3	0.076	3	0.076	4	0.10
11	Bajo mantenimiento y facilidad reparación	0.07	2	0.136	3	0.203	3	0.203	2	0.136	2	0.136	4	0.27
	Suma	1.0		2.483		2.669		2.508		2.254		2.483		4
	Valor Técnico^b			0.621		0.667		0.627		0.564		0.621		1

Nota: ^b 0.8 "muy bueno", 0.7 "bueno" y menos de 0.6 "insatisfactorio".

Tabla 3-5*Evaluación económica*

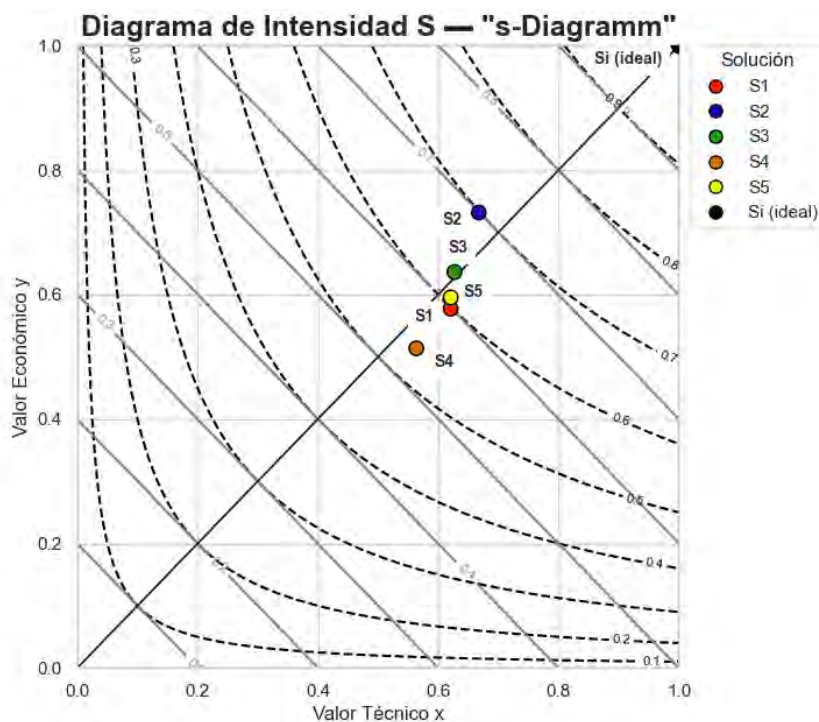
Evaluación económica														
Nro.	Criterios de Evaluación	w	S1		S2		S3		S4		S5		SI (I)	
			p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p	p	w×p
1	Geometría compacta	0.07	3	0.218	2	0.145	2	0.145	2	0.145	3	0.218	4	0.29
2	Menor número de componentes	0.07	2	0.145	3	0.218	2	0.145	2	0.145	3	0.218	4	0.29
3	Menor grado de complejidad de diseño	0.16	2	0.327	3	0.491	2	0.327	2	0.327	2	0.327	4	0.65
4	Manufactura convencional	0.16	2	0.327	3	0.491	3	0.491	2	0.327	2	0.327	4	0.65
5	Uso de componentes estándar	0.15	2	0.291	3	0.436	3	0.436	2	0.291	2	0.291	4	0.58

6	Diseño modular	0.18	3	0.545	3	0.545	3	0.545	2	0.364	3	0.545	4	0.73
7	Peso < 50 kg	0.05	3	0.164	3	0.164	3	0.164	3	0.164	3	0.164	4	0.22
8	Costo	0.15	2	0.291	3	0.436	2	0.291	2	0.291	2	0.291	4	0.58
	Suma	1.0		2.309		2.927		2.545		2.055		2.382		4.0
	Valor Económico ^c			0.577		0.732		0.636		0.514		0.595		1.0

Nota: ^c ≥ 0.7 “buen resultado”, < 0.7 “examinar o compensar incrementando el valor técnico.”

Figura 3-6

Diagrama de Intensidad S, “s-Diagramm” VDI 2225



Nota: El valor máximo de la media geométrica (intensidad $S = \sqrt{x \cdot y} = 0.7$) corresponde a la solución número 2. En el diagrama, la solución 2 presenta una ligera tendencia económica; no obstante, su ubicación coincide con la línea y la hipérbola de 0.7. Si bien no se encuentra sobre la línea de 45°, llamada “línea de diseño” (VDI, 1998), se considera una solución equilibrada.

Adicionalmente la directriz 2221 (VDI, 2024a), señala que la mayoría de evaluaciones no están libres de influencias subjetivas e incluso si se utilizan métodos que utilizan procedimientos matemáticos como la directriz VDI 2225 los resultados se deben cuestionar frecuentemente y no

ser aceptados dogmáticamente como algo que no se pueda cambiar. En el caso de obtener resultados con valores muy cercanos es aceptado aplicar la experiencia y la intuición. Un enfoque para tomar la decisión sobre el concepto de solución seleccionado es el diseño para la manufactura y el ensamblaje DFMA, dado que el valor de la solución 2 es significativamente más alto, no se requiere de su aplicación sistemática por lo que se aplicó implícitamente en los criterios de evaluación y se decide continuar con el diseño mecánico.

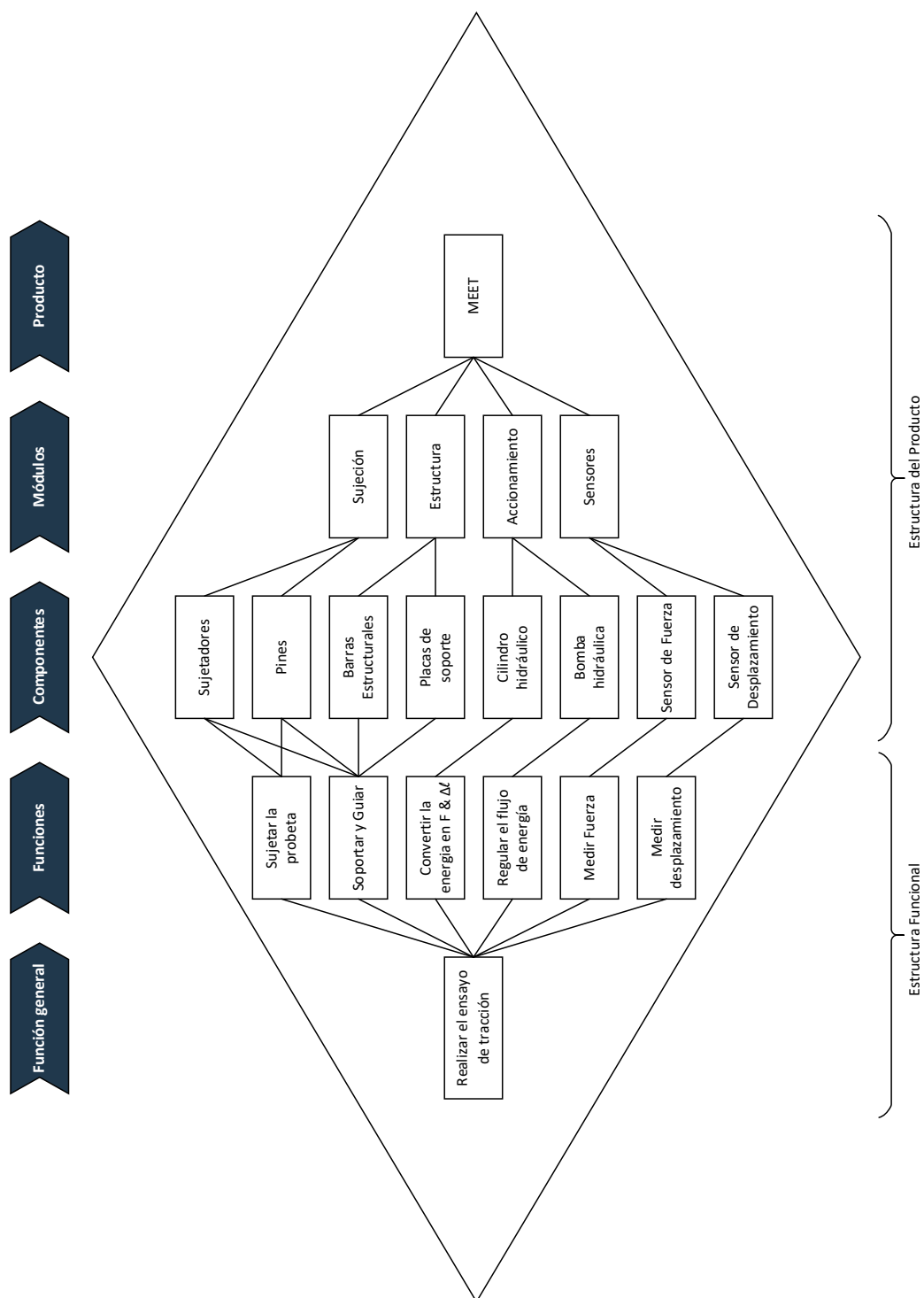
3.4 Fase 4 - Concepto (Diseño):

La fase 4 se denomina “concepto” (VDI, 2024b), sin embargo, con el objetivo de brindar mayor claridad, se ha optado por denominarla “Diseño”, dado que este término se adecúa mejor a las actividades que se desarrollarán. En esta fase se concretan y modularizan los conceptos de solución seleccionados, y también se integra completamente el producto. En adición se ven los detalles o especificaciones de la fabricación del prototipo (VDI, 2024a).

3.4.1 Estructurar en módulos, definir interfases

Después de seleccionar el concepto de solución se define la arquitectura del sistema o arquitectura del producto, este método permite identificar la relación de las funciones con los componentes y la agrupación de los mismos en módulos o subsistemas que forman el producto (VDI, 2024a). También nos permite identificar si el producto tiene un diseño modular cuando se observa que los componentes forman módulos independientes entre sí o un diseño integrado o integral cuando los módulos tienen presentan un módulo único o módulos dependientes que comparten muchos componentes entre sí (Feldhusen & Grote, 2013).

En la **Figura 3-7** se presenta la arquitectura del sistema del módulo educativo de ensayo de tracción, en el cual se observa una arquitectura bastante modular identificándose claramente los módulos o subsistemas que forman el producto.

Figura 3-7*Arquitectura del sistema**Nota: Arquitectura del sistema en forma de diamante.*

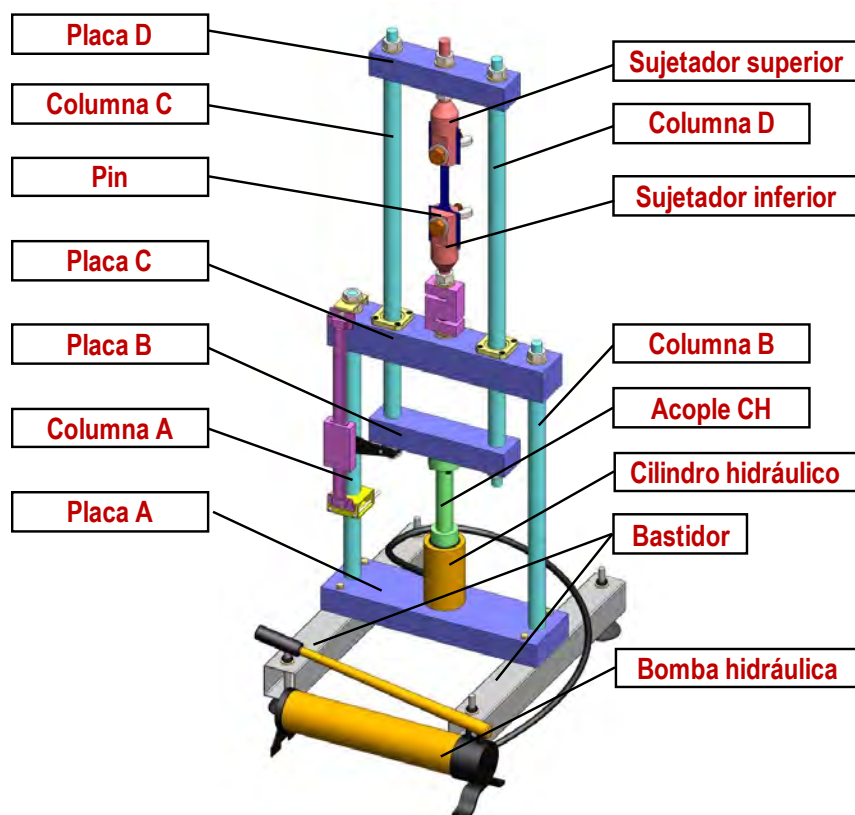
3.4.2 Diseñar los módulos

El avance en la concretización o implementación de los módulos se realiza en esta actividad. Se avanza con la geometría, la selección de materiales de ingeniería y la tecnología de la información en el grado que sea posible identificar y seleccionar un diseño optimo. Aquí se habla de un diseño preliminar o diseño aproximado, pero el resultado de esta actividad se conoce como “diseños parciales” y se pueden presentar en forma de dibujos, modelos CAD, diagramas y otros que describan detalladamente los módulos para la optimización del producto (VDI, 2024a).

Los módulos a diseñar y/o seleccionar del módulo educativo de ensayo de tracción comprenden la sujeción, la estructura, el accionamiento y los sensores, y estos, a su vez, a sus respectivos componentes. La **Figura 3-8**, ilustra los componentes a diseñar del producto técnico.

Figura 3-8

Componentes a diseñar



3.4.2.1 Módulo de sujeción

En este módulo se presenta el cálculo del sistema de sujeción de probeta.

▪ **Cálculo del sujetador de probeta:**

Calculo basado en esfuerzo de compresión o apoyo (ver **Figura 3-9**):

$$\sigma_b = \frac{F_B}{A_B} \quad (3.4)$$

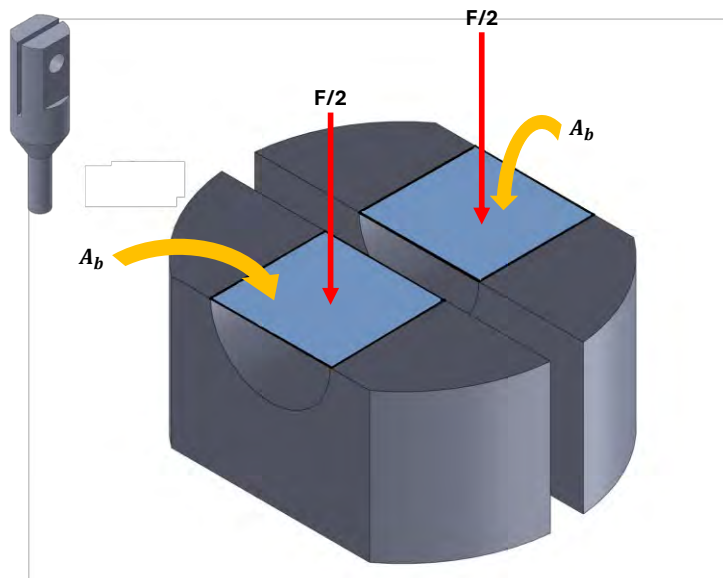
$$\sigma_b = \frac{P / 2}{A_B}$$

$$\sigma_b = \frac{10 \times 10^3}{(13 \times 10^{-3})(14 \times 10^{-3})}$$

$$\sigma_b = 54.9 \text{ MPa}$$

Figura 3-9

DCL en la zona del pin



Cálculo del factor de seguridad:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS} \quad (3.5)$$

$$FS = \frac{250}{54.9}$$

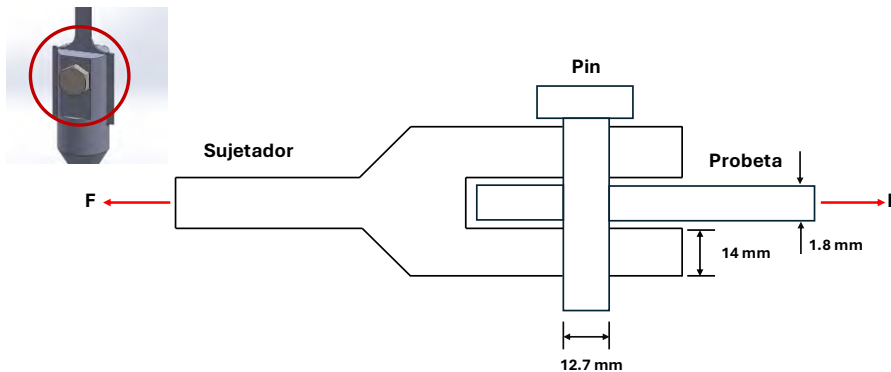
$$FS = 4.6$$

▪ Cálculo del pin:

La carga de trabajo que se aplica en el pin es de 20000 N (ver **Figura 3-10**), a su vez el pin experimenta las reacciones debido a los apoyos en el sujetador (**Figura 3-11**).

Figura 3-10

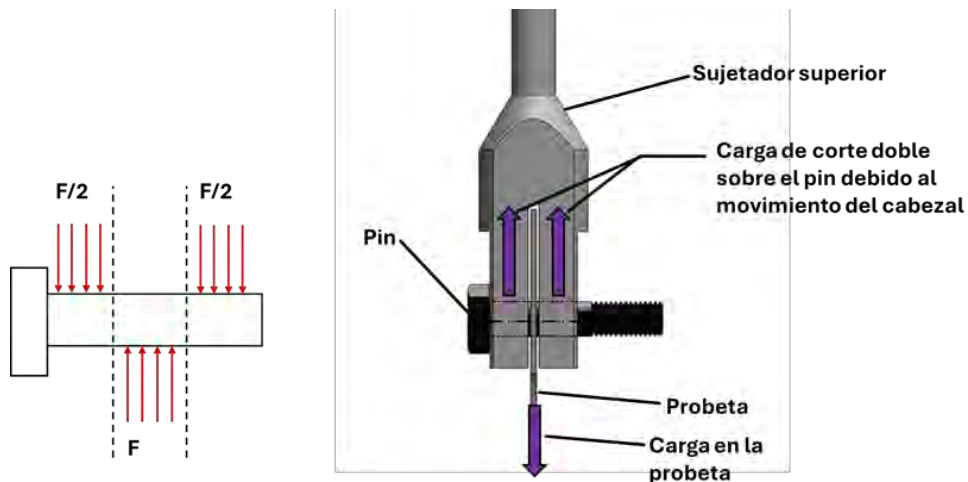
DCL (sujetador de probeta - pin)



Cálculo del momento máximo en el pin:

Figura 3-11

DCL del pin



Cálculo basado en el esfuerzo máximo por flexión (ver **Figura 3-12**):

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}c}{I} \quad (3.6)$$

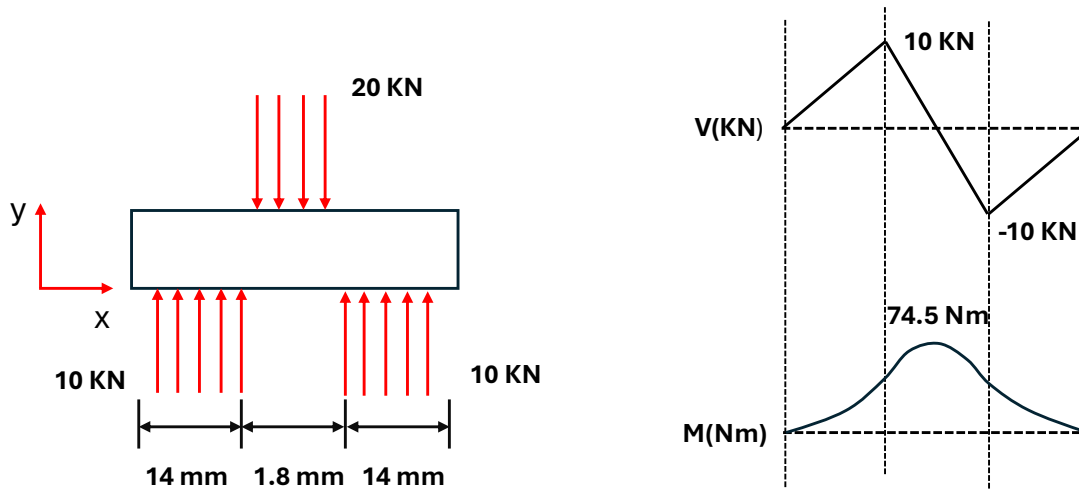
$$\sigma_{max} = \frac{32M_{max}}{\pi d^3}$$

$$\sigma_{max} = \frac{32 \times 74.5}{\pi(12.7 \times 10^{-3})^3}$$

$$\sigma_{max} = 370.46 \text{ MPa}$$

Figura 3-12

Diagrama de fuerza cortante y de momento flector en el pin



El factor de seguridad será:

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}} \quad (3.7)$$

$$FS = \frac{896}{370.46}$$

$$FS = 2.42$$

O también:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_y; \sigma_y = 896 \text{ MPa} \quad (3.8)$$

$$370.46 \text{ MPa} \leq 896 \text{ MPa}$$

Calculo basado en el esfuerzo cortante directo:

$$\tau_{max} = \frac{P}{A} \quad (3.9)$$

$$\tau_{max} = \frac{4V}{\pi d^2}$$

$$\tau_{max} = \frac{4(10 \times 10^3)}{\pi(12.7 \times 10^{-3})^2}$$

$$\tau_{max} = 78.9 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante directo admisible será:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.10)$$

$$\tau_y = \frac{896}{2}$$

$$\tau_y = 448 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_y \quad (3.11)$$

$$75.34 \text{ MPa} \leq 448 \text{ MPa}; \text{ o } FS = 5.94$$

Cálculo basado en el esfuerzo cortante transversal:

$$\tau_{max} = \frac{4V}{3A} \quad (3.12)$$

$$\tau_{max} = \frac{16V}{3\pi d^2}$$

$$\tau_{max} = \frac{16(10 \times 10^3)}{3(\pi)(12.7 \times 10^{-3})^2}$$

$$\tau_{max} = 105.26 \text{ MPa}$$

Entonces:

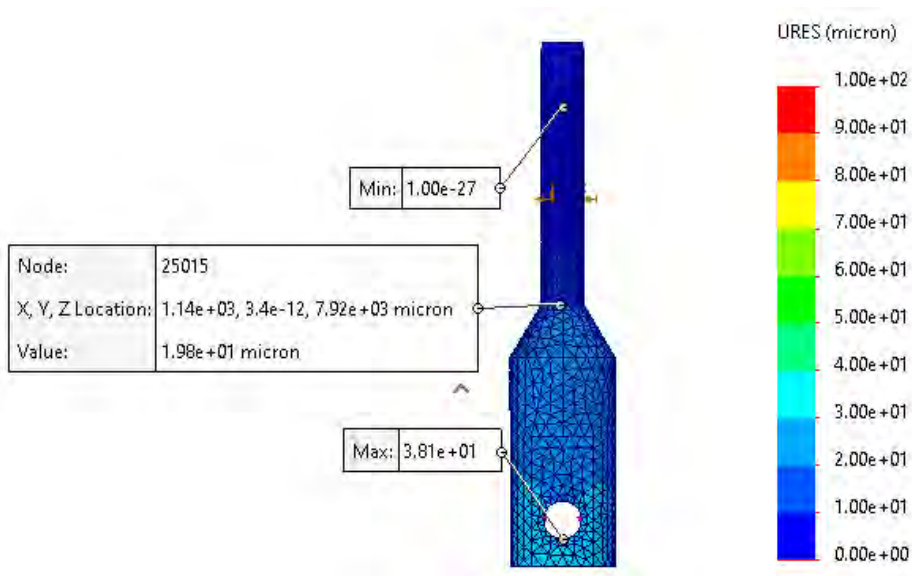
$$\tau_{max} \leq \tau_y \quad (3.13)$$

$$105.26 \text{ MPa} \leq 448 \text{ MPa}; FS = 4.26$$

Análisis CAE del sujetador de probeta: El análisis de deflexión en SolidWorks permite identificar el máximo valor en μm que corresponde a 38.1 en la zona inferior de apoyo del pin. En la **Figura 3-13**, se observa la deflexión en el cambio de sección del sujetador igual a 19.8 μm . Los valores encontrados de deflexión indican un valor aceptable para la carga de diseño 20 kN.

Figura 3-13

Gráfico de análisis de deflexión en el sujetador



Nota: 1 μm = 0.001 mm.

3.4.2.2 Módulo de la estructura

La estructura comprende a las barras y las placas de soporte que forman principalmente la estructura del módulo educativo de ensayo de tracción (ver **Figura 3-14**).

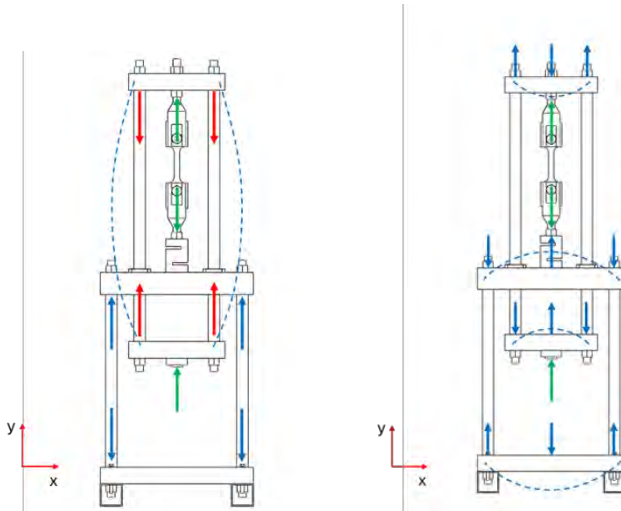
- **Cálculo de las barras:**

Barra fija A y B

Las barras fijas A y B se calculan como elementos sometidos a compresión como un estado crítico. En la **Figura 3-15**, se detalla la aplicación de las fuerzas en compresión como estado crítico y sus parámetros técnicos de diseño.

Figura 3-14

Análisis de fuerzas actuantes y deformaciones sobre las barras y las placas.

**Figura 3-15**

DCL de la barra móvil A y B con parámetros de diseño.

a) DCL**b) Datos – Barras A y B**

Carga aplicada	: P = 10 kN
Longitud	: L= 542 mm
Material	: ASTM A36
Esfuerzo de fluencia	: S _y = 250 MPa
Módulo de Elasticidad	: E= 200 GPa
Perfil	: Solido circular

Se aplica tentativamente la relación de Euler con la siguiente ecuación:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (3.14)$$

Donde:

$I = A\rho^2$: Momento de inercia de la sección [m⁴].

$A = \pi D^2 / 4$: Área de la sección [m²].

$\rho = D / 4$: Radio de giro [m].

$P = 10000 \text{ N} * n$: Carga de diseño [N], con $n = 3$.

$K = 1$: Valor de K para la longitud efectiva de extremo final tipo articulado-articulado (Mott et al., 2017, p. 221)

$L_e = KL$: Longitud equivalente de columna [mm].

$\rightarrow L_e = 542 \text{ mm}$

Entonces se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L_e / \rho)^2} \quad (3.15)$$

$$\frac{10000 \times 3}{\pi D^2 / 4} = \frac{\pi^2 (200 \times 10^9)}{(542 \times 10^{-3} / \frac{D}{4})^2}$$

$$D = 0.01737 \text{ m}$$

$$D = 17.37 \text{ mm}$$

Aplicando la relación de esbeltez con el diámetro calculado:

$$\lambda = \frac{L_e}{\rho} \quad (3.16)$$

$$\lambda = \frac{600 * 10^{-3}}{0.01737 / 4}$$

$$\lambda = 138.17$$

Calculando la constante de columna:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (3.17)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2(200 \times 10^9)}{250 \times 10^6}}$$

$$C_c = 125.66$$

Entonces se tiene que:

$\lambda > C_c$; la columna es larga y se puede aplicar la relación de Euler.

Por lo tanto, el diámetro es $D = 17.37 \text{ mm}$

El resultado obtenido de acuerdo con el cálculo es $D = 17.37 \text{ mm}$, sin embargo, considerando la disponibilidad del material y la manufactura, se opta por un diámetro de 25 mm.

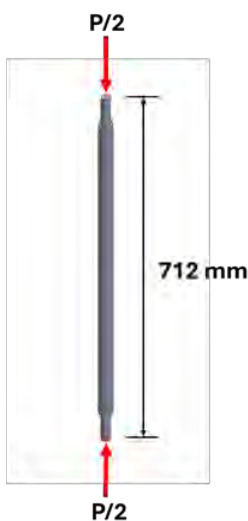
Barra móvil C – D

En la **Figura 3-16**, se describe los datos técnicos de la barra móvil C y D, con las fuerzas actuantes sobre la barra.

Figura 3-16

DCL de la barra móvil C y D con datos técnicos

a) DCL



b) Datos - Barras C y D

Carga aplicada	: $P = 10 \text{ kN}$
Longitud	: $L = 712 \text{ mm}$
Material	: ASTM A36
Esfuerzo de fluencia	: $S_y = 250 \text{ MPa}$
Módulo de Elasticidad	: $E = 200 \text{ GPa}$
Perfil	: Sólido circular

Aplicando tentativamente la relación de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (3.18)$$

Donde:

$$I = A\rho^2 \quad : \text{Momento de inercia de la sección [m}^4\text{].}$$

$$A = \pi D^2 / 4 \quad : \text{Área de la sección [m}^2\text{].}$$

$$\rho = D/4 \quad : \text{Radio de giro [m].}$$

$$P = 10000 \text{ N} * n \quad : \text{Carga de diseño [N], con } n = 3.$$

$$K = 1 \quad : \text{Valor de K para la longitud efectiva de extremo final tipo articulado-articulado (Mott et al., 2017, p. 221)}$$

$$L_e = KL \quad : \text{Longitud equivalente de columna [mm].}$$

$$\rightarrow L_e = 712 \text{ mm}$$

Entonces se tiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L_e / \rho)^2} \quad (3.19)$$

$$\frac{10000 \times 3}{\pi D^2 / 4} = \frac{\pi^2 (200 \times 10^9)}{\left(712 \times 10^{-3} / \frac{D}{4}\right)^2}$$

$$D = 0.0199 \text{ m}$$

$$D = 19.9 \text{ mm}$$

Aplicando la relación de esbeltez con el diámetro calculado:

$$\lambda = \frac{L_e}{\rho} \quad (3.20)$$

$$\lambda = \frac{712 \times 10^{-3}}{0.0199/4}$$

$$\lambda = 143.12$$

Calculando la constante de columna:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (3.21)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 (200 \times 10^9)}{250 \times 10^6}}$$

$$C_c = 125.66$$

Entonces se tiene:

$\lambda > C_c$; la columna es larga y se puede aplicar la relación de Euler.

Por lo tanto, el diámetro es $D = 19.9 \text{ mm}$

Se decide un diámetro nominal: $D = 25 \text{ mm}$ para las barras fijas y móviles, siendo estas últimas las de mayor longitud. Además, se tienen en cuenta los diámetros nominales de los rodamientos lineales disponibles comercialmente, entre los que se encuentran los de 20 y 25 mm. Dado que el diámetro mayor obtenido es de 19.9 mm , se opta por un diámetro nominal de 25 mm .

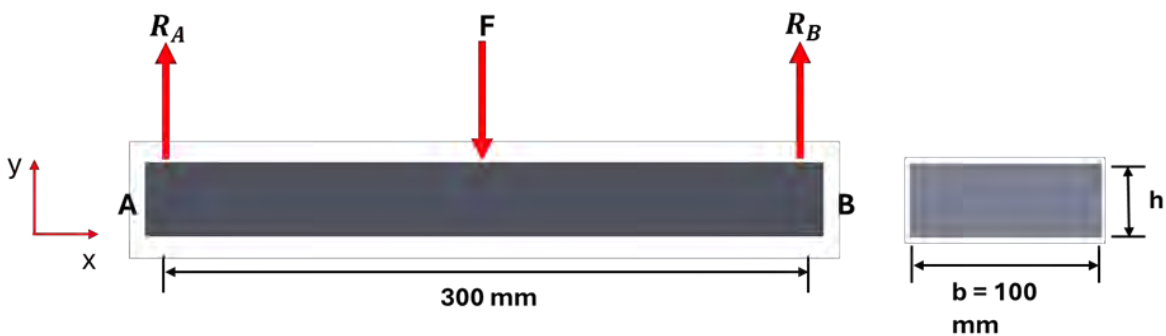
▪ Cálculo de las placas de soporte:

Análisis de fuerzas actuantes y deformaciones sobre las placas.

Placa A

Figura 3-17

DCL placa A



Ecuaciones de equilibrio:

Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.22)$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A + R_B = 20$$

Sumatoria de momentos con respecto al nodo B:

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3.23)$$

$$-R_A(300 \times 10^{-3}) + F\left(\frac{300}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$-R_A(300 \times 10^{-3}) + 20\left(\frac{300}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$R_A = 10 \text{ KN}$$

$$R_B = 10 \text{ KN}$$

Diagrama de fuerza cortante y de momento flector (ver **Figura 3-18**):

Cálculo del esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}Y}{I}; M_{max} = 1500 \text{ Nm}; Y = \frac{h}{2}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.24)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1500\left(\frac{h}{2}\right)}{\frac{1}{12}(100 \times 10^{-3})(h^3)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{90000}{h^2}$$

Esfuerzo de flexión admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS}; FS = 2 \quad (3.25)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{250}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 125 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo de flexión máximo y el cálculo de la altura mínima:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm} \quad (3.26)$$

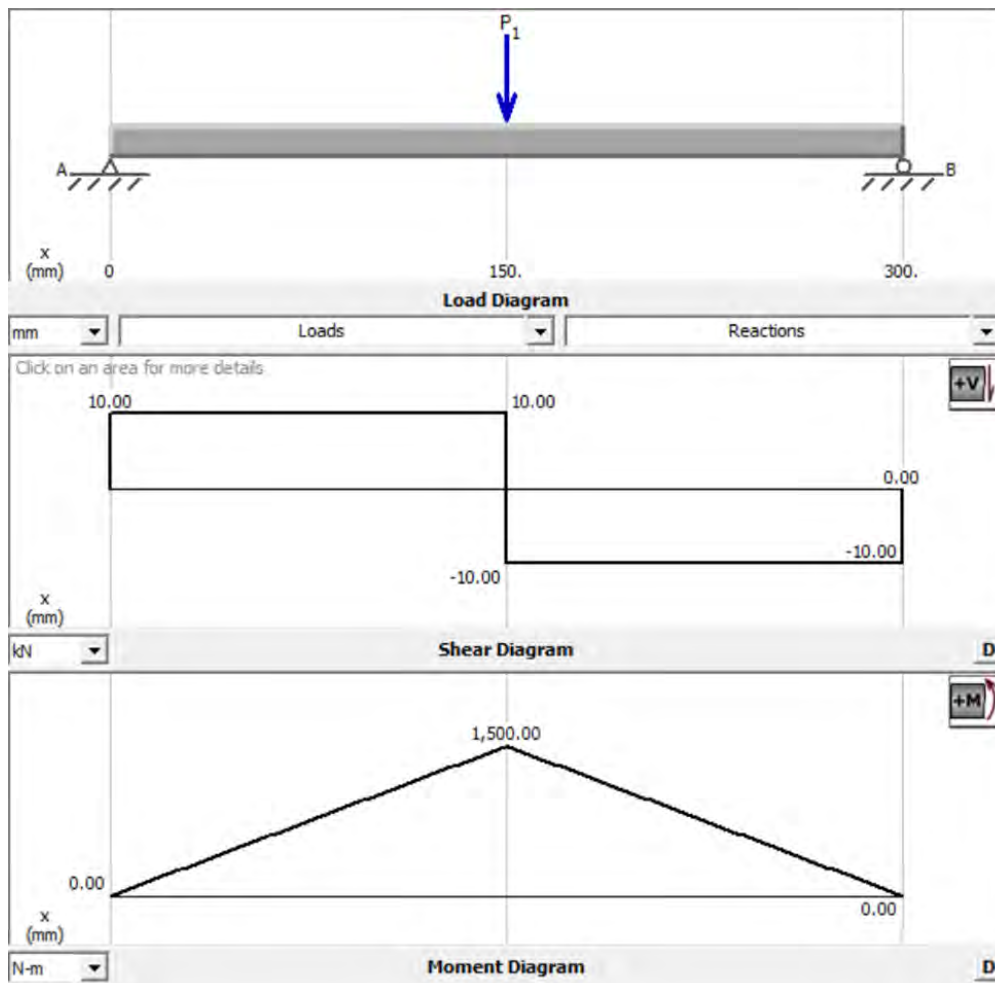
$$\frac{90000}{h^2} \leq 125 \times 10^6$$

$$h \geq 0.0268 \text{ m}$$

$$h \geq 26.8 \text{ mm}$$

Figura 3-18

Diagrama de fuerza cortante y de momento flector en la placa A



Verificamos el esfuerzo cortante:

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}; A = b \times h; h = 26.8 \text{ mm} \quad (3.27)$$

$$\tau_{max} = \frac{3(10 \times 10^3)}{2(100 \times 10^{-3} \times 26.8 \times 10^{-3})}$$

$$\tau_{max} = 5.6 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante de fluencia:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.28)$$

$$\tau_y = \frac{250}{2}$$

$$\tau_y = 125 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante admisible será:

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{2} \quad (3.29)$$

$$\tau_{adm} = 62.5 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.30)$$

$$5.6 \text{ MPa} \leq 62.5 \text{ MPa}$$

Comprobación de la deformación máxima por deflexión con las dimensiones calculadas:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}; P = 20 \text{ kN}; L = 300 \times 10^{-3} \text{ m}; E = 200 \text{ GPa}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.31)$$

$$\delta_{max} = \frac{(20 \times 10^3)(300 \times 10^{-3})^3}{48(200 \times 10^9)(\frac{1}{12} \times 100 \times 10^{-3} \times (26.8 \times 10^{-3})^3)}$$

$$\delta_{max} = 0.35 \text{ mm}$$

Además:

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}; \delta_{adm} = \frac{L}{800} \quad (3.32)$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{800}$$

$$\delta_{adm} = \frac{300}{800}$$

$$\delta_{adm} = 0.375 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}$$

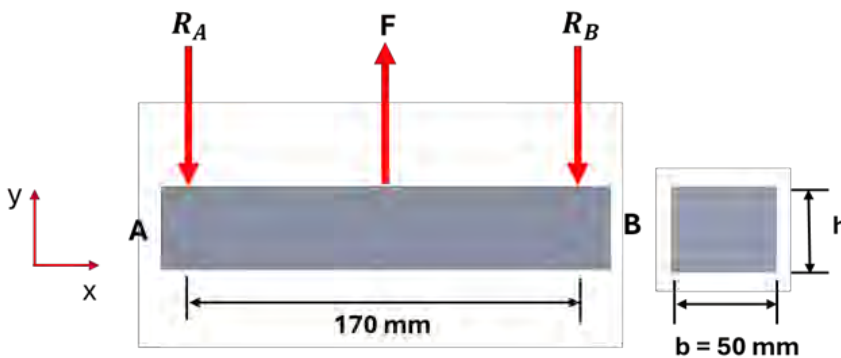
$$0.35 \text{ mm} \leq 0.375 \text{ mm}$$

El resultado obtenido de acuerdo al cálculo es: $h \geq 26.8 \text{ mm}$; sin embargo, considerando la disponibilidad del material se decide $h = 38.1 \text{ mm}$, recalculando $\delta_{max} = 0.12 \text{ mm}$.

Placa B

Figura 3-19

DCL placa B



Ecuaciones de equilibrio:

Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.33)$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A + R_B = 20$$

Sumatoria de momentos con respecto al nodo B:

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3.34)$$

$$-R_A(170 \times 10^{-3}) + F\left(\frac{170}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

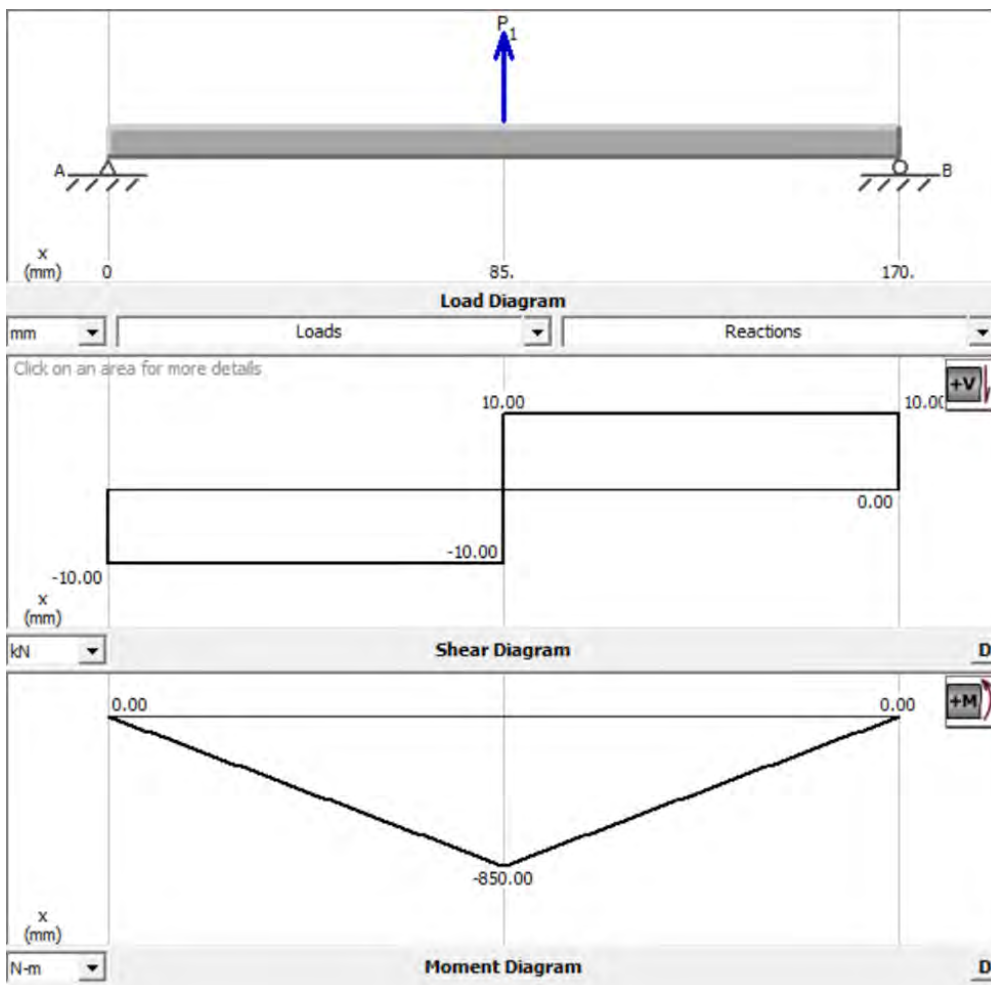
$$-R_A(170 \times 10^{-3}) + 20\left(\frac{170}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$R_A = 10 \text{ KN}$$

$$R_B = 10 \text{ KN}$$

Figura 3-20

Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa B



Cálculo del esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}Y}{I}; M_{max} = 850 \text{ Nm}; Y = \frac{h}{2}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.35)$$

$$\sigma_{max} = \frac{850(\frac{h}{2})}{\frac{1}{12}(50 \times 10^{-3})(h^3)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{102000}{h^2}$$

Esfuerzo de flexión admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS}; FS = 2 \quad (3.36)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{250}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 125 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo de flexión máximo y cálculo de la altura mínima:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm} \quad (3.37)$$

$$\frac{102000}{h^2} \leq 125 \times 10^6$$

$$h \geq 0.02857 \text{ m}$$

$$h \geq 28.57 \text{ mm}$$

Verificando el esfuerzo cortante:

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}; A = b \times h; h = 28.57 \text{ mm} \quad (3.38)$$

$$\tau_{max} = \frac{3(10 \times 10^3)}{2(50 \times 10^{-3})(28.57 \times 10^{-3})}$$

$$\tau_{max} = 10.5 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante de fluencia:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.39)$$

$$\tau_y = \frac{250}{2}$$

$$\tau_y = 125 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante admisible será:

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{2} \quad (3.40)$$

$$\tau_{adm} = 62.5 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.41)$$

$$10.5 \text{ MPa} \leq 62.5 \text{ MPa}$$

Comprobación de la deformación máxima por deflexión con las dimensiones calculadas:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}; P = 20 \text{ kN}; L = 170 \times 10^{-3} \text{ m}; E = 200 \text{ GPa}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.42)$$

$$\delta_{max} = \frac{(20 \times 10^3)(170 \times 10^{-3})^3}{48(200 \times 10^9)(\frac{1}{12} \times 50 \times 10^{-3} \times (28.57 \times 10^{-3})^3)}$$

$$\delta_{max} = 0.11 \text{ mm}$$

Asimismo:

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}; \delta_{adm} = \frac{L}{800} \quad (3.43)$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{800}$$

$$\delta_{adm} = \frac{170}{800}$$

$$\delta_{adm} = 0.213 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}$$

$$0.11 \text{ mm} \leq 0.213 \text{ mm}$$

El resultado obtenido de acuerdo al cálculo es: $h \geq 28.57 \text{ mm}$ sin embargo considerando la disponibilidad del material y manufactura se decide $h = 38.1 \text{ mm}$ ($\delta_{max} = 0.044 \text{ mm}$)

Placa C

Figura 3-21

Configuración de la placa C

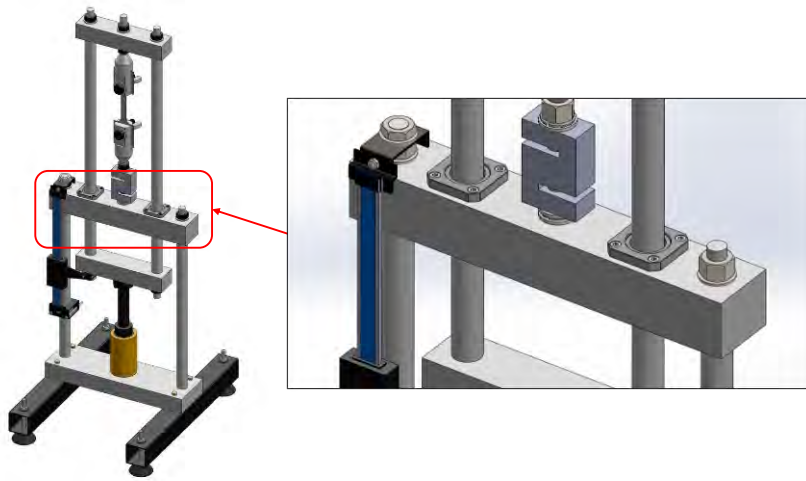
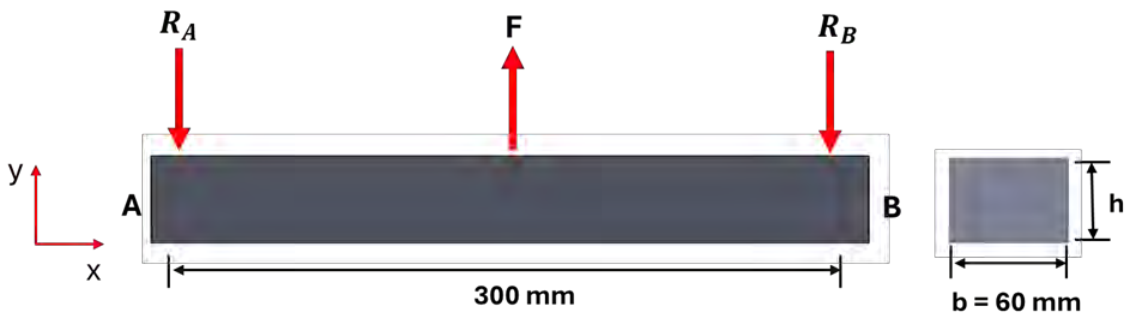


Figura 3-22

DCL placa C



Ecuaciones de equilibrio:

Sumatoria de fuerzas en dirección vertical:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.44)$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A + R_B = 20$$

Sumatoria de momentos con respecto al nodo B:

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3.45)$$

$$-R_A(300 \times 10^{-3}) + F\left(\frac{300}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

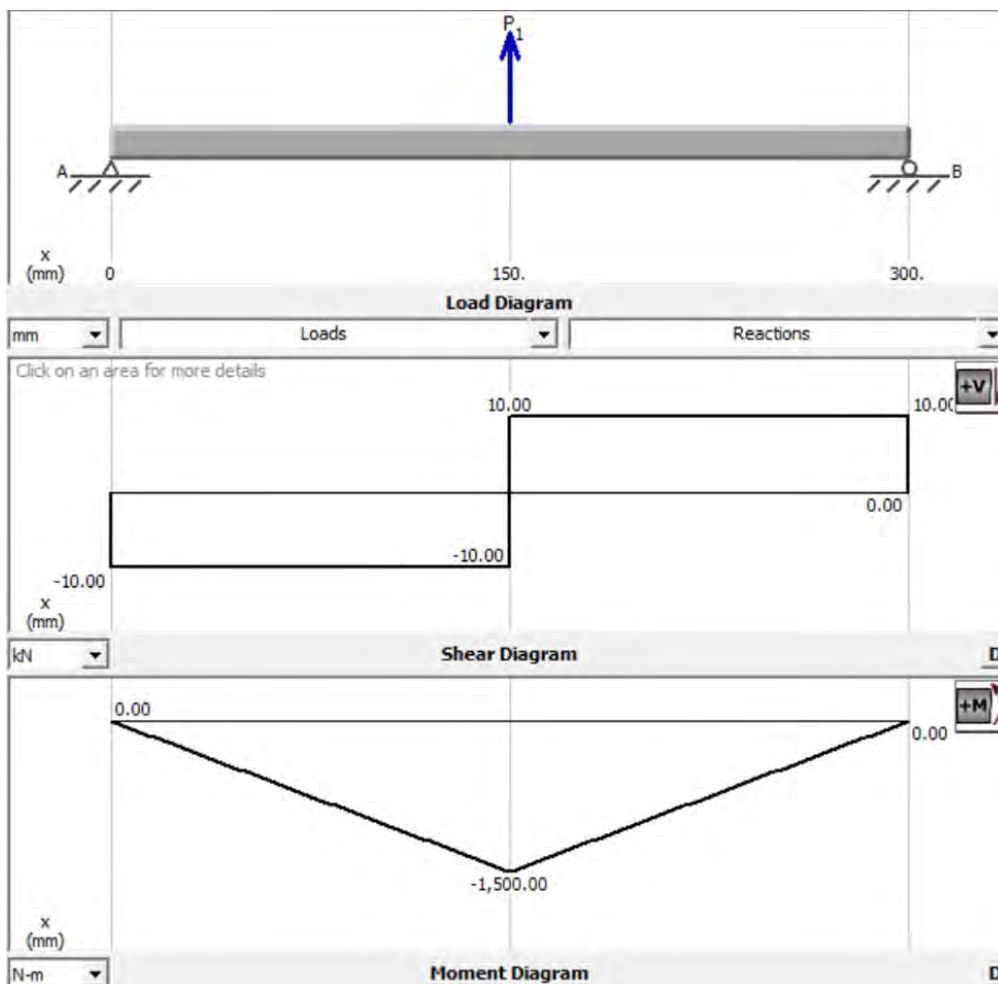
$$-R_A(300 \times 10^{-3}) + 20\left(\frac{300}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$R_A = 10 \text{ KN}$$

$$R_B = 10 \text{ KN}$$

Figura 3-23

Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa C



Cálculo del esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}Y}{I}; M_{max} = 1500 \text{ Nm}; Y = \frac{h}{2}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.46)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1500(\frac{h}{2})}{\frac{1}{12}(60 \times 10^{-3})(h^3)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{150000}{h^2} \text{ Pa}$$

Esfuerzo de flexión admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS}; FS = 2 \quad (3.47)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{250}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 125 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo de flexión máximo y cálculo de la altura mínima:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm} \quad (3.48)$$

$$\frac{150000}{h^2} \leq 125 \times 10^6$$

$$h \geq 0.03464 \text{ m}$$

$$h \geq 34.64 \text{ mm}$$

Verificamos el esfuerzo cortante:

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}; A = b \times h; h = 34.64 \text{ mm} \quad (3.49)$$

$$\tau_{max} = \frac{3(10 \times 10^3)}{2(60 \times 10^{-3})(34.64 \times 10^{-3})}$$

$$\tau_{max} = 7.22 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante de fluencia:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2}$$

$$\tau_y = \frac{250}{2} \quad (3.50)$$

$$\tau_y = 125 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante admisible será:

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{2} \quad (3.51)$$

$$\tau_{adm} = 62.5 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.52)$$

$$7.22 \text{ MPa} \leq 62.5 \text{ MPa}$$

Comprobación de la deformación máxima por deflexión con las dimensiones calculadas:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}; P = 20 \text{ kN}; L = 300 \times 10^{-3} \text{ m}; E = 200 \text{ GPa}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.53)$$

$$\delta_{max} = \frac{(20 \times 10^3)(300 \times 10^{-3})^3}{48(200 \times 10^9)(\frac{1}{12} \times 60 \times 10^{-3} \times (34.64 \times 10^{-3})^3)}$$

$$\delta_{max} = 0.27 \text{ mm}$$

Además:

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}; \delta_{adm} = \frac{L}{800}$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{800} \quad (3.54)$$

$$\delta_{adm} = \frac{300}{800}$$

$$\delta_{adm} = 0.375 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}$$

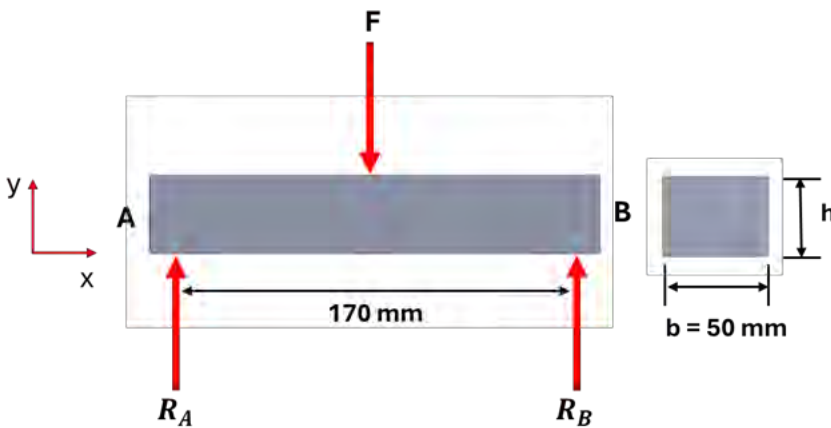
$$0.27 \text{ mm} \leq 0.375 \text{ mm}$$

El resultado obtenido de acuerdo al cálculo es: $h \geq 34.64 \text{ mm}$ sin embargo considerando la disponibilidad del material y la manufactura se decide $h = 50.8 \text{ mm}$ ($\delta_{max} = 0.086 \text{ mm}$).

Placa D

Figura 3-24

DCL placa D



Ecuaciones de equilibrio:

Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical:

$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.55)$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A + R_B = 20$$

Sumatoria de momentos con respecto al nodo B:

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3.56)$$

$$-R_A(170 \times 10^{-3}) + F\left(\frac{170}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

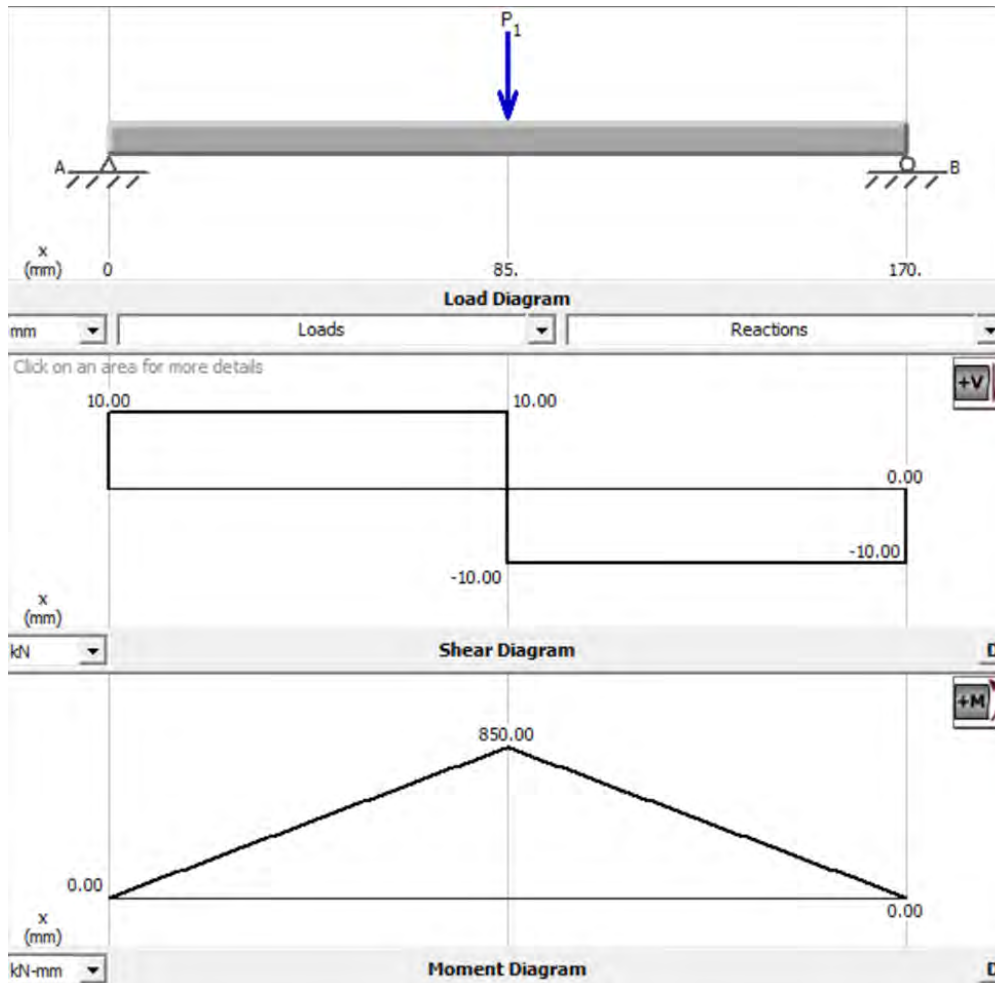
$$-R_A(170 \times 10^{-3}) + 20\left(\frac{170}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$R_A = 10 \text{ KN}$$

$$R_B = 10 \text{ KN}$$

Figura 3-25

Diagrama de fuerza cortante y momento flector en la placa D



Cálculo del esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}Y}{I}; M_{max} = 850 \text{ Nm}; Y = \frac{h}{2}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.57)$$

$$\sigma_{max} = \frac{850(\frac{h}{2})}{\frac{1}{12}(50 \times 10^{-3})(h^3)}$$

$$\sigma_{max} = \frac{102000}{h^2} Pa$$

Esfuerzo de flexión admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{FS}; FS = 2 \quad (3.58)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{250}{2}$$

$$\sigma_{adm} = 125 MPa$$

Comparando el esfuerzo de flexión máximo y cálculo de la altura mínima:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm} \quad (3.59)$$

$$\frac{102000}{h^2} \leq 125 \times 10^6$$

$$h \geq 0.02857 m$$

$$h \geq 28.57 mm$$

Verificamos el esfuerzo cortante:

$$\tau_{max} = \frac{3V}{2A}; A = b * h; h = 28.57 mm \quad (3.60)$$

$$\tau_{max} = \frac{3(10 \times 10^3)}{2(50 \times 10^{-3})(28.57 \times 10^{-3})}$$

$$\tau_{max} = 10.5 MPa$$

Esfuerzo cortante de fluencia:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.61)$$

$$\tau_y = \frac{250}{2}$$

$$\tau_y = 125 MPa$$

El esfuerzo cortante admisible será:

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_y}{2} \quad (3.62)$$

$$\tau_{adm} = 62.5 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.63)$$

$$10.5 \text{ MPa} \leq 62.5 \text{ MPa}$$

Comprobación de la deformación máxima por deflexión con las dimensiones calculadas:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}; P = 20 \text{ kN}; L = 170 \times 10^{-3} \text{ m}; E = 200 \text{ GPa}; I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (3.64)$$

$$\delta_{max} = \frac{(20 \times 10^3)(170 \times 10^{-3})^3}{48(200 \times 10^9)(\frac{1}{12} \times 50 \times 10^{-3} \times (28.57 \times 10^{-3})^3)}$$

$$\delta_{max} = 0.11 \text{ mm}$$

Además:

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}; \delta_{adm} = \frac{L}{800} \quad (3.65)$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{800}$$

$$\delta_{adm} = \frac{170}{800}$$

$$\delta_{adm} = 0.213 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}$$

$$0.11 \text{ mm} \leq 0.213 \text{ mm}$$

El resultado obtenido de acuerdo al cálculo es: $h \geq 28.57 \text{ mm}$ sin embargo considerando la disponibilidad del material y el proceso de mecanizado se adopta $h = 38.1 \text{ mm}$, recalculando

$$\delta_{max} = 0.044 \text{ mm}.$$

3.4.2.3 Módulo de accionamiento

El módulo de accionamiento realiza la función de generar la fuerza de tracción para el ensayo; del concepto de solución número 2, la fuerza de tracción será generada por un sistema hidráulico. Evaluando el funcionamiento y los costes de adquisición, junto al benchmarking obtenido en el estado del arte se decide una configuración similar al módulo educativo de PA HILTON, de esta manera, se cumplen los requerimientos presentados en la fase de perfilar.

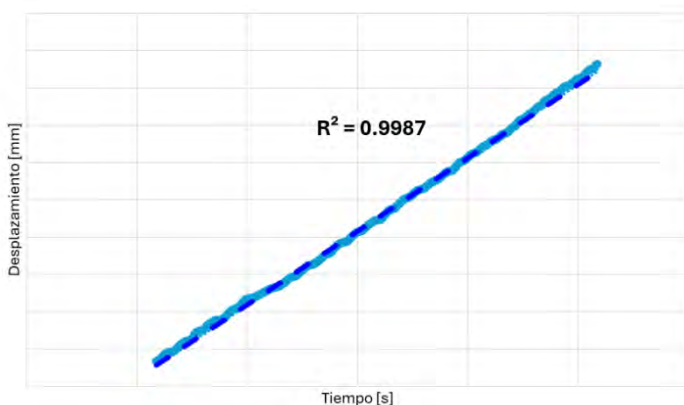
El sistema hidráulico este compuesto por un cilindro hidráulico de 10 toneladas y 2 pulgadas de carrera. El accionamiento del cilindro hidráulico se realiza con la bomba hidráulica manual CP-180 de operación manual. Las características técnicas de ambos elementos se presentan en el anexo F.2.

Operación del módulo de accionamiento:

De acuerdo al tiempo mínimo de duración del ensayo de tracción se realiza una serie de pruebas para conocer el funcionamiento en condiciones reales del sistema hidráulico. La operación manual debe lograr un desplazamiento y una velocidad constante controlada (MRU) durante el ensayo de tracción (ver Figura 3-26).

Figura 3-26

Gráfico de la velocidad del ensayo



Nota: Desplazamiento [mm] vs. Tiempo [s].

Cálculo del acople placa - cilindro (Acople PC)

Para el análisis y cálculo del Acople PC se asume que los extremos son totalmente rígidos en comparación con la parte central. En consecuencia, la deformación y la inestabilidad ocurrirá en el tramo central ($L = 108 \text{ mm}$). Dicho tramo se analiza como un elemento sometido a pandeo. En la figura se detalla el DCL y los parámetros del elemento.

Figura 3-27

DCL barra Acople PC

a) DCL



b) Datos - Barras C y D

Carga aplicada	: $P = 20 \text{ kN}$
Longitud	: $L = 108 \text{ mm}$
Material	: ASTM A36
Esfuerzo de fluencia	: $S_y = 250 \text{ MPa}$
Módulo de Elasticidad	: $E = 200 \text{ GPa}$
Perfil	: Solido circular
	$d = 25 \text{ mm}$

Calculando la relación de esbeltez:

$$\lambda = \frac{L_e}{\rho} \quad (3.66)$$

$$\lambda = \frac{216}{6.25} \rightarrow \lambda = 34.56$$

Donde:

$$\rho = D/4 = 6.25 \text{ mm} \quad : \text{Radio de giro [m].}$$

$$K = 2 \quad : \text{Valor de K para la longitud efectiva de extremo final tipo Empotrado-libre (Mott et al., 2017, p. 221)}$$

$$L_e = KL \quad : \text{Longitud equivalente de columna [mm].}$$

$$\rightarrow L_e = 216 \text{ mm}$$

Calculando la constante de columna:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (3.67)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 (200 \times 10^9)}{250 \times 10^6}}$$

Comparando con C_c : $\lambda < C_c$

Entonces la columna es corta y se utiliza la relación de J. B. Johnson.

$$P_{Cr} = AS_y \left[1 - \frac{S_y (KL / \rho)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (3.68)$$

$$P_{Cr} = (490.87 \text{ mm}^2)(250 \text{ N/mm}^2) \left[1 - \frac{(250 \times 10^6 \text{ Pa})(34.56)^2}{4\pi^2 (200 \times 10^9 \text{ Pa})} \right]$$

$$P_{Cr} = 118.1 \text{ kN}$$

Evaluando el factor de seguridad FS:

$$FS = \frac{P_{Cr}}{P} \quad (3.69)$$

$$FS = \frac{118.1 \text{ kN}}{20 \text{ kN}} \rightarrow FS = 5.9$$

Un factor de seguridad de 5.9 garantiza con seguridad cualquier riesgo de pandeo bajo la carga de compresión de 20 kN.

Comprobación de la deformación axial:

$$\delta_{max} = \frac{PL}{EA}; P = 20 \text{ kN}; L = 108 \text{ mm}; E = 200 \text{ GPa}; A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (3.70)$$

$$\delta_{max} = \frac{(20 \times 10^3)(108 \times 10^{-3})}{(200 \times 10^9) \left(\frac{\pi}{4} \times (25 \times 10^{-3})^2 \right)}$$

$$\delta_{max} = 0.022 \text{ mm}$$

Este valor es muy pequeño lo cual garantiza la precisión durante el funcionamiento durante la aplicación de la carga de 20kN.

3.4.2.4 Módulo de los sensores

Los sensores para el registro de datos de fuerza y desplazamiento son: el sensor de fuerza tipo S y el sensor de desplazamiento lineal.

Sensor de fuerza tipo S – (*S-Type Load Cell*):

La selección del sensor tipo S, se realiza por su diseño ideal para cargas en tracción y la configuración del módulo. Se selecciona el sensor de 2 toneladas del fabricante DECENT con un valor para la sobrecarga de seguridad de 1.5, este valor es ampliamente satisfactorio para la capacidad de diseño del módulo educativo de ensayo de tracción y asegura su operación optima. El load Cell es un transductor que convierte la fuerza mecánica en energía eléctrica que se puede medir. Las características principales se presentan a continuación y las especificaciones completas se encuentran en el Anexo E:1 Sensor de fuerza tipo S – (S-Type Load Cell).

- Capacidad: 2000 kg.
- Factor de sobrecarga: 150%.
- Material: acero aleado.
- Potencia de trabajo: DC 5-15V.

Sensor de desplazamiento lineal – *Digital Readout (DRO)*:

La selección del sensor de desplazamiento para medir la elongación se realiza tomando en cuenta la resolución y la exactitud. También se toma en cuenta la compatibilidad con el microcontrolador y la información disponible para realizar la integración total del módulo de sensores. Las especificaciones completas se presentan en el Anexo E.2: Sensor de desplazamiento lineal – Digital Readout (DRO).

- Escala lineal digital SHAHE modelo 5204-200
- Resolución: 0.01 mm / 0.0005in

- Rango: 0-200 mm/8in
- Exactitud: $\pm 0.08\text{mm}/\pm 0.0035\text{in}$

3.4.3 Integrar el producto completo

Después de diseñar los módulos, en esta actividad se realiza el diseño de los grupos y elementos que aún no se han implementado, así como de las fijaciones y elementos que permitan concretizar completamente los módulos y en consecuencia el producto técnico en su totalidad. A esta actividad se le conoce como diseño detallado o diseño final. La selección de los elementos o componentes comerciales y estandarizados se realiza en esta última sección para el diseño mecánico (VDI, 2024a).

Los resultados se presentan de la misma forma que la anterior actividad. Los elementos o componentes a diseñar y seleccionar comprenden partes de fijación o conexiones, así como también al soporte del módulo.

3.4.3.1 Rodamiento lineal:

La selección del rodamiento lineal se realiza a partir del diámetro final obtenido en la sección anterior. El diámetro nominal de la barra móvil es: $D = 25\text{ mm}$. También se toma en consideración criterios de ensamblaje para el rodamiento con la placa fija, por lo cual se decide seleccionar el rodamiento modelo LMK25. Las dimensiones del modelo seleccionado se adecuan perfectamente a las dimensiones de la placa de soporte fija. En el Anexo F.1: Rodamiento Lineal, se presenta las especificaciones del rodamiento lineal LMK25 del fabricante LSWCBE.

3.4.3.2 Uniones roscadas:

En la subsección siguiente se presenta el cálculo de las uniones roscadas de las barras, el sensor de fuerza tipo S y todos los elementos roscados críticos del módulo educativo de ensayo de tracción.

◆ Fijación de Barra A - Placa A - Placa C:

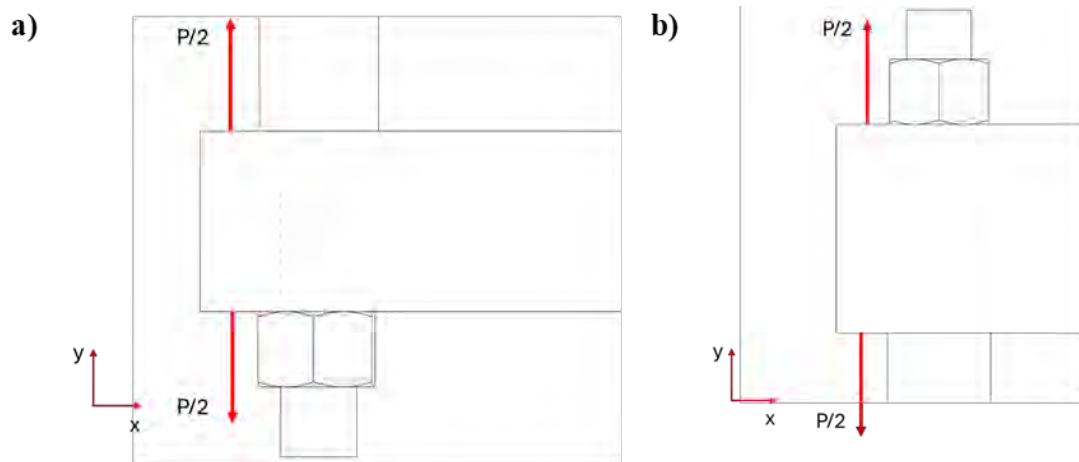
Decisiones de diseño:

A partir del DCL planteado (ver **Figura 3-28**) se reconoce el tipo de falla por tracción estática en cada unión de la barra A con las placas A y C bajo una carga de tracción axial estática ($P = 10 \text{ kN}$). Se decidió utilizar el tipo de unión perno tuerca como el método más adecuado para este caso.

El material de la barra, roscada en ambos extremos para cada unión es un acero ASTM A36 con resistencia a la fluencia ($S_y = 250 \text{ MPa}$).

Figura 3-28

DCL fijación de Barra A - Placa A - Placa C



Se requiere determinar el diámetro de la unión roscada. A continuación, se presenta la solución con los pasos siguientes:

- 1) El acero ASTM A36 tiene como resistencia a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa}$. Para una carga estática de tracción ($P = 10 \text{ kN}$) el esfuerzo se define como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.71)$$

Entonces:

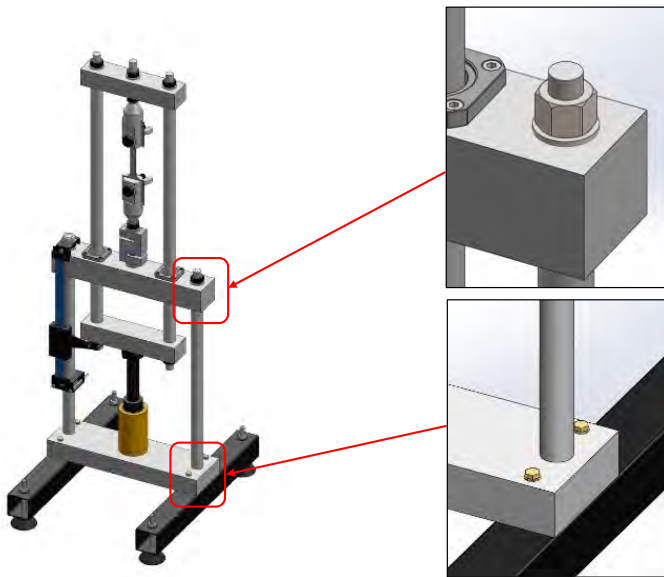
$$0.9 \times 250 \text{ MPa} = \frac{10 \times 10^3 \text{ N}}{A} \quad (3.72)$$

$$A = 44.44 \text{ mm}^2$$

Con referencia a la Tabla 10.2 del libro de (Juvinal & Marshek, 2020, p. 285) el tamaño de unión roscada adecuado es M10; sin embargo, de acuerdo a criterio de diseño se elige M16 (para el cual $A_t = 157 \text{ mm}^2$)

Figura 3-29

Fijación simétrica de las barras A y B



2) Carga de apriete inicial para conexiones reutilizadas (Ugural, 2022, p. 611).

$$F_i = 0.75A_tS_p ; A_t = 157 \text{ mm}^2 ; S_p = 0.9S_y \quad (3.73)$$

$$F_i = 0.75(157 \text{ mm}^2)(0.9 \times 250 \text{ MPa})$$

$$F_i = 26493.8 \text{ N}$$

3) Torque de apriete para pernos lubricados (Ugural, 2022, p. 612).

$$T = 0.15F_id ; d = 16 \text{ mm} \quad (3.74)$$

$$T = 0.15(26493.8)(16 \times 10^{-3})$$

$$T = 63.59 \text{ Nm}$$

El tamaño de unión roscada adecuado de acuerdo a calculo y criterio de diseño para ambas uniones es M16 ($d = 16 \text{ mm}$) y un torque de apriete $T = 63.59 \text{ Nm}$.

● **Fijación de Barra B - Placa A - Placa C:**

Debido a la simetría de material, geometría de los componentes y análisis de cargas, el tamaño de unión roscada para ambos extremos de la barra B es: M16 ($d = 16 \text{ mm}$) con un torque de apriete $T = 63.59 \text{ Nm}$.

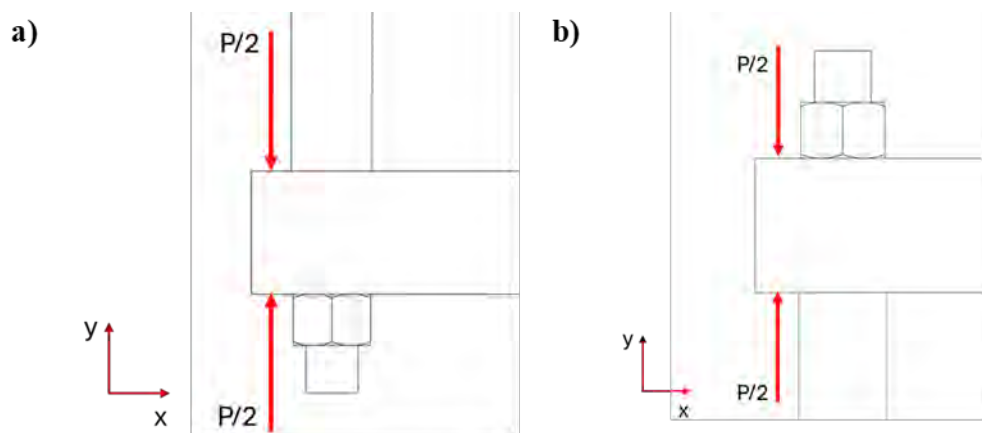
● **Fijación de Barra C - Placa C - Placa D:**

Decisiones de diseño:

Considerando el DCL (ver **Figura 3-30**) de los componentes de unión de la barra C con la placa C y D no se observa el tipo de falla por tracción estática, es decir este deja de ser crítico y se analiza la falla debido al aplastamiento o apoyo de la barra C con respecto a la placa C y D ($P = 10 \text{ kN}$). Por lo tanto, por criterio de diseño se elige un tamaño de unión roscada M16.

Figura 3-30

DCL fijación de barra C - Placa C - Placa D



Solución:

El esfuerzo de apoyo o aplastamiento se define como:

$$\sigma_b = \frac{P}{A_p} \quad (3.75)$$

Donde:

σ_b : Esfuerzo de apoyo

P : Fuerza aplicada

A_p : Área proyectada

El área proyectada es una corona circular y se calcula con la siguiente expresión:

$$A_p = \pi(R^2 - r^2) ; R = 10 \text{ mm} ; r = 5 \text{ mm} \quad (3.76)$$

Entonces se tiene:

$$A_p = \pi(25^2 - 16^2) \quad (3.77)$$

$$A_p = 1159.25 \text{ mm}^2$$

Por lo tanto, el esfuerzo de aplastamiento será:

$$\sigma_b = \frac{10 \times 10^3 \text{ N}}{1159.25 \text{ mm}^2} \quad (3.78)$$

$$\sigma_b = 8.63 \text{ MPa}$$

Entonces se tiene:

$$\sigma_b \leq \sigma_y ; \sigma_y = 250 \text{ MPa} \quad (3.79)$$

$$8.63 \text{ MPa} \leq 250 \text{ MPa}$$

De acuerdo a criterio de diseño se eligió una unión roscada de tamaño M16 (d = 16 mm) con torque de apriete T = 63.59 Nm en las dos uniones, se observó que el tipo de falla predominante es debido al esfuerzo de apoyo o aplastamiento siendo este calculado y comparado $8.63 \text{ MPa} \leq 250 \text{ MPa}$ lo que indica un dimensionamiento correcto.

● **Fijación de Barra D - Placa C - Placa D:**

Analizando la simetría de material, geometría de los componentes y análisis de cargas, se elige una unión roscada de tamaño M16 ($d = 16 \text{ mm}$) con torque de apriete $T = 63.59 \text{ Nm}$ en las dos uniones.

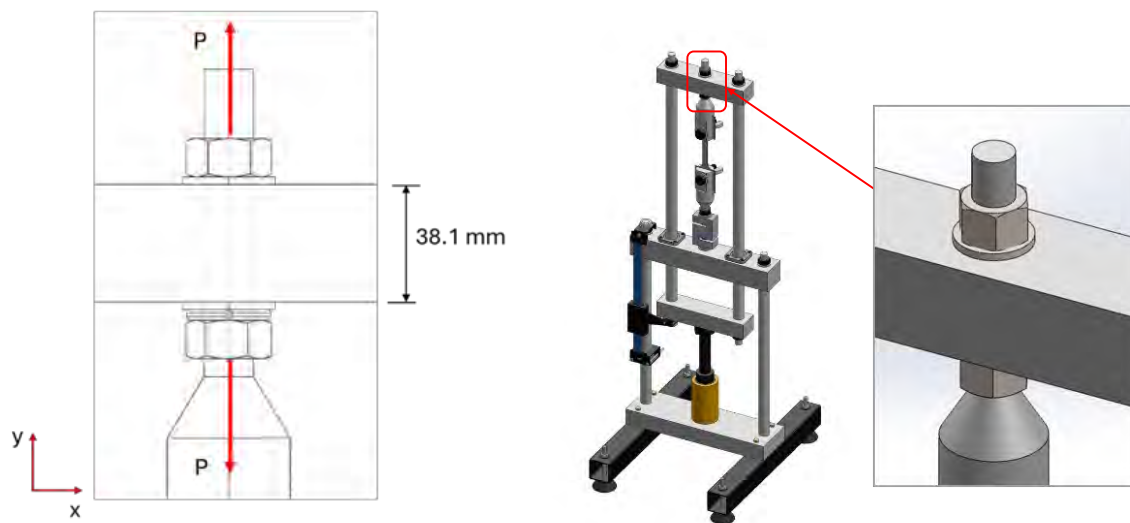
● Unión roscada Sujetador de probeta superior – Placa D

Decisiones de diseño:

A partir del DCL (ver **Figura 3-10**), se observa que actúa una fuerza ($P = 20 \text{ kN}$), se reconoce el tipo de falla por tracción estática en la unión roscada, se determinara el tamaño adecuado de la unión roscada. Además, se observa que la fuerza actúa directamente sobre la unión atornillada transmitiéndose directamente sobre la rosca por esta razón es necesario verificar el esfuerzo cortante a lo largo de la rosca.

Figura 3-31

DCL Unión roscada del sujetador de probeta superior _ Placa D



Solución:

El material seleccionado para el componente es un acero ASTM A36 cuya resistencia a la fluencia es $S_y = 250 \text{ MPa}$.

Para una carga estática de tracción ($P = 20 \text{ kN}$) el esfuerzo se define como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.80)$$

Entonces:

$$0.8 \times 250 \text{ MPa} = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{A} \quad (3.81)$$

$$A = 100 \text{ mm}^2$$

Con referencia a la Tabla 10.2 presentada en (Juvinall & Marshek, 2020, p. 285) el tamaño de unión roscada que se puede optar es M14, sin embargo, de acuerdo a criterio de diseño y seguridad se elige M16 (para el cual $A_t = 157 \text{ mm}^2$)

El esfuerzo cortante en la rosca se da por:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} \quad (3.82)$$

Donde:

F: Fuerza aplicada en la unión roscada

d₁: Diámetro menor

L: Longitud de la rosca

Entonces:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} ; d_1 = 13.6 \text{ mm} ; L = 38.1 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{20 \times 10^3}{\pi(13.6)(38.1)} \quad (3.83)$$

$$\tau = 12.32 \text{ MPa}$$

Además, se tiene:

$$\tau_y = 0.5\sigma_y \quad (3.84)$$

$$\tau_y = 0.5(250)$$

$$\tau_y = 125 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau \leq \tau_y \quad (3.85)$$

$$12.32 \text{ MPa} \leq 125 \text{ MPa}$$

De acuerdo al cálculo realizado y criterio de diseño el tamaño adecuado de unión roscada que garantiza un desempeño optimo es M16 (d = 16 mm).

Con respecto al esfuerzo cortante se verifico que este valor ($\tau = 12.32 \text{ MPa}$) está dentro de los limites permisibles para la dimensión planteada. Por lo tanto, el diseño es seguro.

◆ Unión roscada Sujetador de probeta inferior – Sensor de fuerza tipo S

Decisiones de diseño:

De acuerdo al fabricante la especificación del tamaño de unión atornillada es un M16, entonces se realizará un cálculo de comprobación para una falla por tracción estática ($P = 20 \text{ kN}$) con elección de un material ASTM 36, debido a que esta unión roscada (ver **Figura 3-32**) no tiene fuerza inicial o de apriete se utilizara un caso particular, otro criterio a analizar es el esfuerzo cortante en la rosca debido a que la fuerza se transmite directamente sobre esta.

El material utilizado para el componente es un acero ASTM A36 siendo su resistencia a la fluencia $S_y = 250 \text{ MPa}$.

Para una carga estática de tracción ($P = 20 \text{ kN}$) sin fuerza inicial o de apriete el esfuerzo se define como:

$$\sigma_d = \frac{P}{A} \quad (3.86)$$

Donde:

σ_d : Esfuerzo de trabajo; $\sigma_d = 0.8 \sigma_y$ (para perno no endurecido)

P : Fuerza aplicada

A : Área de tracción

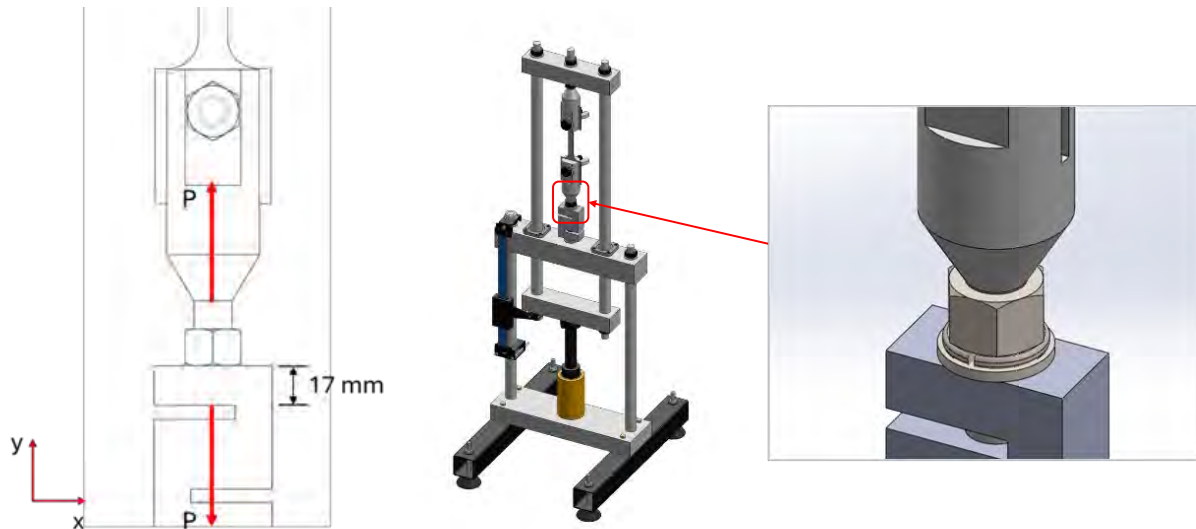
Entonces:

$$0.8(250) = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{A} \quad (3.87)$$

$$A = 100 \text{ mm}^2$$

Figura 3-32

DCL Unión roscada Sujetador de probeta inferior – Sensor de fuerza tipo S



Solución:

De acuerdo a la Tabla 10.2 (Juvinall & Marshek, 2020, p. 285) el tamaño de unión roscada a elegir es M14 (para el cual $A_t = 115 \text{ mm}^2$) sin embargo de acuerdo a criterio de diseño se elige M16 (para el cual $A_t = 157 \text{ mm}^2$).

El esfuerzo cortante en la rosca se da por:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} \quad (3.88)$$

Donde:

F: Fuerza aplicada en la unión roscada

d: Diámetro menor

L: Longitud de la rosca

Entonces:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} ; d_1 = 13.6 \text{ mm} ; L = 17 \text{ mm} \quad (3.89)$$

$$\tau = \frac{20 \times 10^3}{\pi(13.6)(17)}$$

$$\tau = 27.54 \text{ MPa}$$

Además, se tiene:

$$\tau_y = 0.5\sigma_y \quad (3.90)$$

$$\tau_y = 0.5(250)$$

$$\tau_y = 125 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau \leq \tau_y \quad (3.91)$$

$$27.54 \text{ MPa} \leq 125 \text{ MPa}$$

Concluido el cálculo, el tamaño de unión roscada M16 (d = 16 mm) proporcionado por el fabricante es adecuado para su aplicación

Con respecto al esfuerzo cortante se verifico que este valor ($\tau=27.54 \text{ MPa}$) está dentro de los limites permisibles para la dimensión planteada. Por lo tanto, el diseño es seguro.

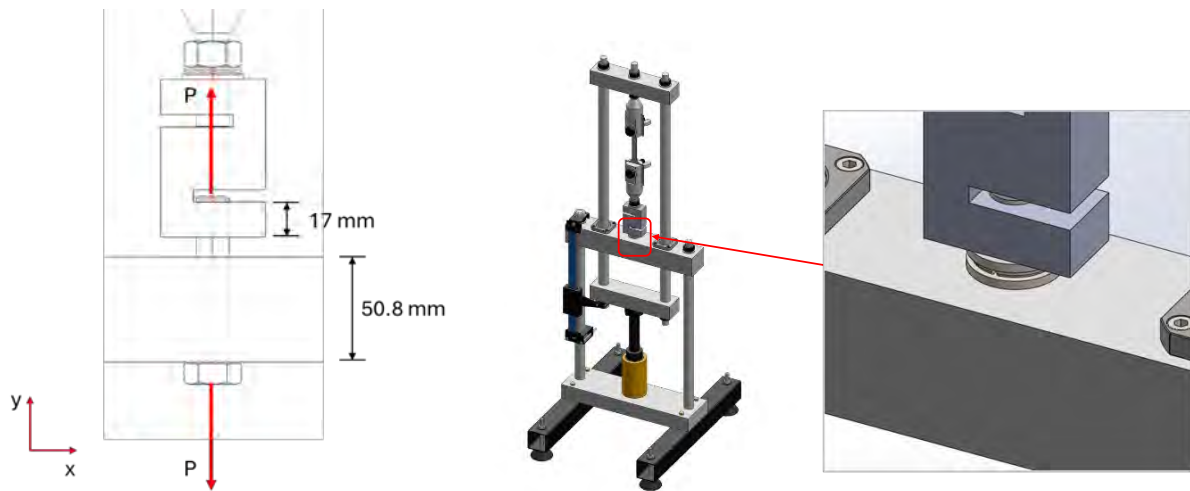
● **Unión roscada Sensor de fuerza tipo S – Placa C**

Decisiones de Diseño:

De acuerdo a la especificación del fabricante el tamaño de perno es M16 ($d = 16 \text{ mm}$), entonces el cálculo será de comprobación seleccionando un perno de acero grado 8.8. En la **Figura 3-33**, se observa que el perno atraviesa la placa C y el Sensor de fuerza tipo S. Respecto al Sensor de fuerza tipo S se analizara la falla estática por tracción estática sin fuerza de apriete y se verificara el esfuerzo cortante a lo largo de esta unión. Por otra parte, para la unión del perno con la placa C se analizará la falla estática por tracción sin fuerza de apriete, se verificará el esfuerzo cortante para la longitud de esta unión.

Figura 3-33

DCL Unión roscada Sensor de fuerza tipo S – Placa C



Solución:

Para la unión perno – Sensor de fuerza tipo S.

El perno de grado 8.8 tiene como resistencia a la fluencia $S_y = 660 \text{ MPa}$.

Para una carga estática de tracción ($P = 20 \text{ kN}$) sin fuerza inicial o de apriete el esfuerzo se define como:

$$\sigma_d = \frac{P}{A} \quad (3.92)$$

Donde:

σ_y : Esfuerzo de trabajo; $\sigma_d = 0.6 \sigma_y$ (para perno endurecido)

P : Fuerza aplicada

A : Área de tracción

Entonces:

$$0.6(660) = \frac{20 \times 10^3 \text{ N}}{A} \quad (3.93)$$

$$A = 50.51 \text{ mm}^2$$

Con referencia a la Tabla 10.2 (Juvinall & Marshek, 2020, p. 285) el tamaño de unión roscada adecuado podría ser M10; sin embargo, el tamaño especificado M16 con un grado 8.8 también cumple y garantiza la seguridad.

El esfuerzo cortante en la rosca se da por:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} \quad (3.94)$$

Donde:

F : Fuerza aplicada en la unión roscada

d : Diámetro menor

L : Longitud de la rosca

Entonces:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} ; d_1 = 13.6 \text{ mm} ; L = 17 \text{ mm} \quad (3.95)$$

$$\tau = \frac{20 \times 10^3}{\pi(13.6)(17)}$$

$$\tau = 27.54 \text{ MPa}$$

Además, se tiene:

$$\tau_y = 0.5\sigma_y \quad (3.96)$$

$$\tau_y = 0.5(660)$$

$$\tau_y = 330 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau \leq \tau_y \quad (3.97)$$

$$27.54 \text{ MPa} \leq 330 \text{ MPa}$$

Para la unión perno – placa C.

Para la unión perno – placa C, de grado 8.8 ($S_y = 660 \text{ MPa}$) sometido a tracción ($P = 20 \text{ kN}$) tiene el mismo resultado anterior por lo tanto la especificación del fabricante M16 ($d = 16 \text{ mm}$) cumple.

El esfuerzo cortante en la rosca se da por:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} \quad (3.98)$$

Donde:

F: Fuerza aplicada en la unión roscada

d: Diámetro menor

L: Longitud de la rosca

Entonces:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_1 L} ; d_1 = 13.6 \text{ mm} ; L = 50.8 \text{ mm} \quad (3.99)$$

$$\tau = \frac{20 \times 10^3}{\pi(13.6)(50.8)}$$

$$\tau = 9.21 \text{ MPa}$$

Además, se tiene:

$$\tau_y = 0.5\sigma_y \quad (3.100)$$

$$\tau_y = 0.5(660)$$

$$\tau_y = 330 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau \leq \tau_y \quad (3.101)$$

$$9.21 \text{ MPa} \leq 330 \text{ MPa}$$

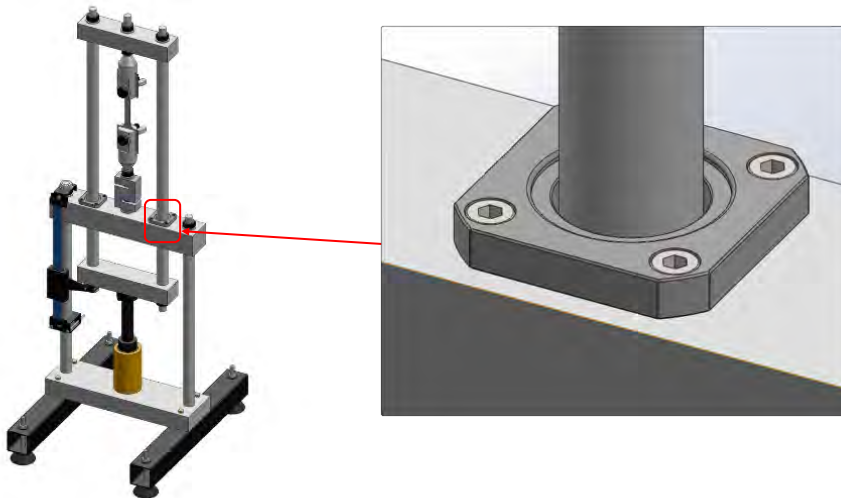
Luego de haber realizado el cálculo de comprobación para el tamaño de la unión roscada M16 (d = 16 mm) especificado por el fabricante para un acero grado 8.8 este cumple y es seguro.

● Unión atornillada rodamiento lineal – Placa C

La unión atornillada rodamiento lineal – placa C se considera un caso no crítico, prácticamente no existe carga, por lo tanto, se cumple la especificación del fabricante tornillo socket Allen M5x0.8 de 12 mm de longitud, cuatro tornillos por cada rodamiento (ver **Figura 3-34**). Se asume aproximadamente la misma resistencia para ambos elementos.

Figura 3-34

Unión atornillada rodamiento lineal - Placa C



Por otra parte, es necesario especificar la carga de apriete inicial y el torque.

1) Carga de apriete inicial.

Para un tornillo Allen de bajo carbono grado 4.6 $S_p = 225 \text{ MPa}$ Tabla 10.5 (Juvinal & Marshek, 2020, p. 302).

$$F_i = 0.75A_tS_p ; A_t = 14.2 \text{ mm}^2 ; S_p = 225 \text{ MPa} \quad (3.102)$$

$$F_i = 0.75(14.2 \text{ mm}^2)(225 \text{ MPa})$$

$$F_i = 2396.3 \text{ N}$$

2) Torque de apriete.

$$T = 0.2F_id ; d = 5 \text{ mm}$$

$$T = 0.2(2396.3)(5 \times 10^{-3}) \quad (3.103)$$

$$T = 2.4 \text{ Nm}$$

Para esta unión atornillada se utilizarán cuatro tornillos socket Allen por cada rodamiento lineal de tamaño M5x0.8 de 12 mm de longitud, con un torque de 2.4 Nm.

● **Unión atornillada Acople PC – Placa B**

Para este análisis se considera un caso de aplicación no crítico (cargas pequeñas), la selección de los tornillos es una cuestión de juicio (Juvinal & Marshek, 2020, p. 313) por esa razón se selecciona cuatro tornillos Allen M5x0.8 de 25 mm de longitud.

De acuerdo a las directrices planteadas en (Jiang, 2019, p. 79) para el diseño estructural de uniones atornillada se elige una geometría simétrica cuadrada (ver **Figura 3-35**) como patrón para la disposición de los cuatro tornillos.

De manera complementaria es necesario especificar la carga inicial de apriete y el torque.

1) Carga de apriete inicial.

Para un tornillo Allen de bajo carbono grado 4.6 $S_p = 225 \text{ MPa}$ (Juvinal & Marshek, 2020, p. 302). Se asume una resistencia similar en ambos elementos.

$$F_i = 0.75A_tS_p ; A_t = 14.2 \text{ mm}^2 ; S_p = 225 \text{ MPa} \quad (3.104)$$

$$F_i = 0.75(14.2 \text{ mm}^2)(225 \text{ MPa})$$

$$F_i = 2396.3 \text{ N}$$

2) Torque de apriete.

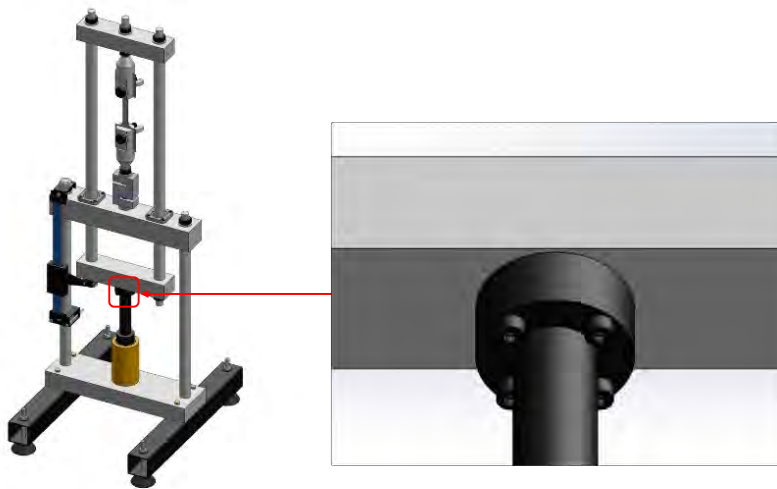
$$T = 0.2F_id ; d = 5 \text{ mm} \quad (3.105)$$

$$T = 0.15(2396.3)(5 \times 10^{-3})$$

$$T = 2.4 \text{ Nm}$$

Figura 3-35

Unión atornillada Acople PC – placa B



Nota: Configuración cuadrangular.

Para este análisis se eligió una configuración cuadrangular, se seleccionó cuatro tornillos Allen de tamaño M5x0.8 de 20 mm de longitud con un torque de apriete $T = 2.88 \text{ Nm}$.

◆ **Unión atornillada Placa A – Tubo estructural cuadrado**

Se utilizan cuatro pernos M6 de 100 mm de longitud dos por cada tubo rectangular (ver **Figura 3-36**), su fuerza de apriete y torque se desarrollan a continuación:

Carga de apriete inicial.

Para un perno M6 de bajo carbono grado 4.6 $S_p = 225 \text{ MPa}$ (Juvinall & Marshek, 2020, p. 302).

$$F_i = 0.75A_tS_p ; A_t = 20.1 \text{ mm}^2 ; S_p = 225 \text{ MPa} \quad (3.106)$$

$$F_i = 0.75(20.1 \text{ mm}^2)(225 \text{ MPa})$$

$$F_i = 3391.88 \text{ N}$$

Torque de apriete.

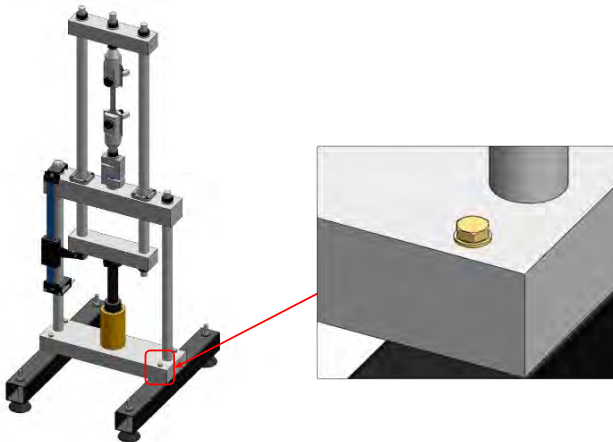
$$T = 0.2F_id ; d = 6 \text{ mm} \quad (3.107)$$

$$T = 0.2(3391.88)(6 \times 10^{-3})$$

$$T = 4.1 \text{ Nm}$$

Figura 3-36

Unión de la Placa A al perfil estructural



Se seleccionaron cuatro pernos M6 de 100 mm de longitud, con su tuerca hexagonal y arandela plana, el torque para un ajuste necesario es $T = 4.88 \text{ N.m}$.

3.4.3.3 Integración de los componentes electrónicos:

El módulo de los sensores además de los sensores de fuerza tipo S y el sensor de desplazamiento lineal, requiere de componentes electrónicos adicionales para transferir las señales

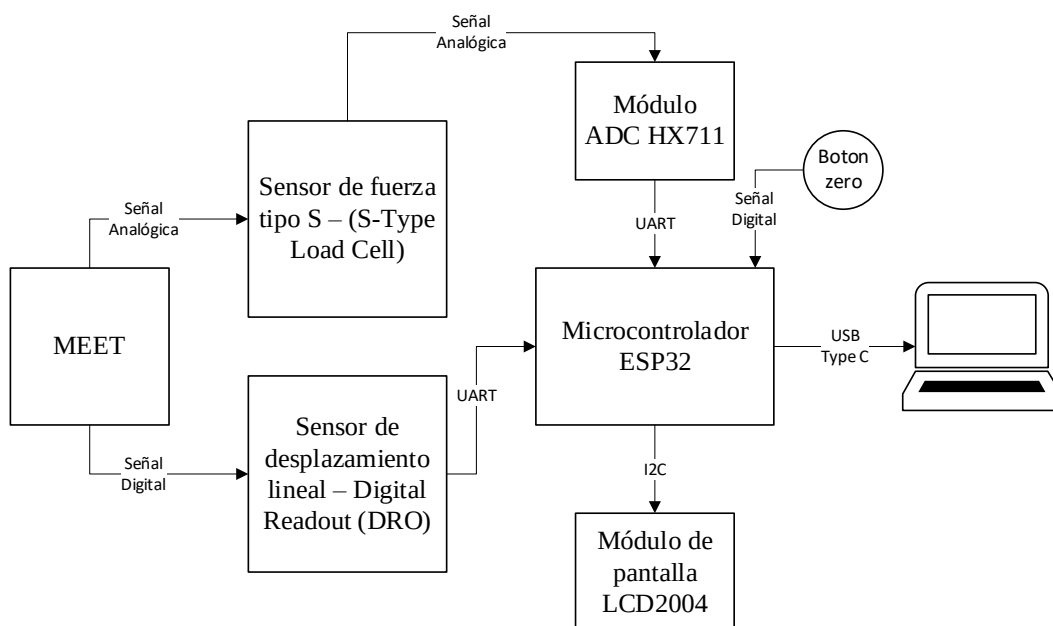
eléctricas del ensayo de tracción al computador. Estos componentes se presentan a continuación y se detallan en el Anexo E.3: Microcontrolador ESP32, módulo ADC HX711 y pantalla LCD2004:

- Microcontrolador ESP32.
- Módulo ADC HX711 24-bit - FSXSEMI.
- Módulo de pantalla LCD2004 Blue I2C – HORNAXYS.

En la **Figura 3-37** se presenta el diagrama esquemático del circuito, que describe de forma gráfica la integración de los componentes electrónicos y los sensores. Subsecuentemente, se describe la función de cada módulo.

Figura 3-37

Diagrama esquemático del circuito



La célula de carga tipo S funciona con el mismo principio que la galga extensométrica: convierte la fuerza de tracción aplicada en una resistencia eléctrica variable. Esta señal se amplifica y digitaliza mediante el módulo ADC HX711, lo que aumenta la sensibilidad y la resolución. El protocolo de comunicación entre el módulo ADC y el microcontrolador ESP32 es de tipo UART. (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).

El ESP32 procesa las señales del sensor de carga y del sensor de desplazamiento lineal, mostrando los datos de fuerza y elongación en tiempo real en la pantalla digital por una conexión I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Las señales procesadas por el microcontrolador, al mismo tiempo se transmiten al computador para su procesamiento y posterior análisis de los datos registrados. Este sistema integrado facilita una monitorización precisa y una adquisición de datos verificable en tiempo real, lo que optimiza el enfoque educativo del módulo educativo de ensayo de tracción para la descripción del comportamiento mecánico en tracción.

El módulo de los sensores está equipado con un botón pulsador que permite la puesta a cero de los sensores, lo cual es esencial para la realización del ensayo de tracción de acuerdo al estándar.

3.4.3.4 Componentes adicionales

Entre los componentes adicionales se tienen las patas niveladoras del módulo educativo de ensayo de tracción, las fijaciones del sensor de desplazamiento lineal, junto al brazo que une el deslizador con la parte móvil del módulo. Dado que estos últimos componentes: las fijaciones y el brazo no son estructuralmente críticos, se diseñan directamente aplicando un enfoque de prototipado.

- **Cálculo del bastidor**

Consideraciones de diseño:

De acuerdo a criterio de diseño se selecciona un tubo estructural de $b = 50.8 \text{ mm}$, $h = 50.8 \text{ mm}$, $t = 1.8 \text{ mm}$ y $L = 450 \text{ mm}$ y resistencia a la fluencia $\sigma_y = 269 \text{ MPa}$, entonces a partir de estas dimensiones se realizará el cálculo.

Solución:

En la **Figura 3-38**, se muestra el DCL:

Ecuaciones de equilibrio:

Sumatoria de fuerzas en la dirección vertical:

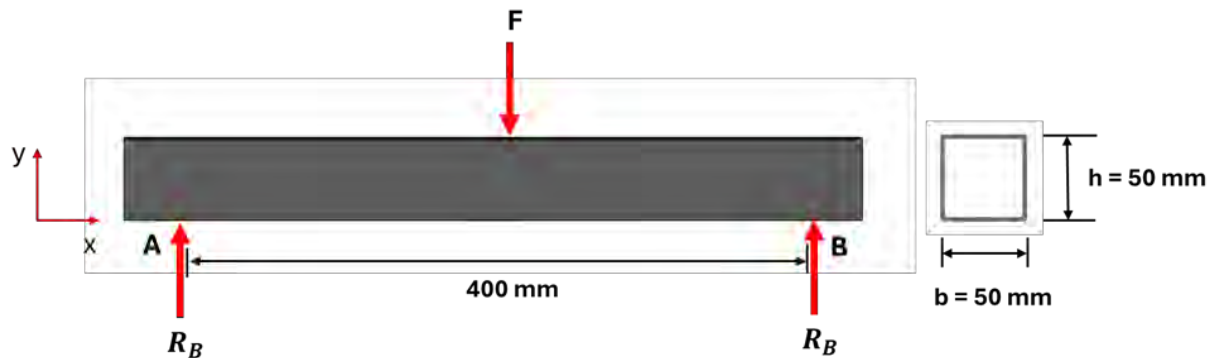
$$\Sigma F_y = 0 \quad (3.108)$$

$$R_A + R_B - F = 0$$

$$R_A + R_B = 200 \text{ N}$$

Figura 3-38

DCL bastidor



Sumatoria de momentos con respecto al nodo B:

$$\Sigma M_B = 0 \quad (3.109)$$

$$-R_A(250 \times 10^{-3}) + F\left(\frac{250}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$-R_A(250 \times 10^{-3}) + 200\left(\frac{250}{2} \times 10^{-3}\right) = 0$$

$$R_A = 100 \text{ N}$$

$$R_B = 100 \text{ N}$$

A continuación (ver **Figura 3-39**), se realiza el diagrama de fuerza cortante y momento flector en el perfil estructural:

Esfuerzo normal por flexión:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}Y}{I}; M_{max} = 20000 \text{ Nmm}; Y = \frac{h}{2}; I \quad (3.110)$$

$$= \frac{bh^3 - (b - 2t)(h - 2t)^3}{12}$$

$$I = \frac{50 \times 50^3 - (50 - 2 \times 1.8)(50 - 2 \times 1.8)^3}{12}$$

$$I = 134563.6 \text{ mm}^4$$

Entonces:

$$\sigma_{max} = \frac{20000(\frac{50}{2})}{134563.6}$$

$$\sigma_{max} = 3.72 \text{ MPa}$$

Comparando el esfuerzo de flexión máximo:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{adm}$$

$$3.72 \text{ MPa} \leq 269 \text{ MPa}$$

(3.111)

Verificando el esfuerzo cortante:

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It}; V = 100 \text{ N}; Q = A \cdot y; A = (b - 2t)(\frac{h}{2}); y = \frac{h}{4} \quad (3.112)$$

$$A = (b - 2t)(\frac{h}{2})$$

$$A = (50 - 2 \times 1.8)(\frac{50}{2})$$

$$A = 1160 \text{ mm}^2$$

$$Q = A \cdot y$$

$$Q = 1160 \cdot \frac{50}{4}$$

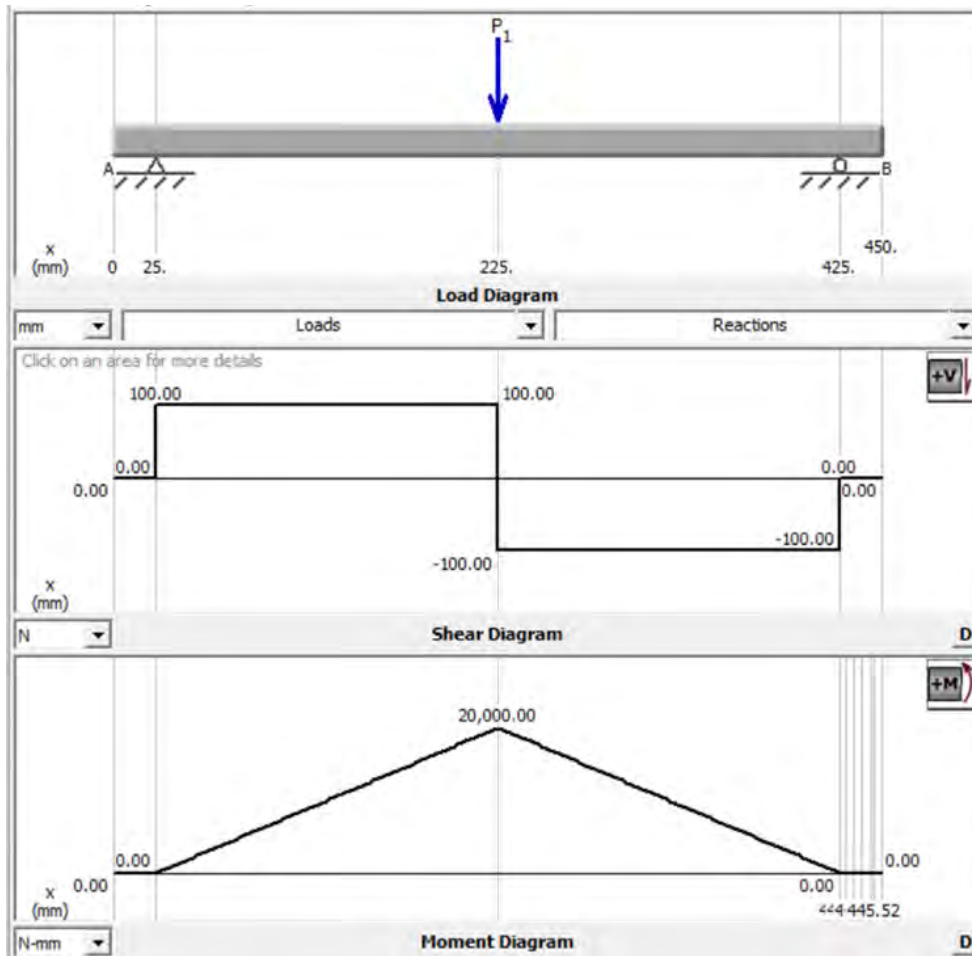
$$Q = 14500 \text{ mm}^3$$

$$\tau_{max} = \frac{100 \times 14500}{134563.6 \times 1.8}$$

$$\tau_{max} = 6 \text{ MPa}$$

Figura 3-39

Diagrama de fuerza cortante y momento flector en el perfil estructural



Esfuerzo cortante de fluencia:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (3.113)$$

$$\tau_y = \frac{269}{2}$$

$$\tau_y = 134.5 \text{ MPa}$$

Entonces:

$$\tau_{max} \leq \tau_{adm} \quad (3.114)$$

$$6 \text{ MPa} \leq 134.5 \text{ MPa}$$

Comprobación de la deformación máxima por deflexión:

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI}; P = 200 \text{ N}; L = 400 \text{ mm}; E = 200 \text{ GPa}; \quad (3.115)$$

$$I = \frac{bh^3 - (b - 2t)(h - 2t)^3}{12}$$

$$I = 134563.6 \text{ mm}^4$$

$$\delta_{max} = \frac{(200)(400)^3}{48(200 \times 10^9)(134563.6)}$$

$$\delta_{max} = 0.01 \text{ mm}$$

Además:

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}; \delta_{adm} = \frac{L}{800} \quad (3.116)$$

$$\delta_{adm} = \frac{L}{800}$$

$$\delta_{adm} = \frac{400}{800}$$

$$\delta_{adm} = 0.5 \text{ mm}$$

$$\delta_{max} \leq \delta_{adm}$$

$$0.01 \text{ mm} \leq 0.5 \text{ mm}$$

Comentario:

El resultado obtenido, de acuerdo con los cálculos realizados para el perfil estructural seleccionado con dimensiones $b = 50.8 \text{ mm}$, $h = 50.8 \text{ mm}$, $t = 1.8 \text{ mm}$ y $L = 400 \text{ mm}$, permite concluir que el elemento cumple con los criterios de resistencia y rigidez establecidos, entonces puede considerarse estructuralmente seguro para las condiciones planteadas.

▪ Selección de patas niveladoras

Entre los componentes adicionales se tienen las patas niveladoras del módulo educativo de ensayo de tracción. Para la selección de patas niveladoras se realizó el siguiente procedimiento:

- Se determinó la masa total sobre el bastidor, $m_t = 40$ kg.
- Asumiendo una distribución de masa uniforme en 4 puntos de apoyo $m = 10$ kg.
- Se consultó la tabla de especificaciones del fabricante
- Se selecciona una pata de tamaño [50*10*60] de acuerdo a las especificaciones del fabricante y criterio de diseño, donde 50 es el diámetro de la base en mm, 10 es el tamaño de rosca M10 y 60 es la longitud roscada en mm.

3.4.3.5 Modelo CAD

Figura 3-40

Modelo CAD del módulo educativo de ensayo de tracción



Nota: Modelo CAD de la integración del producto.

3.4.4 *Elaborar las especificaciones de ejecución y uso*

La realización de esta actividad se superpone en cierta medida con actividades anteriores, dado que, desde el punto de vista de la fabricación, ya se han realizado importantes definiciones. El resultado de esta actividad son los modelos CAD, planos de fabricación, de detalle, de ensamblaje, catálogos o fichas técnicas, los códigos de los programas “*scripts*”, los detalles de la operación y el ensamblaje (VDI, 2024a).

3.4.4.1 **Planos de los componentes mecánicos**

Los planos de detalle se organizan en la **Tabla 3-6** y se presentan en el Anexo D.

Tabla 3-6

Lista de planos del módulo educativo de ensayo de tracción

Ítem	Nombre del componente
1	Placa A
2	Placa B
3	Placa C
4	Placa D
5	Barra A & B
6	Barra C & D
7	Acople PC
8	Sujetador superior
9	Sujetador inferior
10	Brazo deslizante
11	Acople superior del DRO
12	Acople inferior del DRO

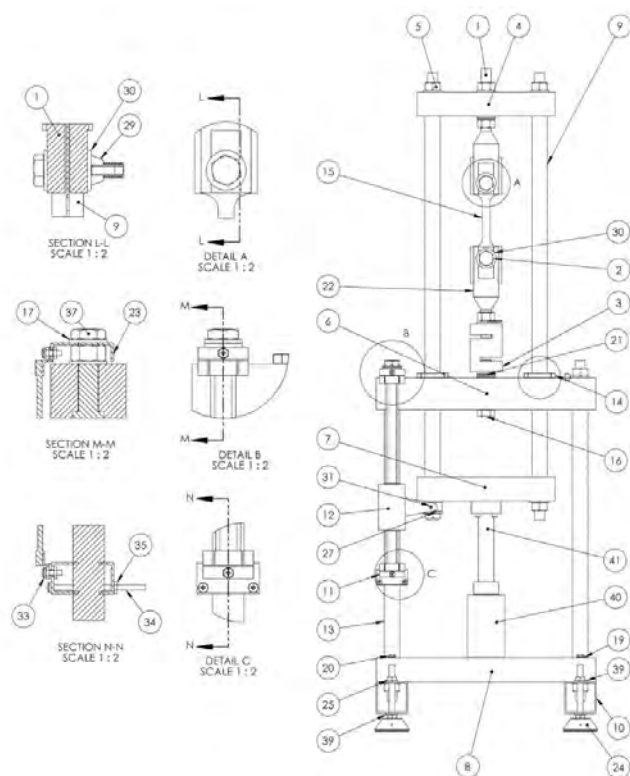
13	Acople del brazo deslizante
14	Bastidor
15	Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción
16	MEET – ENSAMBLE GENERAL
17	MEET - ENSAMBLE EXPLOSIONADO

3.4.4.2 Plano de ensamblaje

El plano de ensamblaje se presenta en Anexo D, la **Figura 3-41** presenta una captura del mismo con las vistas de detalle y de sección que permiten observar con claridad el montaje de los componentes más pequeños.

Figura 3-41

Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción



Nota: Vista frontal del módulo educativo de ensayo de tracción con vistas de detalle y sección de los componentes de menor tamaño ensamblados.

3.4.4.3 Especificaciones técnicas de los componentes seleccionados

La información técnica de los componentes seleccionados se presenta en los anexos y se organizan en la **Tabla 3-7**:

Tabla 3-7

Especificaciones técnicas de los componentes seleccionados

Ítem	Nombre del componente	Referencia
1	Sensor de fuerza tipo S – (S-Type Load Cell)	Anexo E:1 Sensor de fuerza tipo S – (S-Type Load Cell)
2	Sensor de desplazamiento lineal – Digital Readout (DRO)	Anexo E.2: Sensor de desplazamiento lineal – Digital Readout (DRO)
3	Rodamiento Lineal	Anexo F.1: Rodamiento Lineal
4	NEWTRY CP-180 + RSC - 1050	Anexo F.2:

3.4.4.4 Documentación adicional

Entre los documentos adicionales se encuentran, las instrucciones de ensamblaje, de operación, el manual de operación, las pruebas “*testing*” y las aplicaciones “*software*”. Dado el contexto de redacción académica, esta documentación se encuentra en los capítulos posteriores, respecto al manual de operación y el software por su naturaleza extensa y de desarrollo continuo, se presenta en un repositorio online (Anexo J: Repositorio Online), el cual permite solucionar errores “bugs”, reportar incidencias “issues” y resolver dudas de forma ágil y efectiva.

Capítulo 4:

Fabricación y Ensamblaje

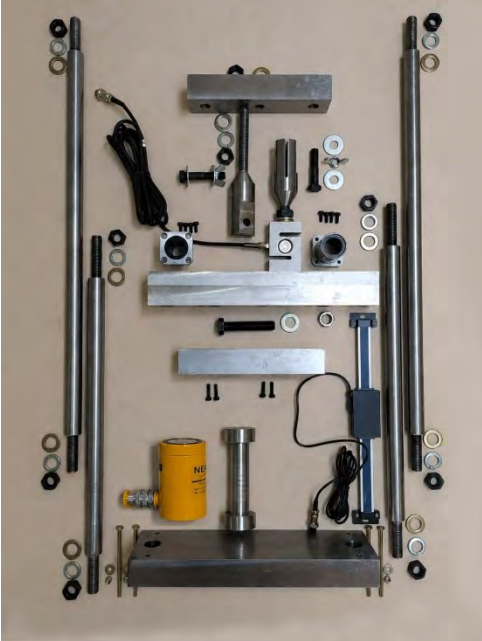
En el presente capitulo se realiza la fabricación y ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción. Previamente, en el capítulo 3 se definieron las fases del proceso de diseño de acuerdo a la directriz VDI 2221. La fase 5, “Prototipo” (VDI, 2024b), agrupa a dos actividades de las cuales en esta sección se presenta la actividad denominada “Manufactura” donde se realiza la fabricación y el ensamblaje.

4.1 Fabricación del módulo educativo de ensayo de tracción

En esta subsección se detalla la lista de componentes, materiales y herramientas que hacen posible obtener el producto completamente funcional. En la tabla se indica el detalle de cada componente junto con su imagen de referencia.

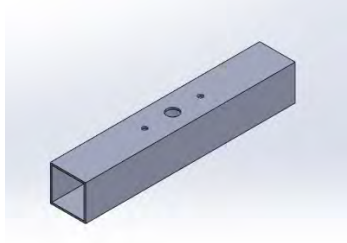
Tabla 4-1

Detalle de los componentes del módulo educativo de ensayo de tracción

PRODUCTO: MÓDULO EDUCATIVO DE ENSAYO DE TRACCIÓN	
	
Foto del despiece de los componentes	

Parte #	Nombre del componente	Cant.	Material	Proceso Mfg	Imagen
1	Placa A	1	Acero ASMT A36	- Fresado frontal - Taladrado	
2	Placa B	1	Acero ASMT A36	- Fresado frontal - Taladrado	
3	Placa C	1	Acero ASMT A36	- Fresado frontal - Taladrado	
4	Placa D	1	Acero ASMT A36	- Fresado frontal - Taladrado	
5	Barra fija A	1	Acero ASMT A36	- Refrentado - Cilindrado - Roscado	
6	Barra fija B	1	Acero ASMT A36	- Refrentado - Cilindrado - Roscado	

7	Barra móvil C	1	Acero	- Refrentado	
			ASMT	- Cilindrado	
			A36	- Roscado	
8	Barra móvil D	1	Acero	- Refrentado	
			ASMT	- Cilindrado	
			A36	- Roscado	
9	Rodamiento lineal LMK25	2	Acero	Estandar	
10	Sujetador superior	1	Acero	- Cilindrado	
			ASMT	- Roscado	
			A36	- Taladrado - Fresado	
11	Sujetador inferior	1	Acero	- Cilindrado	
			ASMT	- Roscado	
			A36	- Taladrado - Fresado	
12	Acople PC	1	Acero	- Cilindrado	
			ASMT	- Refrentado	
			A36	- Taladrado - Roscado	

13	Perfil Cuadrado 50x50x1.5 mm	2	Acero ASMT A500	Estandar	
14	Newtry RSC - 1050 Cilindro hidráulico	1	Acero	Estandar	
15	Newtry - CP-180 Bomba hidráulica	1	Acero	Estandar	
16	Tuerca Hexagonal M16x2	10	Acero endurecido	Estandar	
17	Arandela plana M16	10	Acero	Estandar	
18	Perno M16 x 2.0 x 80	1	Acero endurecido	Estandar	
19	Arandela de Presión M16	3	Acero	Estándar	
20	Perno 1/2 - 13 x 2.5 UNC	2	Acero endurecido	Estandar	
21	Tuerca Mariposa 1/2 - 13 UNC	2	Acero endurecido	Estandar	

22	Arandela plana de 1/2"	4	Acero endurecido	Estándar	
23	Perno M6 x 2 x 100	4	Acero endurecido	Estandar	
24	Tuerca Hexagonal M6	4	Acero endurecido	Estandar	
25	Arandela plana M6	8	Acero endurecido	Estandar	
26	Tuerca Baja M16	2	Acero endurecido	Estandar	
27	Pata niveladora M10 con 60 mm de longitud roscada	4	Acero	Estandar	
28	Tuerca Hexagonal M10	4	Acero endurecido	Estandar	
29	Arandela plana M10	8	Acero endurecido	Estandar	
30	Tornillo Alem M5x0.8 de 12 mm de longitud	8	Acero endurecido	Estandar	

31	Tornillo Alem M5x0.8 de 25 mm de longitud	4	Acero endurecido	Estandar	
32	Acople superior del Sensor de desplazamiento lineal	1	Acero	- Corte - Taladrado	
33	Acople inferior del Sensor de desplazamiento lineal	1	Acero	- Corte - Taladrado	
34	Brazo deslizante	1	Acero	- Corte - Taladrado	
35	Fijador de brazo deslizante	1	Acero	- Corte - Taladrado	
36	Tornillo Stovebolt 5/32 x 2 1/2"	2	Acero	Estandar	
37	Tornillo Stovebolt 5/32" x 1/2"	2	Acero	Estandar	

38	Tornillo Stovebolt 5/32" x 1/4"	3	Acero	Estandar	
Componentes Electrónicos					
39	Sensor de fuerza tipo S 2T	1	Aleacion de acero	Estandar	
40	Sensor de desplazamiento lineal	1		Estandar	
41	Microcontrolador ESP32	1		Estandar	
42	LCD2004 + I2C 20X4	1		Estandar	
43	Modulo ADC HX711 de 24 bits	1		Estandar	
44	Botón pulsador	1		Estandar	
45	GX Conector 4 Pin Circular	2		Estandar	

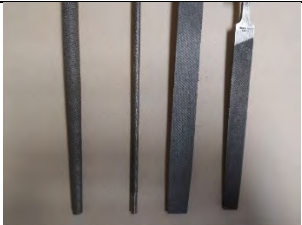
	Rosca Macho +				
	Hembra				
46	Caja de derivación PVC	1	PVC	Estandar	
47	Cable usb tipo C	1		Estandar	

Herramientas y Materiales: En esta sección se presenta la **Tabla 4-2** lista de materiales y herramientas necesarios para fabricar componentes adicionales del producto técnico, junto con los instrumentos de medición que garantizan la precisión. También se detallan las herramientas e insumos que se utilizan en el proceso de ensamblaje para lograr un montaje óptimo y seguro.

Tabla 4-2

Lista de los materiales y herramientas

Ítem #	Nombre	Imagen
1	Llave mixta de 24 mm	
2	Llave ratchet 1/2"	
3	Regla de acero inoxidable 15 cm	
4	Vernier digital	

5	Vernier analógico	
6	Marcadores SHARPIE Twin Blister 3un	
7	Llave Alem de 4 mm	
8	Destornillador punta Phillips	
9	Set de limas	
10	Sierra copa bimetel HSS 25 mm	
11	Sierra copa bimetel HSS 35 mm	
12	Grasa de litio multipropósito	
13	Lija para metal 3M	
14	Spray automotivo laca acrílica transparente	

15	Disco de corte para acero BNA12 Norton	
16	Probeta MDF	
17	Tope caucho antideslizante 30mm	

4.2 Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción

La **Tabla 4-3** detalla y estructura el proceso de ensamblaje del equipo. Para facilitar la comprensión, el proceso está dividido en pasos y, para cada uno de ellos, se adjunta una imagen que muestra la configuración correspondiente. En cada paso se especifican los componentes, herramientas y materiales necesarios y, a continuación, se explica el procedimiento.

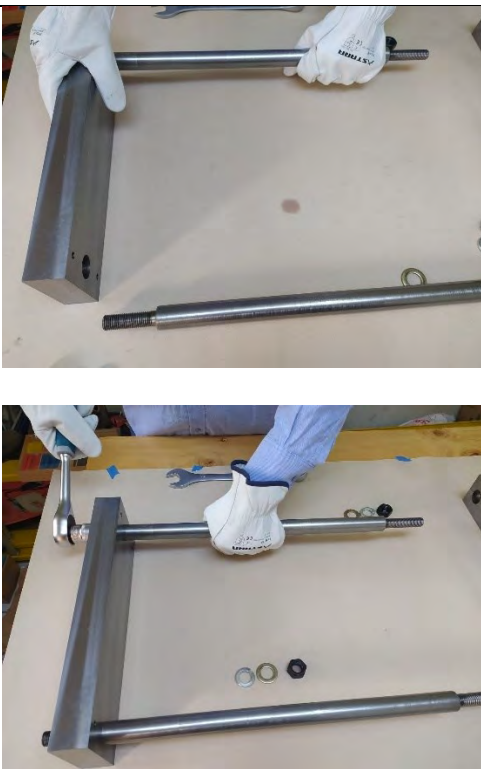
Tabla 4-3

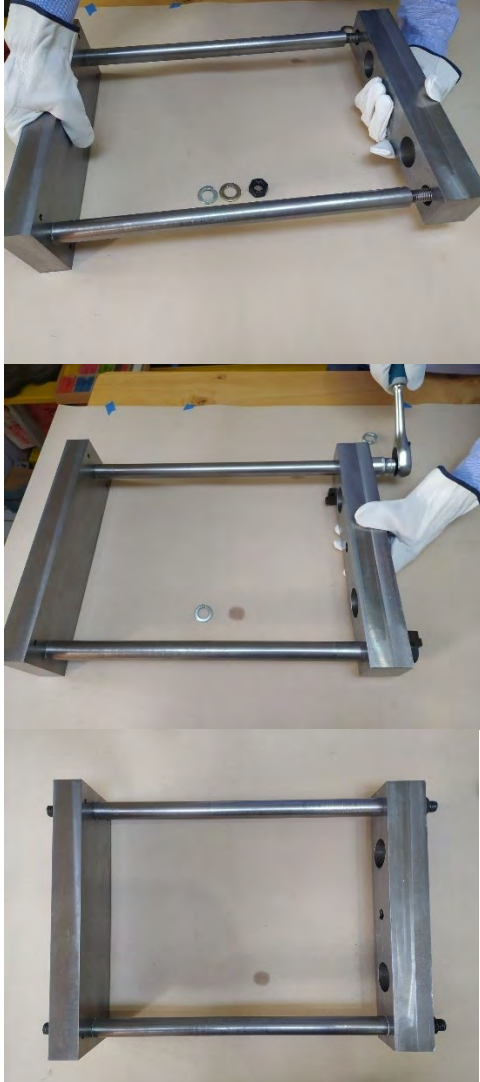
Descripción del ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción

ENSAMBLAJE DEL MÓDULO EDUCATIVO DE ENSAYO DE TRACCIÓN	
	
Modelo CAD ensamblado	

Como funciona: Se acciona manualmente de manera repetida y constante la palanca de la bomba, generando el desplazamiento progresivo del pistón. Este movimiento produce una fuerza vertical aplicada sobre la estructura móvil, la cual transmite una carga de tracción axial directamente a la probeta. La magnitud de la fuerza ejercida resulta suficiente para producir la rotura de la probeta.

Durante el desarrollo de la prueba, los datos de fuerza aplicada y desplazamiento son registrados mediante los sensores. Posteriormente, esta información es procesada en la computadora, permitiendo obtener las propiedades de tracción y el diagrama esfuerzo–deformación, que describe el comportamiento mecánico del material.

Paso	Configuración	Preparación
1		Componentes: ▪ Perfil soporte base A y B ▪ Placa A ▪ Placa C ▪ Barra fija A ▪ Barra fija B ▪ Tubo rectangular A ▪ Tubo rectangular B ▪ 2 x Rodamiento de deslizamiento ▪ 4 x tuerca ▪ 4 x perno ▪ 8xtornillo Allen ▪ Perno M16



Herramientas y materiales:

- Llave mixta de 24 mm
- Llave ratchet 3/4"
- Guantes de seguridad

Procedimiento:

- Unir la placa A con las barras fijas A – B, colocar las tuercas con arandelas y ajustarlas utilizando la llave ratchet.
- Unir la placa B a las barras fijas A – B, colocar las tuercas con arandelas y ajustarlas con la llave ratchet.

2



Componentes:

- 2 x rodamiento de deslizamiento.
- 8 x Tornillo Alem M5

Herramientas y materiales:

- Llave Alem de 4 mm
- Lubricante
- Guantes de látex

Procedimiento:



- Lubricar los rodamientos y colocar en cada agujero con presión.
- Ajustar los tornillos Alem de cada rodamiento utilizando la llave correspondiente.
- Colocar el perno M16 en la placa C.

3

Componentes:



- Placa D
- Barra móvil C
- Barra móvil D
- Cilindro hidráulico
- 4 x tuerca M16
- 4 x arandela plana M16
- Acople PC
- 4 x tornillo Allen M5



Herramientas y materiales:

- Llave mixta de 24 mm

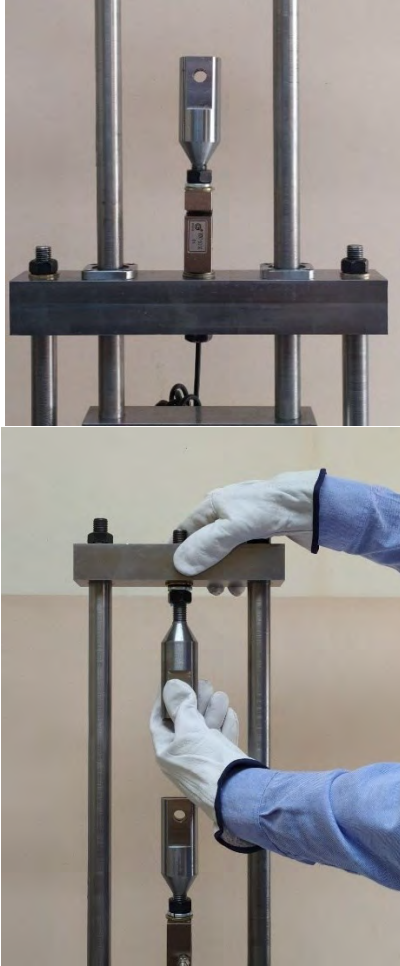


- Llave ratchet 3/4"
- Llave Alem de 4 mm
- Guantes de seguridad

Procedimiento:

- Unir la placa D con las barras fijas C – D, colocar las tuercas con arandelas y ajustarlas utilizando la llave ratchet.
- Unir el acople PC a la placa B mediante los tornillos Alem y ajustarlos utilizando la llave correspondiente.
- Luego de estar ensamblada las barras C y D a la placa D, pasar a través de los rodamientos.
- Unir la placa B mediante las tuercas junto a las arandelas y luego ajustarlas con la llave ratchet.
- Colocar el cilindro hidráulico alineado con el acople PC.
- Acoplar el cilindro hidráulico a la bomba hidráulica CP – 180.

4



Componentes:

- Sensor de fuerza tipo S
- Sujetador superior
- Sujetador inferior
- 3 x tuerca M16
- 4 x arandela plana M16
- 2 x arandela de presión.

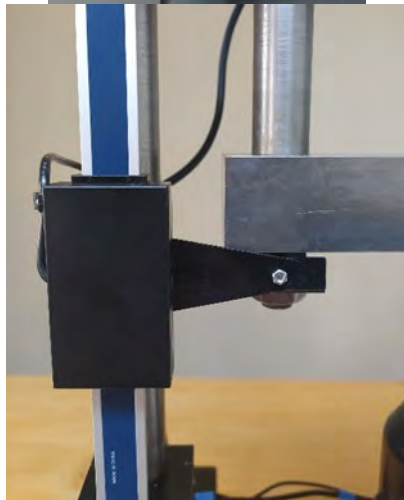
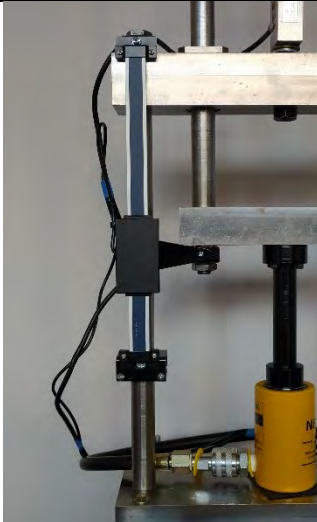
Herramientas y materiales:

- Llave mixta de 24 mm
- Guantes de seguridad

Procedimiento:

- Enroscar el Sensor de fuerza tipo S en el perno M16 de la placa C, con las arandelas planas y de presión.
- Enroscar el sujetador inferior, colocando antes una contratuerca y arandela.
- Enroscar el sujetador superior con una contratuerca en la placa D, fijando con una tuerca en el extremo pasante.

5



Componentes:

- Sensor de desplazamiento lineal, acople superior e inferior y brazo deslizador.
- 2 x Tuerca baja M16

Herramientas:

- Llave mixta de 24 mm

Procedimiento:

- Fijar el sensor de desplazamiento lineal mediante el acople superior en la rosca de la barra B.
- Fijar el Sensor de desplazamiento lineal mediante el acople inferior en la barra B.
- Fijar el cabezal lector a la placa B mediante la plancha delgada.

6



Componentes:

- Probeta
- 2 x pernos y tuerca mariposa

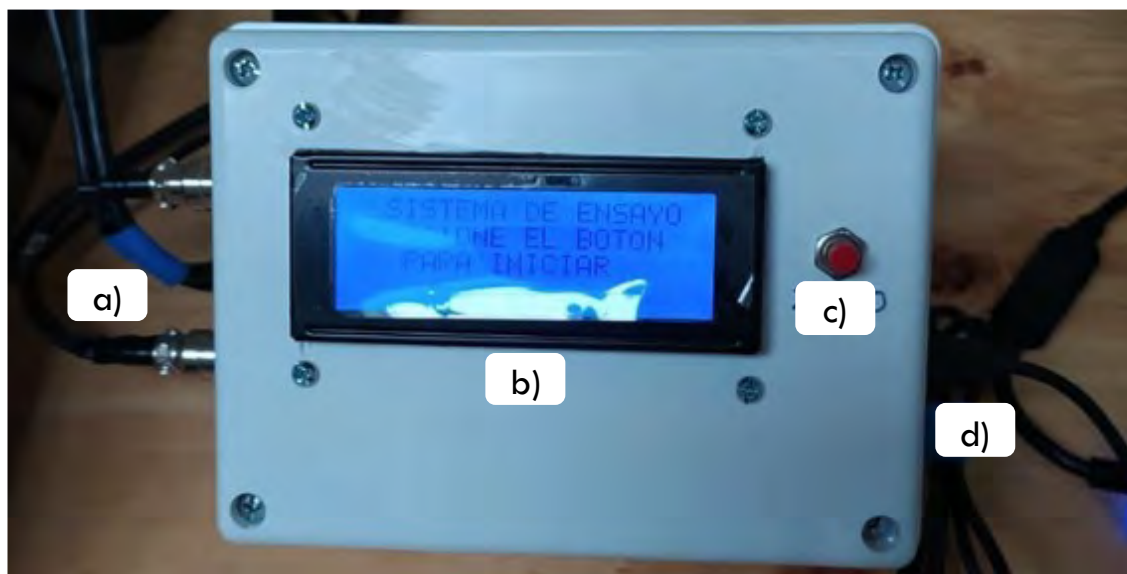
Procedimiento:

- Colocar la probeta en los sujetadores y fijarla utilizando los pernos y ajustando las tuercas mariposa.

El ensamblaje del sistema de adquisición de datos se realiza dentro de una caja de PVC de acuerdo a la **Figura 3-37** - Diagrama esquemático del circuito; estos módulos son: un microcontrolador ESP32, un módulo ADC HX711 de 24 bits, una pantalla LCD2004 con interfaz I2C 20x4 y un botón pulsador. Finalmente, dentro de la caja de PVC todo el sistema se integra y se asegura la disposición de los componentes con la organización del cableado (ver **Figura 4-1**). El sistema de adquisición de datos consta de dos entradas de 4 pines por cada sensor de fuerza y desplazamiento y una salida de datos USB tipo C para transferir los datos a la PC. A su vez la conexión USB tipo C proporciona la alimentación eléctrica al microcontrolador ESP32.

Figura 4-1

Sistema de adquisición de datos del módulo educativo de ensayo de tracción



Nota: a) Conexión de los sensores a la izquierda, b) salida de datos y alimentación USB tipo C a la derecha, c) Botón de “puesta a cero” o “Zero” y d) display digital.

La integración completa del módulo educativo de ensayo de tracción y el sistema de adquisición de datos requiere de un software para el registro, procesamiento y monitoreo. Para el registro se implementó el software de código libre CoolTerm (ver **Figura 5-2**), sin embargo este

software no cuenta con la capacidad de presentar los diagramas de fuerza – elongación y esfuerzo – deformación en tiempo real, por lo cual se desarrolló una aplicación ejecutable .exe basada en Python con interfaz gráfica (GUI) para tal función, adicionalmente la aplicación registra los datos en un archivo .csv y guarda las gráficas de los diagramas (ver **Figura 5-5**: Software MEET Data Stream). Para el procesamiento de datos se implementó una segunda aplicación con las mismas características (ver **Figura 5-3**: Software MEET Data), esta aplicación es necesaria dado que los datos registrados durante el ensayo presentan cierto “ruido” que son variaciones debido al hardware y al sistema de accionamiento, por lo cual se requiere implementar un filtro para obtener los valores de la fuerza máxima y resistencia a la tracción (UTS), que se explica en mayor detalle en la sección 5.2.1.7 – (Procesamiento de los datos registrados). En la **Figura 4-2**, se presenta la integración completa del módulo educativo de ensayo de tracción, el sistema de adquisición de datos y la PC con el diagrama esfuerzo deformación.

Figura 4-2

Conexión del MEET con el sistema de adquisición de datos y la PC



4.3 Lista de Materiales Valorada (BOM)

En esta sección se presenta la lista de materiales valorada (BOM) (ver **Tabla 4-4**), que estructura cada componente y material necesario para su fabricación. Detalla el nombre, material, cantidad, precio unitario, subtotal y precio total. La lista incluye componentes mecánicos, electrónicos y demás insumos necesarios para asegurar el correcto funcionamiento del módulo educativo de tracción. De este modo, se garantiza la gestión del diseño.

A partir de esta información, el valor obtenido de la lista de materiales valorada (BOM) es S/ 7,605.37; este valor refleja el costo necesario para desarrollar el diseño del módulo educativo de ensayo de tracción y describir el comportamiento mecánico del acero ASTM A36.

Tabla 4-4

Lista de materiales valorada

LISTA DE MATERIALES VALORADA					
Producto Técnico: Modulo Educativo de Ensayo de Tracción (MEET) Fecha: 11/30/25					
Ítem	Componente	Detalle	Cant.	P. Unit.	Subtotal
1	Placa A	Metal	1	S/ 500.00	S/ 500.00
2	Placa B	Metal	1	S/ 380.00	S/ 380.00
3	Placa C	Metal	1	S/ 500.00	S/ 500.00
4	Placa D	Metal	1	S/ 340.00	S/ 340.00
5	Barra fija A	Metal	1	S/ 370.00	S/ 370.00
6	Barra fija B	Metal	1	S/ 370.00	S/ 370.00
7	Barra móvil C	Metal	1	S/ 500.00	S/ 500.00
8	Barra móvil D	Metal	1	S/ 500.00	S/ 500.00
9	Sujetado inferior	Metal	1	S/ 200.00	S/ 200.00
10	Sujetador superior	Metal	1	S/ 200.00	S/ 200.00
11	Acople PC	Metal	1	S/ 160.00	S/ 160.00
12	Rodamiento lineal LMK25	Metal y plástico	2	S/ 36.90	S/ 73.80
13	Tubo rectangular 50x25x3 mm	Metal	1	S/ 80.00	S/ 80.00
14	NEWTRY - Bomba hidráulica CP-180 + Cil. hidráulico RSC - 1050	Metal	1	S/ 649.38	S/ 649.38
15	Pata niveladora M10	Metal y elastómero	4	S/ 9.90	S/ 39.60
16	Tuerca hexagonal M16	Metal	11	S/ 1.20	S/ 13.20

17	Arandela plana M16	Metal	15	S/	0.40	S/	6.00
18	Arandela de Presión M16	Metal	3	S/	1.50	S/	4.50
19	Perno M16 de 80 mm	Metal	1	S/	5.00	S/	5.00
20	Perno 1/2 - 13 UNC	Metal	2	S/	4.00	S/	8.00
21	Tuerca mariposa 1/2 - 13 UNC	Metal	2	S/	1.50	S/	3.00
22	Arandela plana de 1/2"	Metal	4	S/	0.30	S/	1.20
23	Perno M6	Metal	4	S/	2.00	S/	8.00
24	Tuerca hexagonal M6	Metal	4	S/	0.50	S/	2.00
25	Arandela plana M6	Metal	8	S/	0.30	S/	2.40
26	Tuerca hexagonal M10	Metal	4	S/	1.00	S/	4.00
27	Arandela plana M10	Metal	8	S/	0.40	S/	3.20
28	Tornillo Alem M5x0.8 de 12 mm de longitud	Metal	8	S/	0.50	S/	4.00
29	Tornillo Alem M5x0.8 de 25 mm de longitud	Metal	4	S/	0.50	S/	2.00
30	Tuerca baja M16	Metal	2	S/	8.00	S/	16.00
31	Tubo cuadrado 50x50x1.5 mm	Metal	1	S/	60.00	S/	60.00
32	Acople superior del Sensor de desplazamiento lineal	Metal	1	S/	10.00	S/	10.00
33	Acople inferior del Sensor de desplazamiento lineal	Metal	1	S/	20.00	S/	20.00
34	Brazo deslizante	Metal	1	S/	10.00	S/	10.00
35	Fijador de brazo deslizante	Metal	1	S/	10.00	S/	10.00
36	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2"	Metal	2	S/	0.50	S/	1.00
37	Tornillo Stovebolt 5/32" x 1/2"	Metal	2	S/	0.40	S/	0.80
38	Tornillo Stovebolt 5/32" x 1/4"	Metal	3	S/	0.30	S/	0.90
39	Spray Pintura negro metálico	Consumible	2	S/	7.00	S/	14.00
40	Load cell 2T	Metal	1	S/	107.12	S/	107.12
41	Digital linear scale 5204 - 200	Metal y plástico	1	S/	113.45	S/	113.45
42	Microcontrolador ESP32	Electrónico	1	S/	19.74	S/	19.74
43	LCD2004 + I2C 20X4	Electrónico	1	S/	16.86	S/	16.86
44	Modulo ADC HX711 de 24 bits	Electrónico	1	S/	5.38	S/	5.38
45	Botón pulsador	Electrónico	1	S/	2.00	S/	2.00
46	GX Conector 4 Pin Circular Rosca Macho + Hembra	Electrónico	2	S/	8.00	S/	16.00
47	Caja de derivación PVC 150 x 110 x 80	Plástico	1	S/	12.00	S/	12.00
48	Cable USB tipo C	Metal y plástico	1	S/	20.00	S/	20.00
49	Grasa de litio multipropósito	Lubricante	1	S/	14.90	S/	14.90
50	Spray automotivo laca acrílica transparente	Consumible	1	S/	55.40	S/	55.40
51	Sierra copa bimetálica HSS 25 mm kwb	Metal	1	S/	49.40	S/	49.40

52	Ruedita Flap	Consumible	1	S/	16.40	S/	16.40
53	Lija para metal 3M	Consumible	5	S/	3.40	S/	17.00
54	Sierra copa bimetel HSS 35 mm kwb	Metal	1	S/	55.90	S/	55.90
55	Broca HSS 1/2 Boch	Metal	1	S/	32.00	S/	32.00
56	Plancha LAC A36	Metal	1	S/	139.47	S/	139.47
57	Probeta MDF	MDF	1	S/	6.00	S/	6.00
58	Calibrador digital 6" 0-150mm sata st91511sc	Metal y plástico	1	S/	200.00	S/	200.00
59	Set de limas	Metal	1	S/	60.00	S/	60.00
60	Disco Corte Metal 4-1/2" x 1/8" x 7/8" BNA12 - Norton	Consumible	4	S/	5.00	S/	20.00
61	Llave Alem de 4 mm	Metal	1	S/	2.00	S/	2.00
62	Regla de acero inoxidable 15 cm	Metal	1	S/	6.90	S/	6.90
63	Marcadores SHARPIE Twin Blister 3un	Pastico	1	S/	11.90	S/	11.90
64	Llave mixta de 24 mm	Metal	1	S/	13.00	S/	13.00
65	Tope caucho antideslizante 30mm	Caucho	4	S/	1.00	S/	4.00
66	Consultoría electrónica	Servicio		S/	700.00	S/	700.00
67	VDI 2221 - 2019	Documento técnico	1	S/	466.07	S/	466.07
69	Estándar ASTM E8/E8M-24	Documento técnico	1	S/	350.50	S/	350.50
TOTAL							S/ 7605.37
Elaborado por: J.D.A.V. - J.C.A.V.							
Revisado por: E.W.S.P.							
Aprobado por: E.W.S.P.							

Nota: Costo en nuevos soles.

Ulrich et al. (2020), proporciona una forma de establecer el costo objetivo del producto, el cual consiste en fijar el valor de las especificaciones de fabricación basado en el precio que la empresa espera que el usuario final pague por el producto y en los márgenes de rentabilidad que se requieren en cada etapa del canal de distribución.

Estableciendo como condición una venta directa entre el fabricante y el usuario final, se selecciona un margen de ganancia aproximado para el fabricante, estableciendo como categoría de producto: equipos industriales. Del grafico propuesto por Ulrich et al. (2020) para las condiciones

establecidas, el margen bruto se encuentra en el rango del 20 al 45%. Considerando el benchmarking se elige un margen bruto de 0.4 y $P = 10,000$ USD, lo que resulta en un costo de manufactura limite o de referencia de 6,000 USD. Este costo establece un límite en el costo de manufactura de un producto, este costo no incluye aspectos como el marketing, impuestos, certificaciones y otros aspectos requeridos en un entorno comercial.

$$C = P \times (1 - M) \quad (4.1)$$

$$C = 10,000 \times (1 - 0.40)$$

$$C = 6,000 \text{ USD}$$

El costo obtenido al desarrollar esta etapa de diseño, puede considerarse un costo base sin consideraciones comerciales antes mencionadas que suponen variables que incrementarían el precio para el usuario final, sin embargo, este costo establece perfectamente el costo de manufactura para replicar el módulo educativo de ensayo de tracción.

Capítulo 5:

Ensayo de Tracción ASTM E8/E8M y Estadística de Precisión

Continuando con la fase 5 de la creación del producto, en el presente capítulo se presenta la operación del módulo educativo de ensayo de tracción, aquí se realiza la validación del producto técnico obtenido en el capítulo anterior. La validación se desarrolla realizando el ensayo de tracción y la estadística de precisión de los resultados obtenidos por el producto.

5.1 Fabricación de la probeta

De acuerdo con el estándar ASTM E8/E8M, la fabricación de la probeta debe seguir indicaciones rigurosas para garantizar que las propiedades del material no se alteren durante el proceso de fabricación seleccionado y que los resultados obtenidos sean válidos. A continuación, se detalla las consideraciones más importantes (ASTM International, 2024, p. 3):

- Para maximizar la precisión y minimizar la desviación de los resultados se debe tener un cuidado especial durante el proceso de mecanizado de la probeta.
- La sección reducida incluidos los filetes de la probeta, debe estar libre de trabajo en frío, muescas, marcas de vibración, ranuras, hendiduras, rebabas, superficies o bordes rugosos, sobrecalentamiento o cualquier otra condición la cual pueda afectar negativamente a las propiedades mecánicas que se van a medir.
- En probetas de sección transversal rectangular, los bordes o las esquinas no deben ser rectificadas ni desbastados de forma que alteren significativamente el área de sección transversal del área calculado.

Proceso de fabricación de la probeta:

Preparación del material:

- La probeta se obtiene a partir de una lámina de acero ASTM A36 de dimensiones

1200 mm x 2400 mm, el estándar A1011/A1011M. establece que las probetas se tomarán con el eje longitudinal paralelo a la dirección de laminación (ensayo longitudinal), adicionalmente indica que las probetas deben tomarse de la zona media entre el centro y el borde de la lámina (ASTM International, 2018, p. 6).

- La geometría de la probeta de acuerdo al estándar se presenta en la **Figura 2-14**.

Trazado de la probeta:

- Se marca la silueta de la probeta sobre la lámina con una plantilla de MDF para obtener sus dimensiones aproximadas.

Mecanizado de la probeta:

- Se realizan los dos agujeros de la probeta con una broca de media pulgada, posteriormente se comprueba la alineación de los agujeros y en cuyo caso no se encuentren alineados se vuelve a realizar el trazado la probeta alineando los agujeros realizados con los de la plantilla de MDF.
- En las cuatro zonas del radio de filete se realizan agujeros con una sierra copa bimetálica de 25 mm, obteniendo así los filetes de la probeta.
- En las partes rectas de la probeta se realizan cortes por abrasión con una amoladora angular de 4 ½".
- Es importante realizar todos los cortes a una cierta distancia de las marcas de la probeta, esto con el objetivo de obtener dimensiones ligeramente superiores a la probeta y asegurar la precisión posterior mediante procesos de desbaste manual.

Desbaste y pulido de la probeta:

- El desbaste de los bordes de la probeta se realiza mediante la utilización de un juego de limas planas, circulares y de media luna, las cuales se aplican de manera

progresiva desde el grano grueso hasta el grano fino. En particular, se debe prestar especial atención a la zona del calibre de la probeta durante el proceso.

- Para asegurar la exactitud, es necesario verificar frecuentemente las dimensiones utilizando la plantilla y realizar mediciones precisas con el calibrador vernier.
- Se realiza el pulido manual de la probeta aplicando lijas de grano grueso al más fino progresivamente y obtener un acabado superficial liso.
- Finalmente se realiza el control dimensional de la probeta fabricada utilizando un calibrador vernier de resolución 0.02 mm.

5.2 Ensayo de Tracción ASTM E8/E8M

5.2.1 Procedimiento y parámetros del ensayo de tracción

De acuerdo con el estándar ASTM E8/E8M, se describe el procedimiento paso a paso del ensayo de tracción, que se realizará de la siguiente manera:

5.2.1.1 Preparación del módulo educativo de ensayo de tracción

Antes de realizar el ensayo de tracción se realiza la conexión de los sensores al módulo electrónico, seguidamente se conecta a la PC con un cable USB tipo C para establecer el envío de datos del microcontrolador a la PC. En la PC, abrir el software libre CoolTerm, el cual es un terminal de puerto de serie para el envío de datos del microcontrolador al computador y realizar el registro de los datos de fuerza y elongación. En cuanto a la velocidad del ensayo se establece de acuerdo al método de control C – Control de velocidad del travesaño y la sub sección de “Velocidad de ensayo al determinar la resistencia a la tracción”, establecido en el estándar ASTM E8. La velocidad para materiales con elongaciones esperadas superiores al 5% cuando se determina solo la resistencia a la tracción o después del comportamiento de fluencia se debe encontrar en un rango de 0.05 y 0.5 mm/mm (o in/in) por minuto de la longitud de sección reducida. La probeta de

acero ASTM A36 de acuerdo a la tabla 4 “requisitos de propiedades mecánicas” del estándar (ASTM International, 2018) indica una elongación mínima del 20%, Para G = 50mm.la elongación mínima debe ser igual a 10 mm. La velocidad del ensayo debe ser igual o menor a 25 mm/min calculado con G = 50 mm y tomando 0.5 mm/mm/min con una elongación mínima indicada de 10 mm; la velocidad se encuentra en el rango de 2.5 a 25 mm/min. Se determina que el ensayo deberá tener una duración mínima de 24 segundos y máxima de 240 segundos para la resistencia a la tracción (UTS).

5.2.1.2 Preparación de las probetas

Medición de las dimensiones de las probetas de ensayo: En la **Tabla 5-1** se presenta la medición del ancho, el espesor y el cálculo del área de sección transversal de cada probeta. Se observa una variación del ancho de la probeta sin embargo se encuentran dentro de la tolerancia de 12.5 ± 0.2 mm, indicada por el estándar E8/E8M (ASTM International, 2024, p. 8)

Tabla 5-1

Dimensiones iniciales de las probetas de ensayo

Probeta	1	2	3	4	5	6	7
$W_0(mm)$	12.5	12.4	12.52	12.58	12.51	12.41	12.45
$T_0(mm)$	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
$A_0(mm^2)$	22.5	22.32	22.536	22.644	22.518	22.338	22.41

Tabla 5-1 (continuación)

Probeta	8	9	10	11	12	13	14
$W_0(mm)$	12.53	12.49	12.48	12.59	12.61	12.54	12.55
$T_0(mm)$	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
$A_0(mm^2)$	22.554	22.482	22.464	22.662	22.698	22.572	22.59

Marcado de la longitud del calibre de las muestras de ensayo: Se realizan marcas de calibre antes del ensayo para facilitar la medición de la elongación después de la fractura (ver **Figura 5-1**). Si la elongación es superior al 3 % y no se conoce con exactitud la ubicación de la fractura, se pueden realizar más de dos marcas de longitud específica e incluso fuera de la línea central transversal de la probeta (ASTM International, 2024).

Figura 5-1

Marcas de calibre central y extremos



Nota: Calibre $G = 50 \text{ mm}$.

5.2.1.3 Sujetar la probeta de ensayo

La probeta se coloca en las aberturas de los sujetadores y se colocan los pernos, que hacen la función de pines. Asegurar los pernos mediante las tuercas tipo mariposa manualmente.

5.2.1.4 Puesta a cero de la máquina de ensayo:

Para configurar la puesta a cero en los sensores del módulo educativo de ensayo de tracción, se debe pulsar el botón rojo de “Puesta a Cero” – “Zero” indicado y observar la indicación en el display digital (ver **Figura 4-1**).

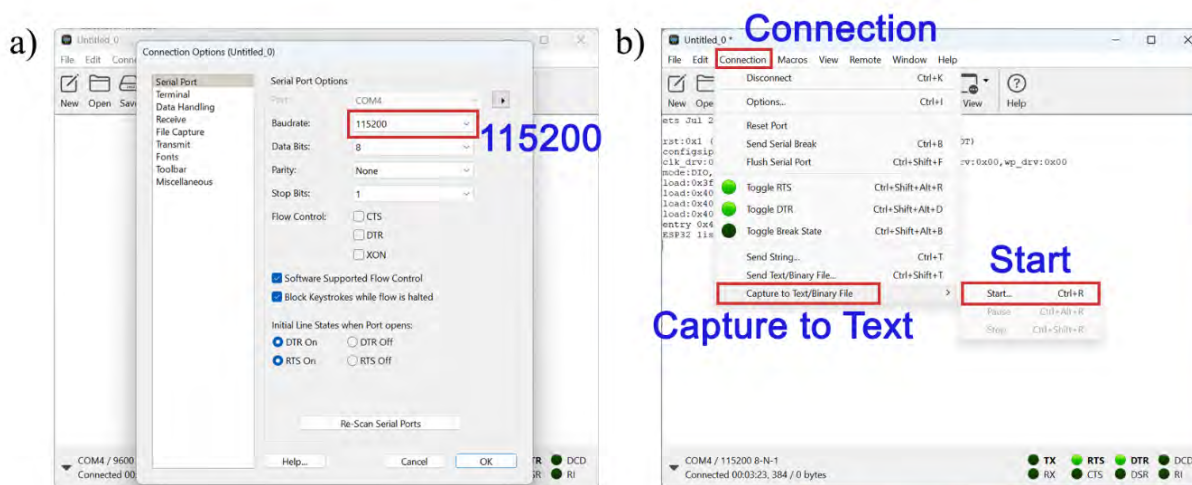
5.2.1.5 Registrar los datos de fuerza y elongación

Para registrar los datos sin procesar, fuerza y elongación se utiliza el software libre CoolTerm. Se configura el software para obtener los datos de fuerza y elongación siguiendo los siguientes pasos (ver **Figura 5-2**):

1. Dar clic en “Connect” y posteriormente “Options”, seleccionar el puerto manualmente si este no se asigna automáticamente y el “baudrate” en 115200.
2. Presionar el botón de “Puesta a Cero” para asegurar que los sensores de fuerza y desplazamiento se encuentren en 0 o negativos cercanos a 0, comprobar en el software estos valores. Volver a presionar el botón si no se muestra lo valores.
3. En el menú “Connection” dar clic en “Capture to...” → “Start”. A continuación, se abre una ventana emergente para crear un archivo de texto .txt, asignar el nombre del archivo como “Ensayo de tracción ###” con el número del ensayo realizado. El archivo de texto creado permite guardar automáticamente los datos de tiempo, elongación y fuerza automáticamente para su procesamiento posterior.
4. Con el archivo de texto creado, se procede a iniciar el sistema presionando el botón de “Puesta a Cero” del sistema de adquisición de datos para iniciar el ensayo.

Figura 5-2

Configuración del software de adquisición de datos



Nota: Baudrate:115200.

5.2.1.6 Realizar el ensayo de tracción

Aplicar la carga progresivamente de forma continua y constante; la duración del ensayo debe ser de mínimo 24 segundos y máximo de 240 segundos hasta lograr la deformación máxima y consecuentemente la fractura de la probeta. Se recomienda un tiempo ≥ 120 segundos para lograr el ensayo “cuasiestático”.

5.2.1.7 Procesamiento de los datos registrados

Durante el ensayo de tracción se registran los datos de fuerza - elongación en tiempo real, los cuales se observan en el computador y en la pantalla digital. A continuación, se describe el paso a paso del procesamiento de los datos registrados con el objetivo de obtener la curva esfuerzo – deformación. Finalizado el ensayo de tracción los datos quedan registrados en el archivo de texto .txt o .csv. Adicionalmente al software del registro de datos “CoolTerm” se desarrolla una aplicación enfocada en visualizar el diagrama fuerza – elongación en tiempo real; en la **Figura 5-5**, se detalla una captura de la aplicación “MEET Data Stream”.

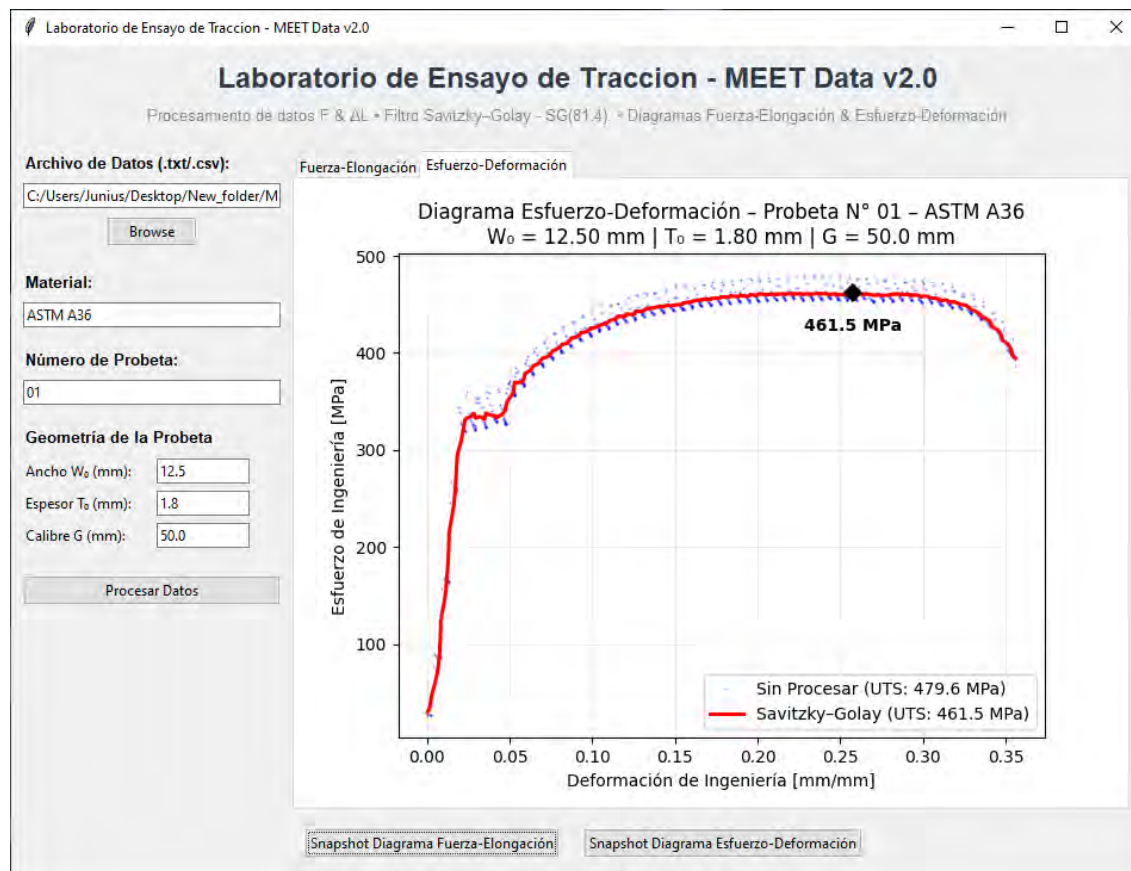
5.2.1.8 Analizar los valores calculados

Obtenido el archivo de texto (.txt) se exporta a la aplicación basada en Python “MEET Data”, desarrollada en el presente proyecto para obtener el diagrama esfuerzo – deformación. Los datos obtenidos se denominan “datos crudos o sin procesar” y presentan ruido de las señales eléctricas, por lo que es necesario aplicar un filtro para atenuarlo. En este caso de estudio, es importante preservar los picos altos para obtener la fuerza máxima y la resistencia a la tracción (UTS), por lo que se aplica el filtro Savitzky-Golay a los datos de fuerza. La aplicación MEET Data filtra los datos de fuerza con la configuración (tamaño de ventana: 81, orden del polinomio: 4). En la **Figura 5-3** se presenta una captura de la aplicación con el diagrama fuerza – elongación de la probeta 1, en rojo con la aplicación del filtro y en azul con los datos sin procesar. A la

izquierda se presenta un espacio para completar los datos sobre la información de la probeta. Esta aplicación guarda automáticamente los datos filtrados en un archivo .csv. Adicionalmente cuenta con la opción de guardar los diagramas en archivos tipo .png.

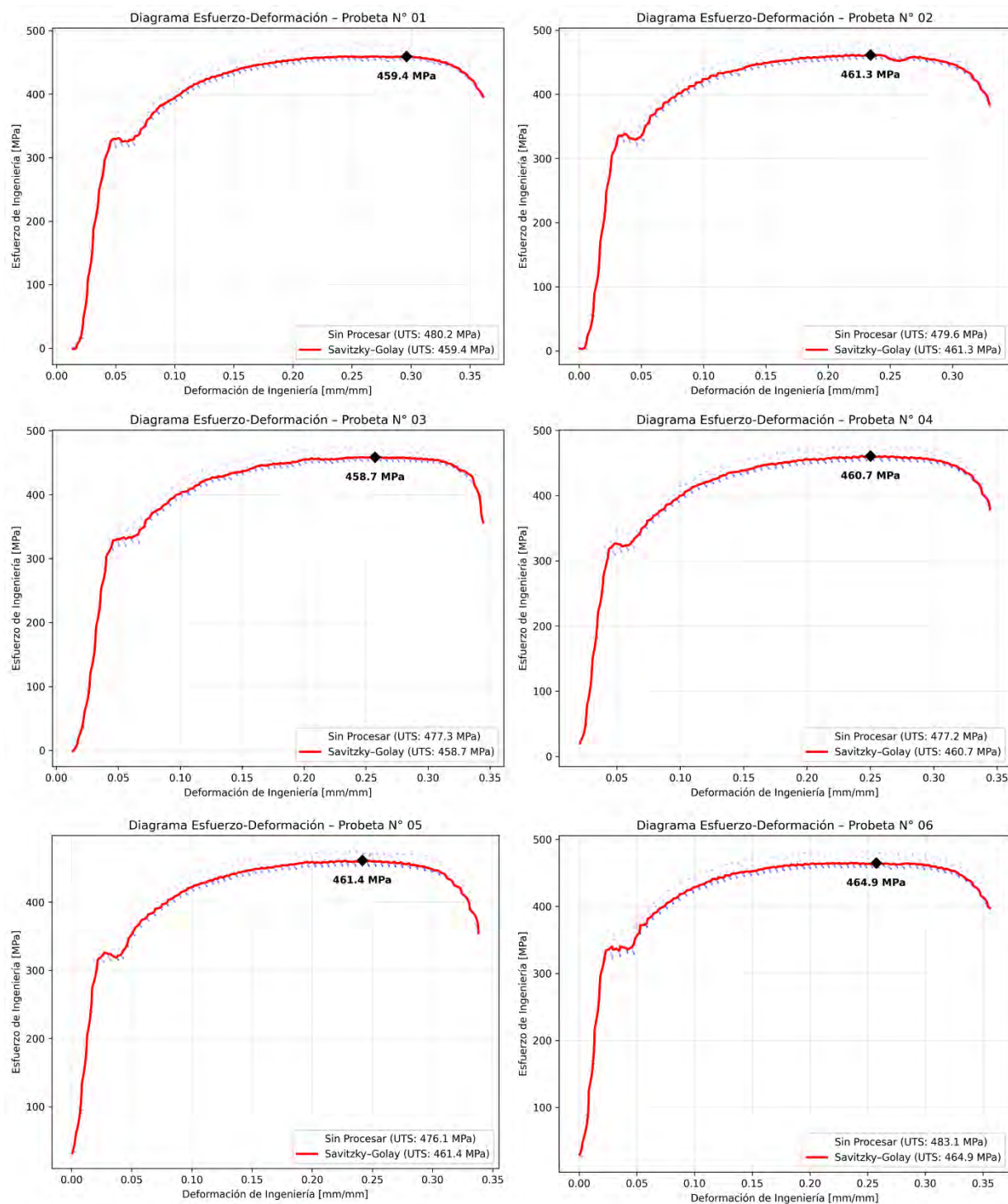
Figura 5-3

Software MEET Data (Anexo J: Repositorio Online)



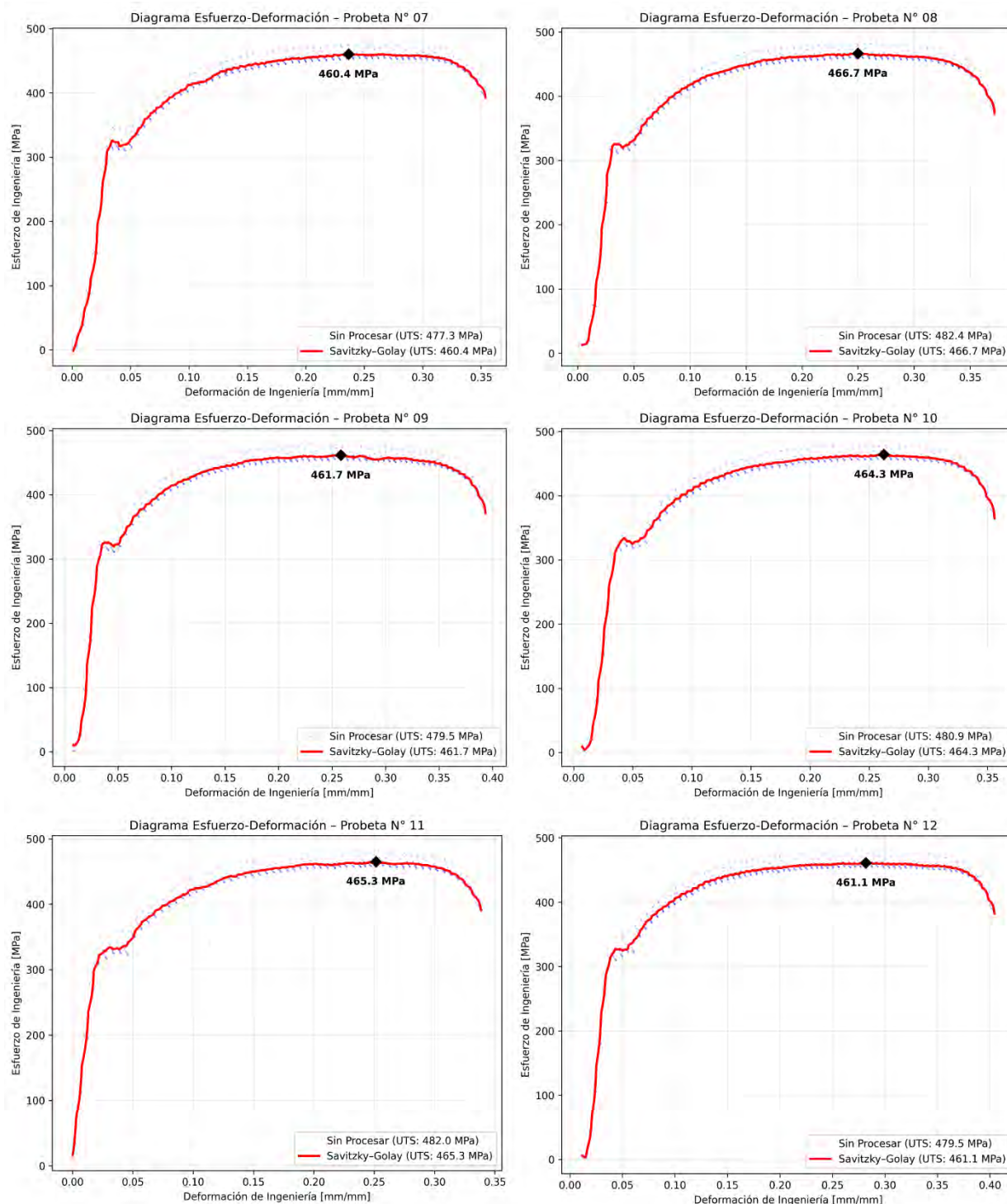
Nota: Desgrama fuerza – elongación de la probeta número 1.

Los datos filtrados en .csv se presentan en la **Figura 5-6**, se obtienen cerca de 700 datos en cada ensayo de tracción con una columna adicional “SG_Fuerza[N]” para los datos de fuerza con el filtro Savitzky-Golay. En la **Figura 5-4**, se presentan las curvas de ingeniería de esfuerzo – deformación de ingeniería para las 14 probetas, obtenidas a partir de los datos registrados de fuerza y elongación con las ecuaciones (2.1) y (2.2) respectivamente.

Figura 5-4*Diagramas esfuerzo – deformación*

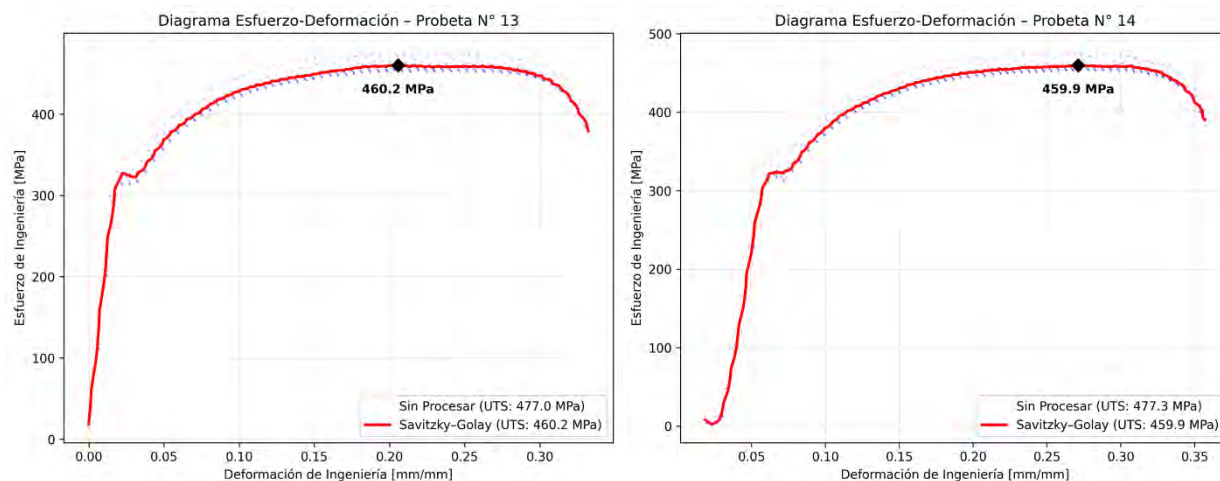
Nota: Probetas 1 – 6.

Figura 5-4 (continuación)



Nota: Probetas 7 – 12.

Figura 5-4 (continuación)



Nota: Probetas 13 y 14.

Figura 5-5

Software MEET Data Stream (Anexo J: Repositorio Online)



Nota: Grafica en tiempo real fuerza – elongación.

Los diagramas obtenidos presentan claramente la zona elástica, de fluencia y la zona plástica. En un punto de diamante se presenta la fuerza máxima y el esfuerzo máximo o también denominado resistencia ultima a la tracción – UTS. Una característica particular en las láminas de acero es la región alrededor de los puntos máximos de fuerza y esfuerzo (Ver **Figura 5-3** y **Figura 5-4**), en esta zona el incremento de fuerza es bajo en comparación a la deformación y se observa

como una meseta “Plateau” que es como se denomina en el estándar ASTM E8/E8M (ASTM International, 2024, p. 21).

Figura 5-6

Datos registrados por el sistema de adquisición de datos

1	Tiempo[s]	Desplazan	Fuerza[N]	SG_Fuerza[N]	664	152.59	17.57	9377.49	9460.87
2	2.11	0	14.65	19.13	665	152.82	17.62	9357.53	9467.09
3	2.31	0.01	23.99	20.59	666	153.06	17.65	9342.55	9458.52
4	2.51	0.05	23.9	21.80	667	153.29	17.68	9332.78	9441.86
5	2.73	0.09	24.3	22.77	668	153.52	17.71	9324.12	9416.91
6	2.93	0.12	23.83	23.52	669	153.75	17.72	9315.12	9384.66
7	3.13	0.15	23.67	24.09	670	153.98	17.74	9304.23	9346.63
8	3.33	0.17	23.88	24.48	671	154.22	17.75	9321.31	9296.03
9	3.55	0.19	23.81	24.74	672	154.45	17.77	9606.99	9273.86
10	3.78	0.2	23.84	24.87	673	154.69	17.79	9384.1	9249.68
11	3.98	0.22	24.06	24.90	674	154.91	17.83	9413.26	9222.13
12	4.18	0.23	23.97	24.86	675	155.15	17.88	9107.74	9189.84
13	4.38	0.24	24.48	24.21	676	155.38	17.92	8989.41	9151.47
14	4.6	0.31	25.14	23.95	677	155.62	17.96	8949.31	9105.65
15	4.82	0.35	24.8	24.03	678	155.85	17.98	8924.32	9051.03
16	5.02	0.4	24.82	24.27	679	156.09	18.01	8907.79	8986.24
17	5.22	0.43	24.93	24.47	680	156.31	18.03	8888.65	8909.93
18	5.42	0.46	25.28	25.05	681	156.54	18.06	9019.15	8820.74

Nota: Archivo (.csv) del ensayo número 1.

Los valores medidos y/o calculados son:

- **Resistencia última a la tracción:** Aplicando la ecuación (2.5) se obtiene la resistencia ultima a la tracción (ver **Tabla 5-2**), aplicando el redondeo indicado en (ASTM International, 2024, p. 22):

Tabla 5-2

Resistencia última a la tracción

Probeta	1	2	3	4	5	6	7
$F_{max} (N)$	10336.6	10296.5	10337.3	10431	10389.7	10384.5	10316.6
$\sigma_u (Mpa)$	459	461	459	461	461	465	460

Tabla 5-2 (continuación)

Probeta	8	9	10	11	12	13	14
---------	---	---	----	----	----	----	----

F_{max} (N)	10525.6	10380.5	10430.2	10544.7	10466.4	10387.1	10388.3
σ_u (Mpa)	467	462	464	465	461	460	460

La resistencia ultima a la tracción de las probetas se encuentra en el rango de 400 – 550 [MPa] establecido por el estándar ASTM A1011/1011M (ASTM International, 2018)

- **Elongación:** La elongación se puede indicar de dos formas, elongación en la fractura mediante los datos registrados durante el ensayo o elongación después de la fractura mediante mediciones finalizado el ensayo, se debe especificar el método utilizado dado que no son parámetros intercambiables (ASTM International, 2024, p. 21). En la **Tabla 5-3** se presenta el porcentaje de elongación después de la fractura (2.7), dado que la elongación en la fractura se realiza estrictamente con el uso del extensómetro de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M.

Tabla 5-3

Porcentaje de elongación después de la fractura

Probeta	1	2	3	4	5	6	7
L_f (mm)	64.47	64.16	64.41	64.09	64.69	66.02	64.33
% Elongación	29	28	29	28	29	32	29

Tabla 5-3 (continuación)

Probeta	8	9	10	11	12	13	14
L_f (mm)	65.72	66.78	59.39	64.95	67.36	64.87	63.54
% Elongación	31	34	19	30	35	30	27

Los valores obtenidos del porcentaje de elongación son consistentes a lo indicado por el estándar A1011/A1011M (ASTM International, 2018), son mayores mínimo requerido de 20 %.

- **Reducción de área:** En probetas planas, las dimensiones en la parte central son menores que en los extremos debido a la restricción que se produce, por lo que las superficies planas originales se asumen parabólicas y, en consecuencia, se calcula un espesor efectivo T_e , calculado de la siguiente forma: $(T_1 + 4T_2 + T_3)/6$, siendo T_1 y T_3 el espesor en los extremos y T_2 en zona central (ASTM International, 2024, p. 22). Aplicando la ecuación (2.8) obtenemos la reducción de área (ver **Tabla 5-4**), se aplica el redondeo de acuerdo a (ASTM International, 2024, p. 22):

Tabla 5-4*Porcentaje de reducción de área*

Probeta	1	2	3	4	5	6	7
$W_f(mm)$	9.22	9.01	9.21	9.07	9.24	9.10	8.93
$T_1(mm)$	1.23	1.22	1.08	1.14	1.24	1.03	1.20
$T_2(mm)$	0.84	0.83	0.88	0.81	0.84	0.86	0.86
$T_3(mm)$	1.14	1.16	1.05	1.18	1.13	1.17	1.10
$T_e(mm)$	0.955	0.950	0.942	0.927	0.955	0.940	0.957
$A_f(mm^2)$	8.805	8.560	8.673	8.405	8.824	8.554	8.543
% Red. de Area	61	62	62	63	61	62	62

Tabla 5-4 (continuación)

Probeta	8	9	10	11	12	13	14
$W_f(mm)$	9.21	9.24	8.94	9.26	9.01	9.00	9.12
$T_1(mm)$	1.07	0.99	1.24	1.05	1.25	1.13	1.23
$T_2(mm)$	0.83	0.86	0.89	0.86	0.80	0.75	0.81

$T_3 (mm)$	1.03	0.97	1.15	1.02	1.20	1.16	1.21
$T_e (mm)$	0.903	0.900	0.992	0.918	0.942	0.882	0.947
$A_f (mm^2)$	8.320	8.316	8.866	8.504	8.484	7.935	8.634
% Red. de Area	63	63	61	62	63	65	62

En la Figura 5-7 se presenta la probeta después del ensayo, en general la fractura se produce en la zona central de la longitud de calibre con un modo de rotura dúctil.

Figura 5-7

Probeta después del ensayo de tracción



Nota: Rotura en la zona central.

5.3 Estadística de Precisión

El objetivo del análisis estadístico sobre los resultados obtenidos al realizar el ensayo de tracción en el módulo educativo de ensayo de tracción es validar la repetibilidad y la reproducibilidad de los mismos, asegurando así la consistencia de las mediciones y los valores calculados. Entre los factores que afectan la repetibilidad se encuentran los instrumentos, la homogeneidad del material de ensayo, la preparación de la probeta, las condiciones del ensayo y los errores de medición (ASTM International, 2024, pp. 27-28). Estos factores influyen en la precisión y la desviación de las mediciones.

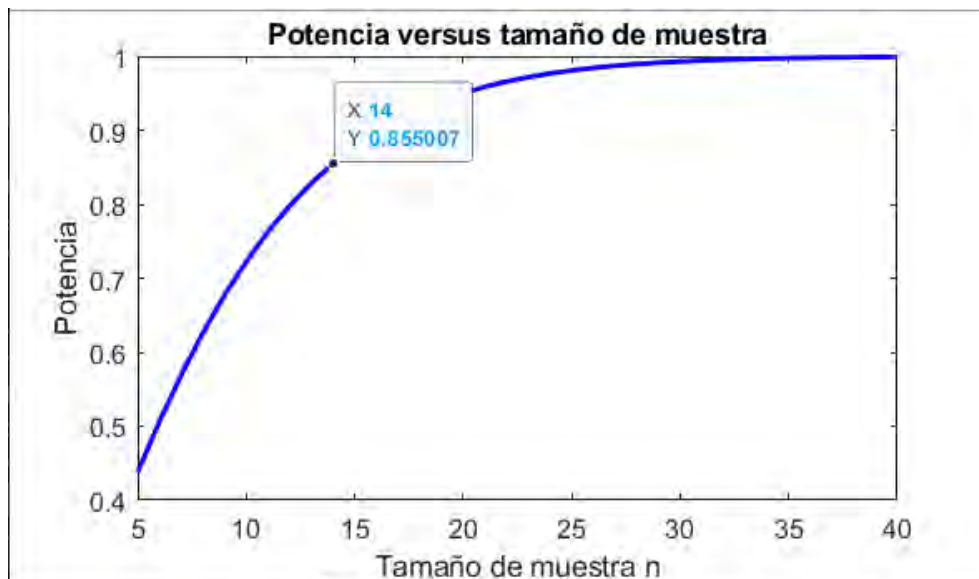
El análisis estadístico de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M se realiza para los parámetros de la resistencia a la tracción o resistencia última a la tracción, % de elongación y % de reducción de área.

Estimación del tamaño de muestra:

El tamaño de muestra se estima utilizando la *Toolbox* de estadística y machine learning de Matlab, que genera una curva de la relación entre la potencia y el tamaño de muestra. En la **Figura 5-8** se presenta la gráfica generada en Matlab por la función “*sampsizepwr*”. Un tamaño de muestra mínimo de $n = 14$ corresponde a una potencia de 0.855007 o su equivalente en porcentaje de 85.5%.

Figura 5-8

Curva de potencia versus tamaño de muestra



Nota: Curva generada por la función ‘sampsizepwr’ en Matlab (The MathWorks Inc., 2024).

Ecuación para el cálculo de la media:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

Ecuación para la desviación estándar de repetibilidad de la muestra:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (5.2)$$

En la **Tabla 5-5**, se presenta un resumen de las medias y la desviación estándar de los parámetros calculados.

Tabla 5-5

Estadística de precisión

Parámetro	$\bar{x}$	s_r
Resistencia última a la tracción	461.8	2.49
% Elongación	29.29	3.73
% de reducción de área	62	1.07

Nota: los valores presentados en la tabla siguen el redondeo recomendado de acuerdo al estándar ASTM E29.

Discusión:

La resistencia última a la tracción presenta una media de 461.8 MPa y una desviación estándar de 2.49 MPa, este valor se encuentra dentro del rango de 400 a 550 [MPa]. La media del porcentaje de elongación resultante es del 29.29 % con una desviación estándar del 3.73 %, encontrándose superior al mínimo requerido del 20 %. Respecto a la reducción de área se obtuvo una media del 62 % con una desviación estándar del 1.07 %.

El estándar ASTM A36 concretamente indica valores mínimos de resistencia y porcentaje de elongación que un acero debe cumplir para poder ser caracterizado con la especificación, no se hace mención o se presenta una tabla con valores de ensayos de tracción. Sin embargo, con el objetivo de comparar los valores obtenidos del ensayo de tracción realizado, específicamente de

la probeta tipo lámina (*sheet-type*), se toman como referencia los valores del informe de ensayo de materiales (MTR) presentado por (Brockenbrough, 2003, p. 2) y publicado en la revista de ingeniería de la AISC – “*American Institute of Steel Construction*”.

El informe MTR presenta la media de la resistencia a la tracción igual a 67.89 Ksi (468.08MPa) y una desviación estándar igual 3.7192 ksi (25.65 MPa); los detalles del estudio son los siguientes: material ASTM A36, espesor entre 4.78 - 19.05 [mm] y 14900 ensayos realizados. Para el porcentaje de elongación con un calibre de 50 mm la media fue de 35.50 % y la desviación estándar de 8.0788 %.

Dado que los espesores de la probeta tipo lámina no son iguales a los del estudio y que este parámetro afecta a los resultados del ensayo de tracción, no es factible realizar una prueba estadística directamente. El estudio se realiza sobre un rango de espesores por lo cual se observa que la desviación estándar es mayor a los obtenidos del presente estudio.

Respecto a la media de la resistencia a la tracción obtenida del ensayo igual a 461.8 MPa y la presentada por el informe MTR igual a 468.08 MPa, se observa una diferencia del 1.35 %; el mismo estudio presenta una media de 71.2091 Ksi (490.85 MPa) para espesores comprendidos entre 19.05 - 101.6 [mm] el cual es superior al anterior en 4.64%.

Dado que el espesor de 1.8 mm de la probeta del presente estudio frente a los 4 a 19.05 [mm] del estudio MTR es ligeramente menor se puede considerar que la diferencia del 1.35% se debe a la diferencia del espesor de la probeta, sin embargo, el incremento del valor de la resistencia a la tracción es más susceptible al incremento de la velocidad de deformación “*strain rate*”.(ASTM International, 2024, p. 27).

En la **Tabla 5-6** y la **Figura 5-9**, se presenta una comparación de la resistencia a la tracción del presente estudio y del informe MTR.

Para el porcentaje de elongación se añade un parámetro adicional tomado del reporte de investigación “Reporte”. realizado por (Rex & Easterling, 1996, p. 27).

Tabla 5-6`

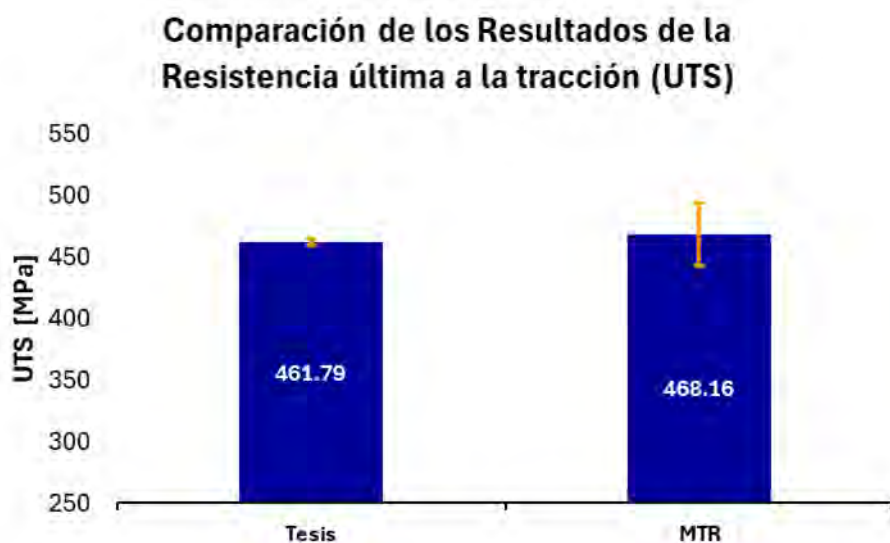
Comparación de los resultados

#	Estudio	UTS		% Elongación	
		$\bar{x}$	s_r	$\bar{x}$	s_r
1	Tesis	461.8	2.49	29.29	3.73
2	MTR	468.16	25.64	35.50	8.08
3	Reporte	-	-	30.00	-

Nota: $\bar{x}$ media y s_r : desviación estándar.

Figura 5-9

Comparación de los Resultados de la Resistencia última a la tracción (UTS)



Nota: Grafico de barras con desviación estándar.

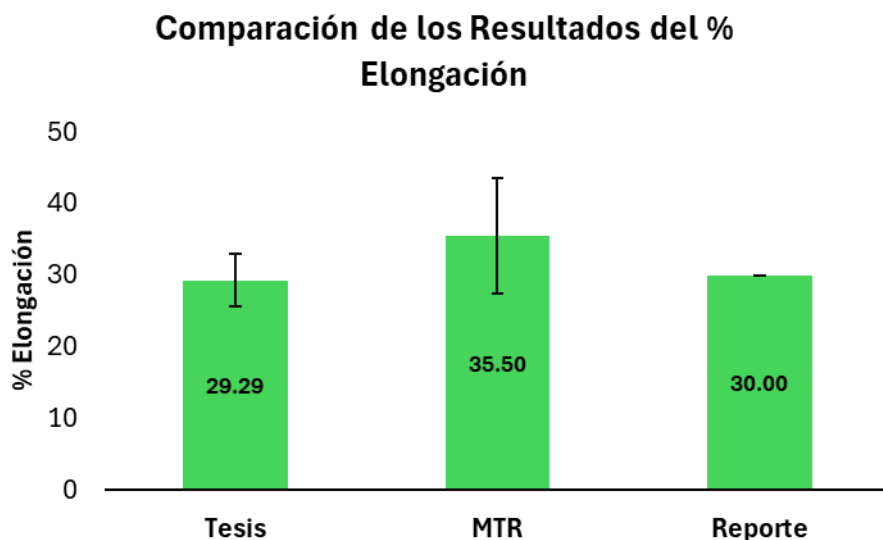
Del mismo modo se compara el porcentaje a la elongación obtenido, igual a 29.29 % frente a los 35.4978 % para espesores comprendidos entre 4.78 - 19.05 [mm] y 37.6538 % para espesores entre 19.05 – 101.6 [mm]. El incremento de la elongación presenta una relación directa al

incremento del espesor; esta relación es validada en el estándar E8, donde se indica que probetas con cocientes menores de la relación $(L_o/(A_o)^{1/2})$, L_o : longitud de calibre original y A_o : área de la sección transversal original), generalmente presentan mayores valores de elongación y reducción de área. Del reporte (Rex & Easterling, 1996), aplicando la relación $L_o/(A_o)^{1/2}$ se selecciona la probeta (25-1) dado que su cociente de la relación es 10.72 y del presente estudio 10.54.

La Figura 5-10, se presenta el grafico de barras con la desviación estándar de los 3 resultados, se observa una ligera diferencia entre el primer y tercer resultado, no obstante, esta variación se encuentra exactamente en concordancia con los cocientes calculados anteriormente de la relación $L_o/(A_o)^{1/2}$.

Figura 5-10

Comparación de los Resultados del % Elongación



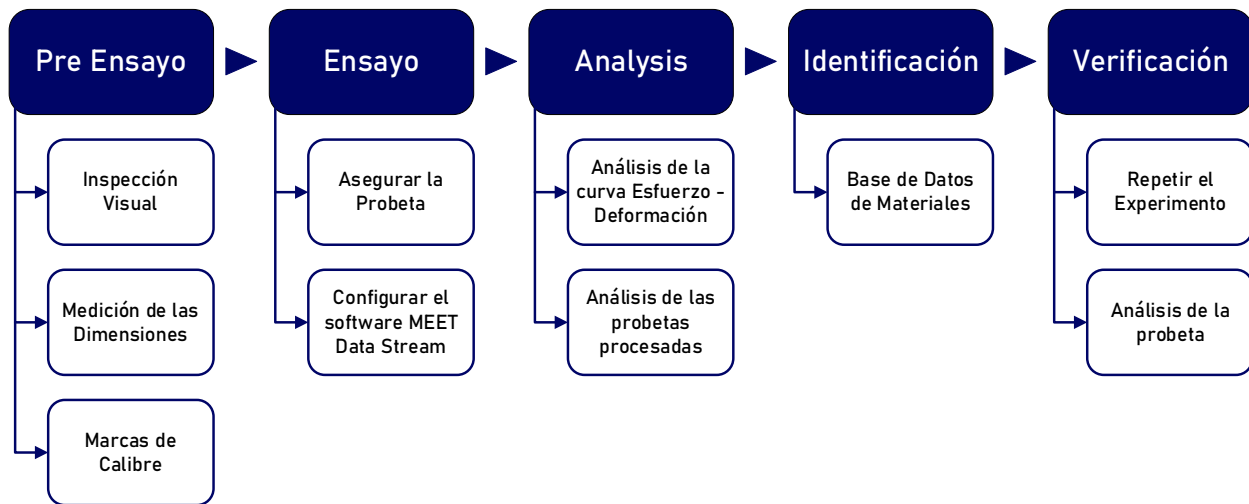
Nota: Grafico de barras con desviación estándar (Sr reporte desconocido).

5.4 Enfoque Experimental

De acuerdo a lo desarrollado en el presente capítulo se presenta la síntesis (ver Figura 5-11) de lo desarrollado y se presenta la práctica de laboratorio sugerida para el ensayo de tracción.

Figura 5-11

Fases para la Descripción Experimental del Comportamiento Mecánico



Nota: Secuencia del ensayo de tracción para la descripción del comportamiento mecánico.

Capítulo 6:

Evaluación del Efecto de la Preparación de la Probeta en la Resistencia a la Tracción y las Propiedades de Ductilidad

En el capítulo previo se obtuvo la media y la desviación estándar de los resultados de las catorce probetas. Todas las probetas de tracción se mecanizaron con corte y desbaste manual; este proceso cumple con lo establecido por el estándar ASTM E8/E8M respecto a la fabricación de la probeta. En la industria se obtienen estas probetas en fresadoras con accesorios especiales para sujetar las láminas, otro proceso de fabricación es el troquelado y rectificado que reduce en gran medida el tiempo de fabricación de las probetas. Estos procesos de fabricación requieren de máquinas complejas para tal función, siendo su mayor limitación la disponibilidad.

Previamente en la subsección de los antecedentes se describió investigaciones respecto a procesos alternativos de fabricación para las probetas tipo lámina. Krahmer et al. (2016), señalan que aplicar estas alternativas en la manufactura de las probetas podrían estar más cercanas de los procesos de aplicación finales en determinados componentes.

Variar el proceso de fabricación de la probeta, es decir la preparación de la probeta implica una variabilidad en los resultados del ensayo de tracción; y supone que las observaciones sucesivas de un proceso o fenómeno no produzcan exactamente el mismo resultado, esta variabilidad puede ser descrita y entendida por los métodos estadísticos (Montgomery & Runger, 2018).

Montgomery & Runger (2018) señala que, realizar cambios deliberados en las variables de control de un sistema o proceso para observar los datos de salida del sistema y posteriormente realizar una inferencia o decisión, requiere realizar el diseño del experimento aleatorio para establecer relaciones de causa efecto por el ingeniero.

Montgomery & Runger (2018), presenta una directriz del procedimiento recomendado para el diseño de un experimento: identificación y reconocimiento del problema → selección de la variable de respuesta → selección de los factores, niveles y rangos → selección del diseño experimental → realizar el experimento → análisis estadístico de los datos → conclusiones y recomendaciones (ver sección 6.1).

El análisis de la varianza ANOVA, es un método estadístico para comparar las medias de dos o más grupos para determinar si existen diferencias significativas entre ellos. Para realizar este método se asumen tres condiciones: independencia, normalidad y homogeneidad. En este caso de estudio se establece el análisis de la varianza unidireccional o unifactorial “*one -way ANOVA*” que supone que se tiene diferentes tratamientos o niveles de un simple factor con los siguientes parámetros:

- ◆ Factor: Proceso de manufactura
- ◆ Niveles: Corte laser, corte plasma y convencional
- ◆ $n = 6$, $N = 18$

El análisis de la varianza fue evaluado como un experimento de un factor con tres niveles, el análisis de la varianza unifactorial fue aplicado para probar el efecto en la resistencia a la tracción, el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área. En la Tabla 6-1, se presenta los resultados de la resistencia a la tracción, % de elongación y % de reducción de área.

Tabla 6-1

Resultados del ensayo aleatorio

#	id	Factor	UTS [MPa]	% Elongación	% Reducción de Área
1	PL2	Fab A	500	24	36
2	L1	Fab B	466	28	36

3	CV1	Fab C	455	34	63
4	PL4	Fab A	485	27	37
5	L6	Fab B	472	29	36
6	PL3	Fab A	491	20	36
7	L2	Fab B	463	27	38
8	PL5	Fab A	496	29	39
9	PL6	Fab A	489	28	36
10	L4	Fab B	472	27	34
11	CV3/14	Fab C	459	29	62
12	L5	Fab B	474	27	36
13	CV2	Fab C	456	38	62
14	L3	Fab B	463	27	36
15	CV5/14	Fab C	461	29	61
16	CV7/14	Fab C	460	29	62
17	PL1	Fab A	490	28	35
18	CV14/14	Fab C	460	27	62

Nota: PL→ Plasma, L→ Laser y CV→ Convencional. Fab A→ Plasma, Fab B→ Laser y Fab C→ convencional.

El análisis de la varianza se realiza por separado para cada resultado utilizando el software Minitab. Se ingresan los datos de respuesta en una columna para todos los niveles. El factor es el proceso de fabricación de la probeta y se asigna una letra para cada nivel: Plasma → A, Laser → B y Convencional →C. Para los tres casos la información del factor es la siguiente:

- Factor : Fab

- Niveles : 3
- Valores : Fab A, Fab B, Fab C

6.1 Diseño del Experimento - DOE

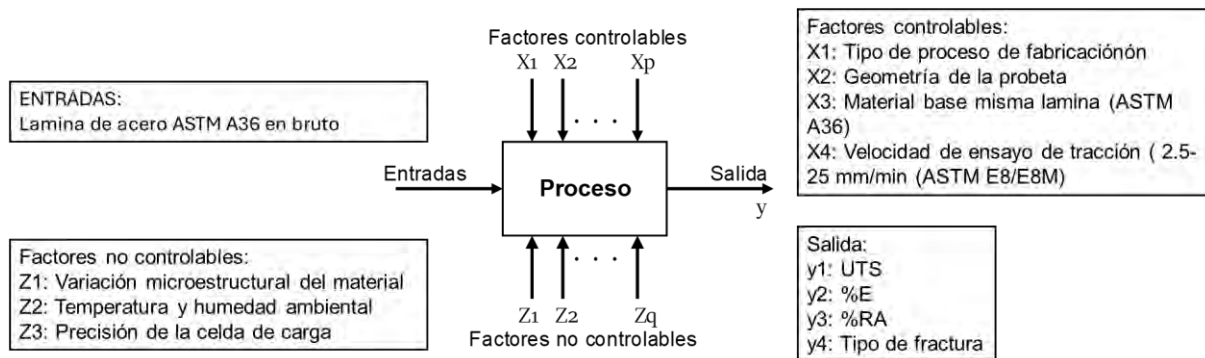
El diseño del experimento requiere anticipadamente tener una idea clara de lo que exactamente se va a estudiar siguiendo el procedimiento de siete pasos (Montgomery, 2012).

6.1.1 Reconocimiento y declaración del problema:

Determinar si el proceso de fabricación de la probeta genera diferencias significativas en la resistencia a la tracción UTS, porcentaje de elongación y porcentaje de reducción de área luego de realizar el ensayo de tracción en el módulo educativo de ensayo de tracción.

Figura 6-1

Modelo general de un proceso



Nota: Salida → variable de respuesta.

6.1.2 Selección de la variable de la respuesta:

La variable de respuesta se representa con y: UTS, %E y %RA.

6.1.3 Elección de factores, niveles y rangos:

- Factor: Proceso de fabricación de la probeta.
- Niveles: 3
 - Corte plasma

- Corte laser
- Convencional
- Rangos:
 - Mismo material: ASTM A36
 - Mismo espesor: $t = 1.8 \text{ mm}$
 - Misma geometría: Probeta tipo lamina *pin-loaded*
 - Misma velocidad

6.1.4 Elección del diseño experimental:

- Diseño completamente aleatorio – CRD (*complete random design*).
- Método de prueba de hipótesis: Anova unifactorial
- Tamaño de muestra (replicas): $n = 6$
- Orden de las corridas: Debe ser estrictamente aleatorio para evitar sesgos.
- Restricción
- Verificar la potencia estadística.

6.1.5 Realización el experimento:

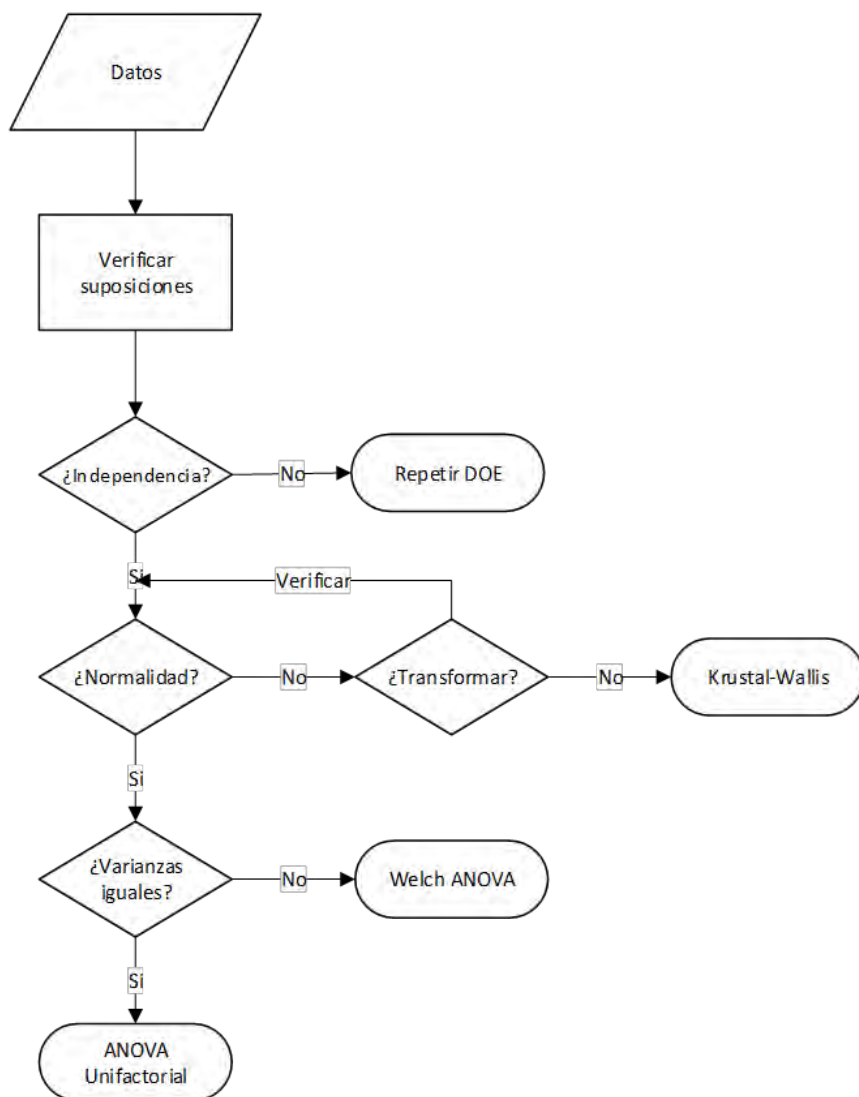
Fabricación: Se tienen 18 probetas (convencional = 6, laser = 6 y plasma = 6) y enumerar del 1 al 18 en orden aleatorio. **Aleatorización:** En minitab utilizar la herramienta de aleatorización y ejecutar el ensayo en ese orden. **Replicación:** Realizar el ensayo de las 18 probetas y obtener los resultados.

6.1.6 Análisis estadístico de los datos:

Se realiza la prueba de hipótesis siguiendo los pasos del diagrama de bloques (Figura 6-2). La prueba de hipótesis se realiza con la asistencia del software Minitab y SPSS. La prueba de hipótesis se realiza por separado para cada variable de respuesta.

Figura 6-2

Diagrama de bloques del método estadístico



Nota: Secuencia de pasos para seleccionar el método estadístico de prueba de hipótesis.

6.1.6.1 Resistencia a la tracción

En la Tabla 6-2, se presenta los valores de la resistencia a la tracción ordenados aleatoriamente por cada nivel de factor.

Tabla 6-2

Resistencia a la tracción para los niveles A, B, C

Factor	Resistencia a la Tracción (UTS)					
Fab A	500	485	491	496	489	490
Fab B	466	472	463	472	474	463
Fab C	455	459	456	461	460	460

Nota: Unidades en [MPa].

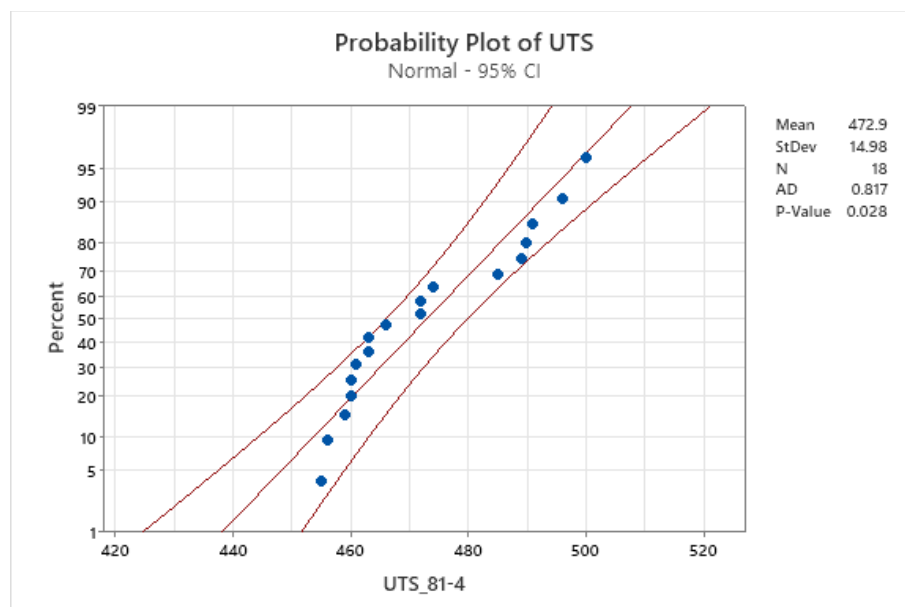
Verificación de los supuestos para ANOVA unifactorial:

- ◆ **Independencia:** De la Figura 6-8, se confirma la condición de independencia.
- ◆ **Normalidad:**

El gráfico de la Figura 6-3, se observa la distribución de los datos representados en puntos, gráficamente los puntos se deben encontrar agrupados cerca de la línea recta o dentro de la región entre las dos líneas curvas, sin embargo, se observan algunos datos lejos de la línea roja e incluso uno fuera de la región entre las dos líneas. El valor de p (0.028) indica de forma menos subjetiva que los datos no son normales.

Figura 6-3

Verificación de normalidad UTS



Nota: Dado que $p < 0.05$ se determina que no cumple con la condición de normalidad.

Se aplica la transformación de Johnson para los datos de la resistencia a la tracción. En la Figura 6-4, se observa la gráfica de los datos transformados pasando de un valor de p (0.028) a un p (0.761), este valor de p mayor a 0.05 asegura que los datos transformados presentan una distribución normal lo cual se puede ver gráficamente en la gráfica con los puntos ubicados sobre la línea recta.

Figura 6-4

Transformación de datos de UTS



Nota: $p > 0.05$, indica que los datos transformados presentan una distribución normal.

◆ **Varianzas iguales:**

Se aplica el método de Levene para determinar la condición de varianzas iguales. Con el valor de $P = 0.772$, se determina que las varianzas no presentan diferencias significativas y en consecuencia se cumple con la condición.

Análisis de la varianza unifactorial – ANOVA One-Way

- ◆ **Prueba de hipótesis:** efecto de la preparación de la probeta en la resistencia a la tracción.

- Hipótesis nula : Todas las medias son iguales
- Hipótesis alternativa : No todas las medias son iguales
- Nivel de significancia : $\alpha = 0.05$

La Tabla 6-3 presenta los resultados obtenidos del método estadístico ANOVA. Se observa que el valor $p = 0.000008$ es menor que 0.05, por lo cual se rechaza la hipótesis nula H_0 y se acepta la hipótesis alternativa H_a , en consecuencia, se infiere que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los niveles del factor a un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 6-3

Análisis de la varianza de la resistencia a la tracción (UTS)

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Fab	2	11.354	79.07%	11.354	5.6770	28.34	0.000008
Error	15	3.005	20.93%	3.005	0.2003		
Total	17	14.359	100.00%				

Nota: GL → grados de libertad, SC Sec → suma de cuadrados secuenciales, SC Ajust. → suma de cuadrados ajustado, MC Adjust. → media de los cuadrados ajustado.

La Tabla 6-4, indica que el modelo predice en un 69.86% nuevas observaciones.

Tabla 6-4

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.447599	79.07%	76.28%	4.32746	69.86%

Nota: S → desviación estándar de los residuos, PRESS → suma de cuadrados de predicción.

La Tabla 6-5, presenta las medias y desviación estándar para cada nivel del factor.

Tabla 6-5

Medias y desviación estándar por niveles del factor

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Fab A	6	0.958	0.516	(0.569, 1.348)
Fab B	6	-0.1749	0.2308	(-0.5643, 0.2146)
Fab C	6	-0.978	0.531	(-1.367, -0.588)

Nota: Desviación. estándar. agrupada StDev = 0.447599. IC → intervalo de confianza.

● Comparaciones por pares - Método de Tukey

El método de Tukey permite determinar si existe diferencias significativas entre grupos, en la Tabla 6-6, se observa que entre los tres grupos no comparten una letra y por lo tanto se determina que entre los 3 grupos existen diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 6-6

Agrupación de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
Fab A	6	0.958	A
Fab B	6	-0.1749	B
Fab C	6	-0.978	C

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

El valor p ajustado de las pruebas simultaneas entre pares (ver Tabla 6-7), muestran que todos son menores de 0.05 y por tanto estadísticamente diferentes entre si.

Tabla 6-7

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

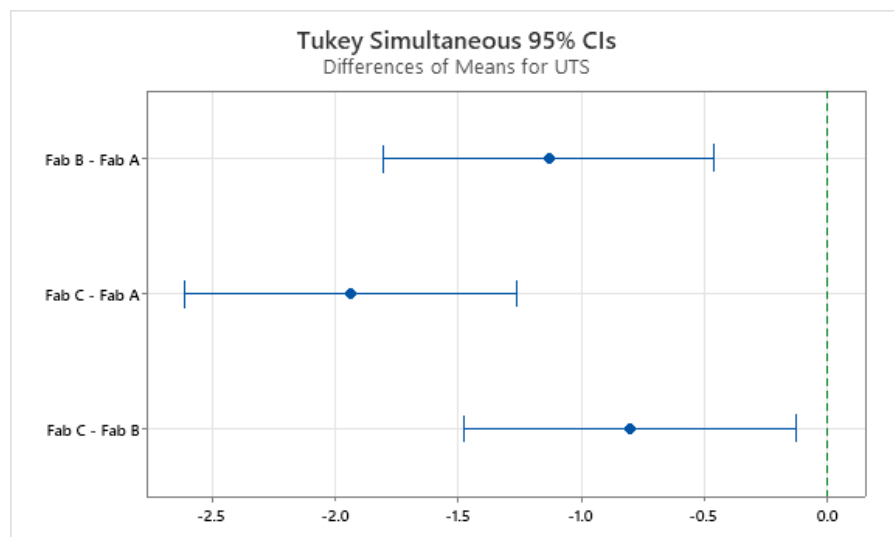
Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Fab B - Fab A	-1.133	0.258	(-1.804, -0.463)	-4.39	0.001
Fab C - Fab A	-1.936	0.258	(-2.607, -1.265)	-7.49	0.00002
Fab C - Fab B	-0.803	0.258	(-1.473, -0.132)	-3.11	0.019

Nota: Nivel de confianza individual = 97.97%. EE → error estándar.

Los intervalos de confianza de la Tabla 6-7 se presentan gráficamente en la Figura 6-5, se observa que ningún intervalo incluye cero, entonces se concluye que las medias correspondientes a cada comparación son significativamente diferentes.

Figura 6-5

Intervalos simultáneos de Tukey

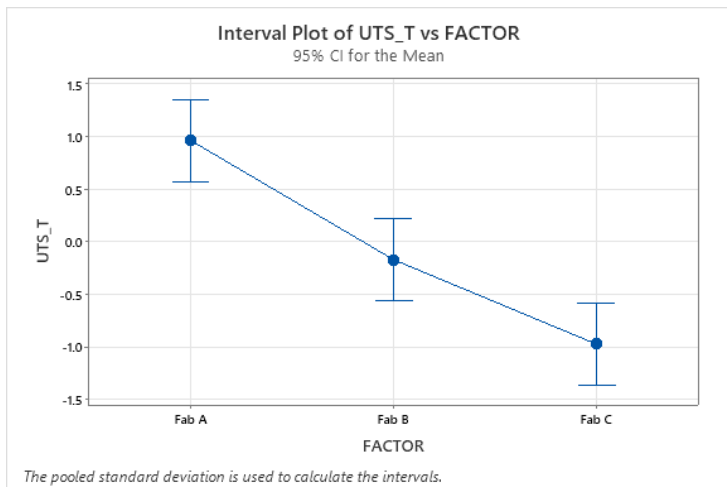


Nota: Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

La grafica en la Figura 6-6, permite identificar visualmente las diferencias entre los niveles, con una clara tendencia de un valor superior de la media en la resistencia a la tracción para las probetas fabricadas por corte plasma.

Figura 6-6

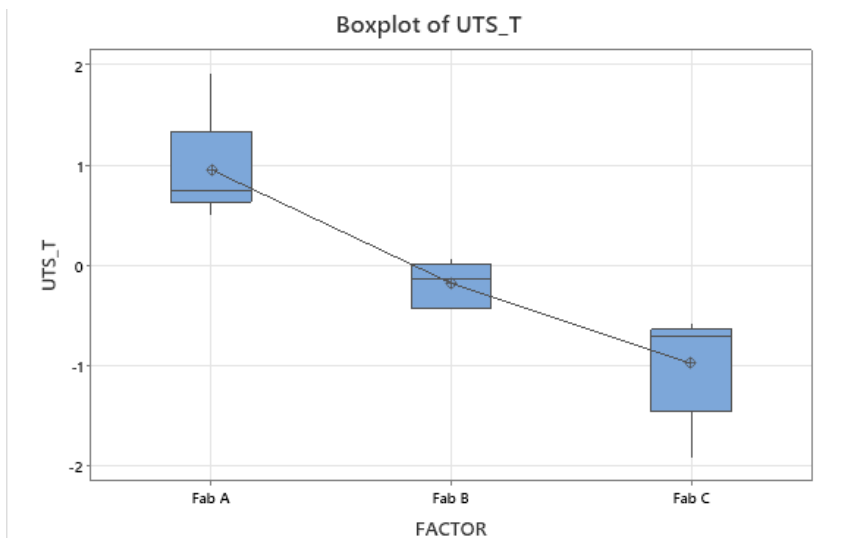
Gráfico de intervalos



El grafico de la Figura 6-7, muestra la tendencia de las medias en el orden $A > B > C$.

Figura 6-7

Gráfico de cajas "bigotes"

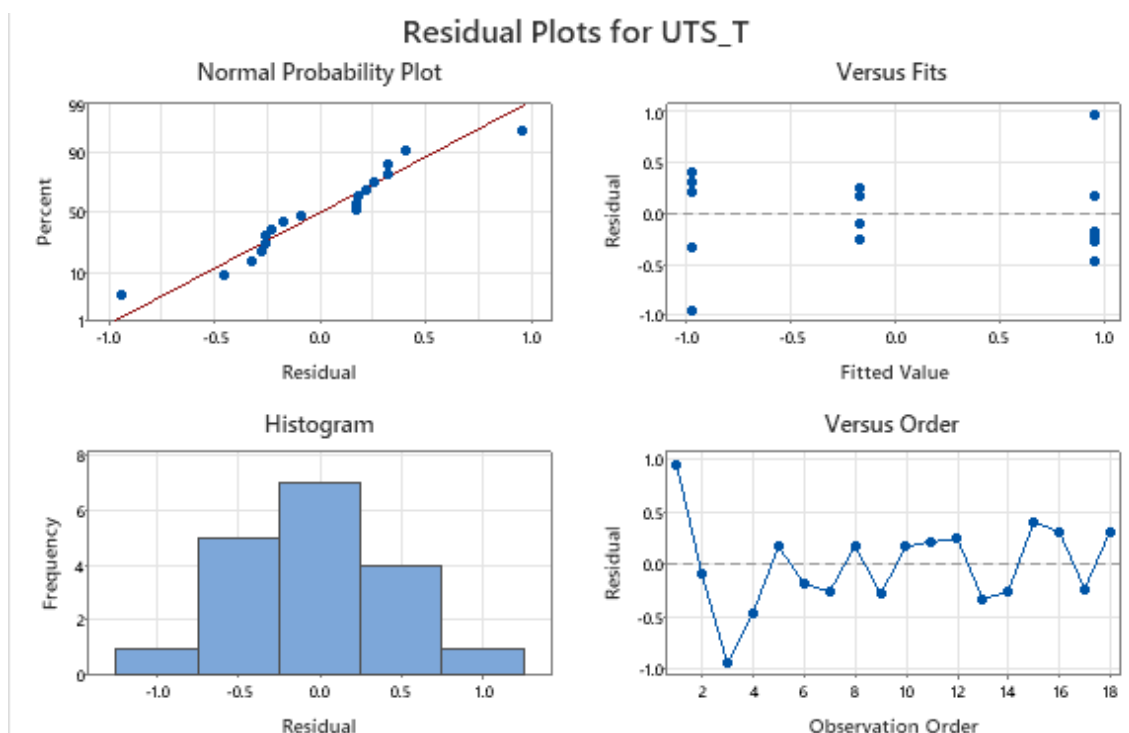


Nota: Grafico de cajas de los datos transformados.

Las gráficas presentadas en la Figura 6-8, permite comprobar de forma visual las tres condiciones asumidas para el análisis de la varianza. La primera grafica a la izquierda superior muestra la normalidad, la gráfica a la derecha superior muestra la varianza constante y la gráfica inferior central muestra la condición de independencia.

Figura 6-8

Grafica de residuos para la resistencia a la tracción



Nota: Graficas de las tres condiciones para el análisis de la varianza.

6.1.6.2 % Elongación

Tabla 6-8

% Elongación para los niveles A, B, C

Fab	% Elongación					
Fab A	24	27	20	29	28	28
Fab B	28	29	27	27	27	27

Fab C	34	29	38	29	29	27
-------	----	----	----	----	----	----

Nota: Valores en porcentaje.

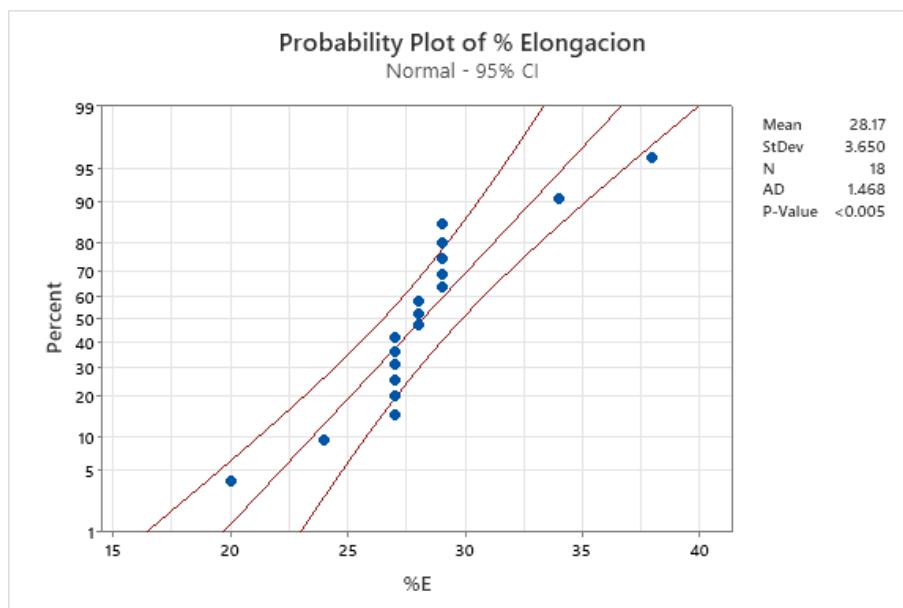
Verificación de los supuestos para ANOVA unifactorial:

- ◆ **Independencia:** De la Figura 6-14, se confirma la condición de independencia.
- ◆ **Normalidad:**

Del gráfico de la Figura 6-9, se observan un par de puntos fuera del área de las líneas curvas, por otro lado, los puntos no se encuentran agrupados cerca de la línea recta. Con el valor de $p < 0.005$ se confirma que la distribución de los datos no es normal.

Figura 6-9

Verificación de normalidad para el % de elongación

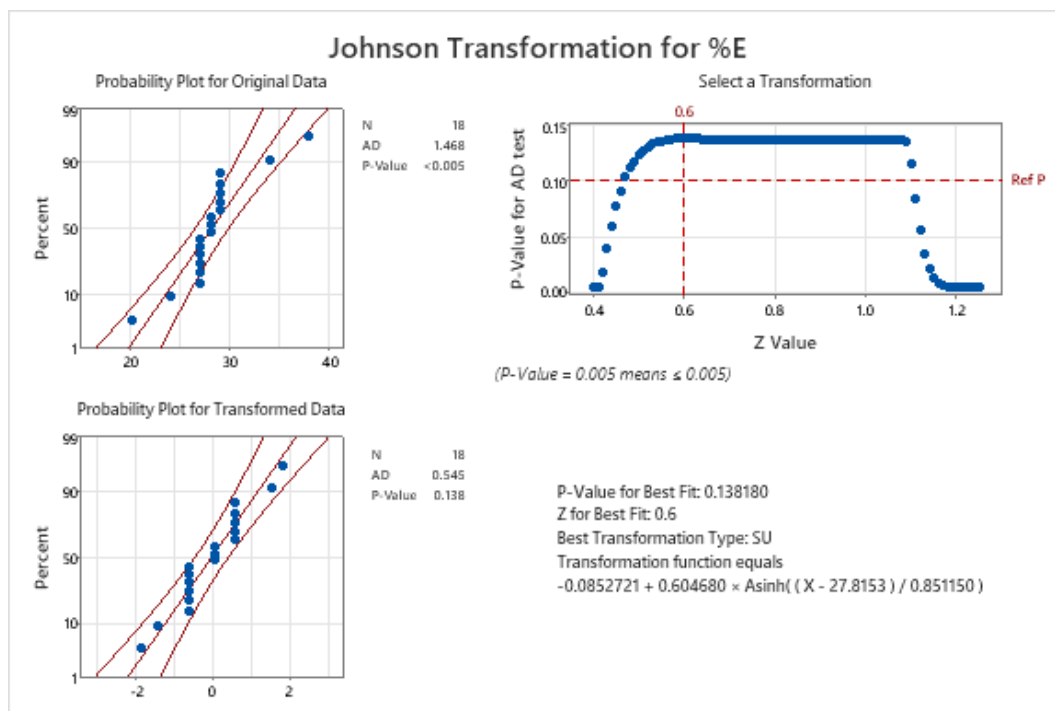


Nota: Dado que $p < 0.05$ se determina que no cumple con la condición de normalidad.

Dado que la distribución no es normal se procede a aplicar la transformación de Johnson para cumplir con la condición de normalidad para el método ANOVA. La Figura 6-10, presenta la distribución de los datos transformados con $p(0.138)$.

Figura 6-10

Transformación de datos del % de elongación



- ◆ **Varianzas iguales:** El valor de $p = 0.392$ calculado por Levene indica que las varianzas son estadísticamente iguales por tanto se cumple la condición.

Análisis de la varianza unifactorial – ANOVA One-Way

Prueba de hipótesis

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales
- Hipótesis alternativa: No todas las medias son iguales
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

Tabla 6-9

Análisis de la varianza del % de elongación

Fuente	GL	SC Sec.	Contribución	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	5.671	37.52%	5.671	2.8353	4.50	0.029

Error	15	9.442	62.48%	9.442	0.6295
Total	17	15.112	100.00%		

Nota: GL → grados de libertad, SC Sec → suma de cuadrados secuenciales, SC Ajust. → suma de cuadrados ajustado, MC Adjust. → media de los cuadrados ajustado.

La Tabla 6-10, presenta el resumen del modelo con un R cuadrado de predicción igual a 10.03 %, si bien este valor indica que la predicción del modelo no es alta, podría cambiar si se incrementan las réplicas del experimento.

Tabla 6-10

Resumen del modelo

S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.793380	37.52%	29.19%	13.5961	10.03%

Nota: R cuadrado de predicción igual a 10.03%.

En la Tabla 6-11, se observan los valores de la media y desviación estándar de los datos transformados por cada nivel de factor.

Tabla 6-11

Medias y desviación estándar por niveles del factor

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
A	6	-0.529	0.945	(-1.220, 0.161)
B	6	-0.293	0.508	(-0.983, 0.398)
C	6	0.762	0.859	(0.072, 1.452)

Nota: Desviación estándar. agrupada = 0.793380

● Comparaciones por pares - Método de Tukey

Aplicando el método de comparación por pares de Tukey, en la columna “Agrupación” de

la Tabla 6-12, se observa que los niveles de factor C y A no comparten ninguna letra, lo cual indica que existe una diferencia significativa.

Tabla 6-12

Agrupación de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación	
C	6	0.762	A	
B	6	-0.293	A	B
A	6	-0.529	B	

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Otra forma de determinar diferencias entre pares es analizando el valor p ajustado, en la Tabla 6-13, se observa que para los pares B – A y C – B, el valor de p es mayor a 0.05, en consecuencia, se infiere que no existen diferencias significativas.

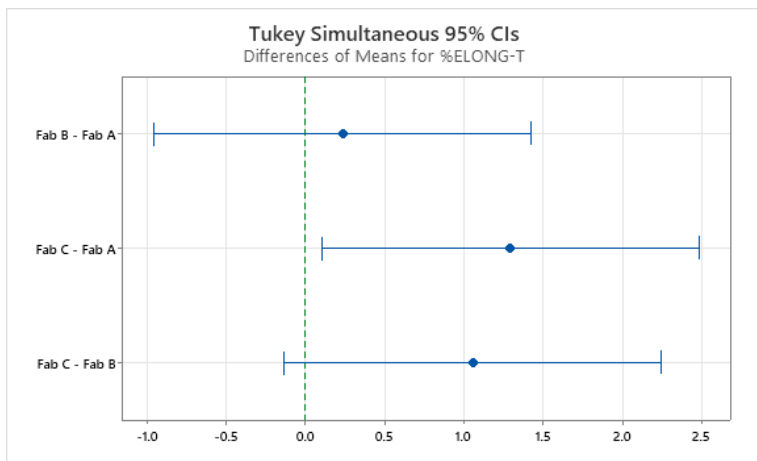
Tabla 6-13

Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
B – A	0.237	0.458	(-0.952, 1.426)	0.52	0.864
C – A	1.291	0.458	(0.103, 2.480)	2.82	0.033
C – B	1.054	0.458	(-0.134, 2.243)	2.30	0.086

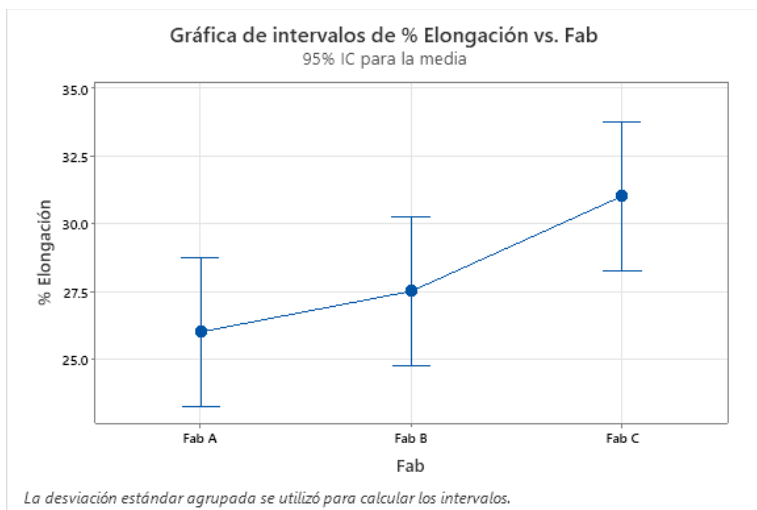
Nota: Nivel de confianza individual = 97.97%

Del gráfico de los intervalos simultáneos de Tukey en Figura 6-11, se observa que para los niveles C – A, el intervalo correspondiente no contiene cero y se confirma gráficamente la que los niveles son estadísticamente diferentes.

Figura 6-11*Intervalos simultáneos de Tukey*

Nota: Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

El gráfico en la Figura 6-12, indica la tendencia de las diferencias para las medias.

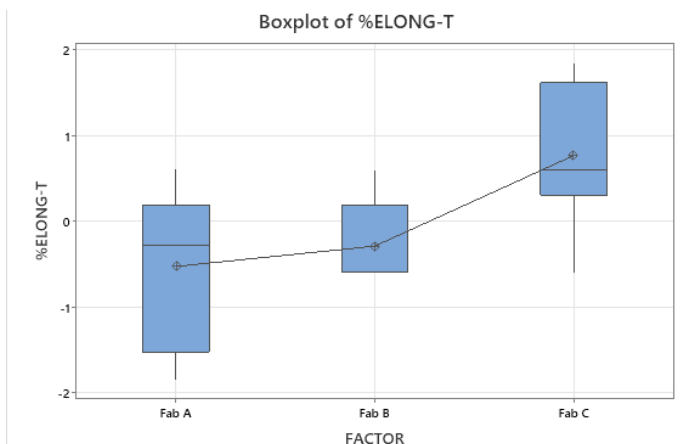
Figura 6-12*Gráfico de intervalos*

Nota: Comparación de medias.

Del mismo modo que el gráfico de intervalos, el gráfico de cajas en la Figura 6-13, muestra la tendencia en los niveles.

Figura 6-13

Gráfico de cajas "bigotes"

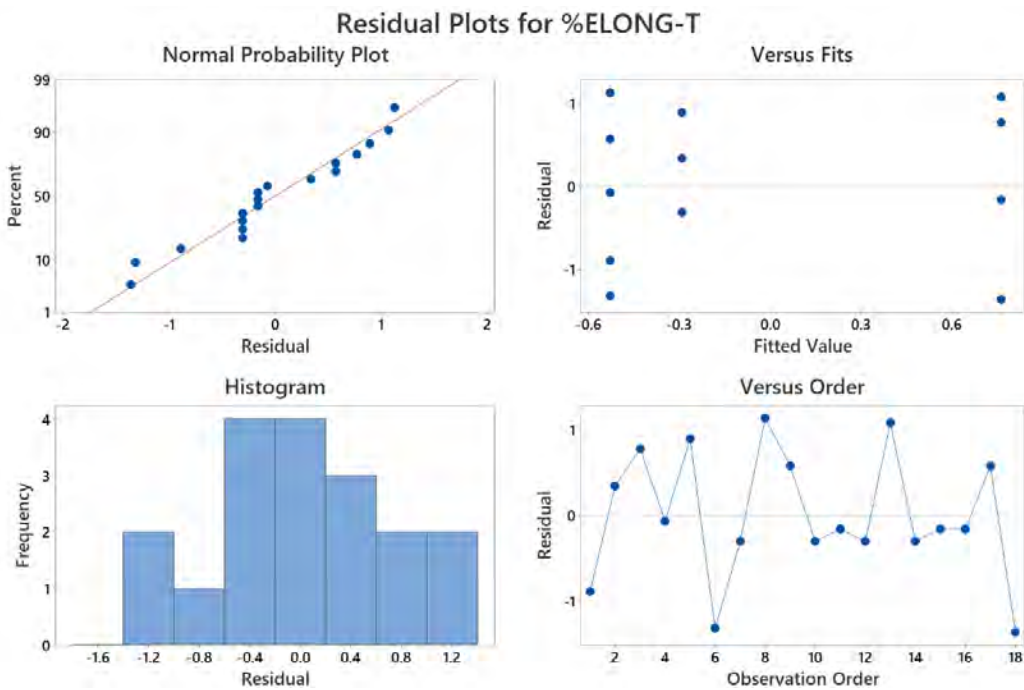


Nota: No se observan valores atípicos en los datos.

Los gráficos en la Figura 6-14, son útiles para analizar los supuestos del método ANOVA: normalidad, varianzas iguales y la aleatoriedad de los datos.

Figura 6-14

Gráfica de residuos para el % de elongación



Nota: Gráficos de confirmación de los supuestos de ANOVA.

6.1.6.3 % Reducción de Área

Tabla 6-14

% Reducción de Área para los niveles A, B, C

Fab	% Reducción de Área					
Fab A	36	37	36	39	36	35
Fab B	36	36	38	34	36	36
Fab C	63	62	62	61	62	62

Nota: Valores en porcentaje.

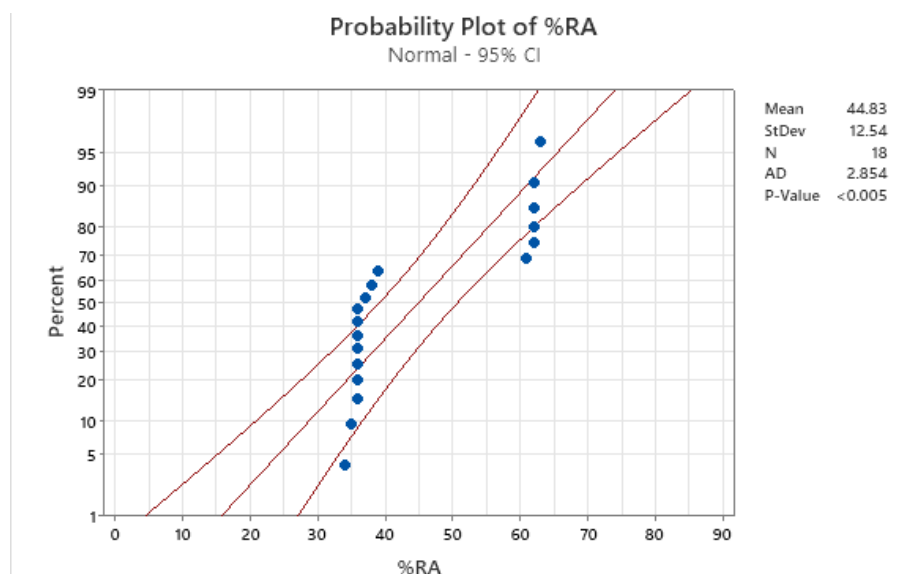
Verificación de los supuestos para ANOVA unifactorial:

- **Independencia:** Dada la aleatoriedad de los datos se cumple con la condición.
- **Normalidad:**

En la Figura 6-15, se observa que los datos no presentan una distribución normal.

Figura 6-15

Verificación de normalidad para el % de reducción de área



Nota: $p < 0.005$ indica que los datos no son normales.

Se aplica la transformación de Johnson, sin embargo, los datos no pueden ser transformados. Aplicando Box-Cox el valor de lambda igual a [-3] esta fuera de los valores típicos, dando como resultado una transformación forzada. De la Figura 6-2, se elige el método de Krustal-Wallis como alternativa a ANOVA.

Tabla 6-15

Estadística descriptiva del % de reducción de área

Factor	N	Mediana	Rango de Media	Valor Z
Fab A	6	36	7.0	-1.40
Fab B	6	36	6.0	-1.97
Fab C	6	62	15.5	3.37
General	18		9.5	

Nota: Valores obtenidos de Minitab.

Krustal-Wallis

Tabla 6-16

Prueba de Kruskal-Wallis para el % de reducción de área

Método	GL	Valor H	Valor p
No ajustado ^a	2	11.47	0.003
Ajustado ^a	2	12.31	0.002

Nota: a → empates.

Prueba de hipótesis

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales
- Hipótesis alternativa: No todas las medias son iguales
- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$

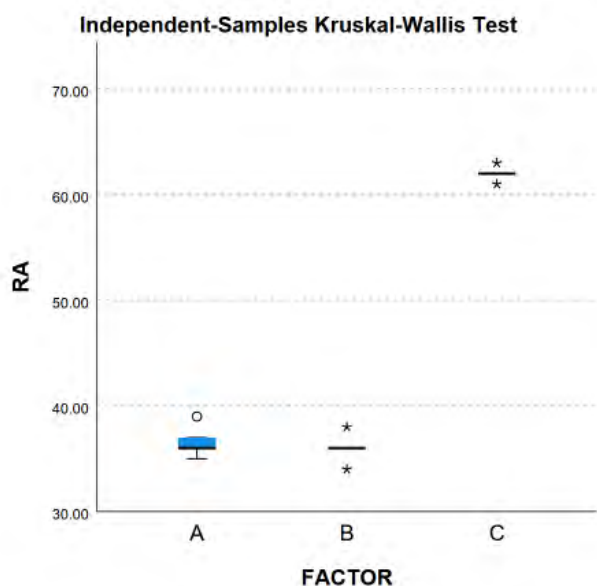
Con el valor de p (0.002) menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula.

Aplicando la prueba Kruskal-Wallis para muestras independientes en el software SPSS, se obtiene el mismo valor de p (0.002) obtenido en minitab, junto con las comparaciones por pares para determinar las diferencias entre los grupos A, B y C.

En la Figura 6-16, se observan datos atípicos representados con $^{\circ}$ y $*$, estos puntos resultan de una reducida dispersión de los datos en cada nivel de factor, los cual se analiza con los datos presentados en la Tabla 6-14.

Figura 6-16

Grafica de las medianas



Nota: [$^{\circ}$, $*$] $\rightarrow$ Valores atípicos.

◆ Comparación por pares – Ajuste de Bonferroni

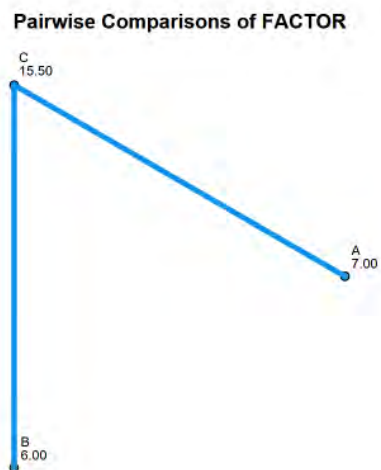
La comparación por pares (Tabla 6-17) determina una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos B – C y A – C, por otro lado, los grupos B -A son estadísticamente iguales.

Tabla 6-17*Comparación por pares*

Comparación	Test Statistic	Error Estándar	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
B – A	1.00	2.975	0.336	0.737	1.000
B – C	-9.50	2.975	-3.193	0.001	0.004
A – C	-8.50	2.975	-2.857	0.004	0.013

Nota: Significancias asintóticas (pruebas de dos colas). a → valores de significancia ajustados mediante la corrección de Bonferroni para múltiples pruebas.

Del reporte obtenido con el software SPSS se presenta la Figura 6-17, que permite analizar de forma gráfica la comparación por pares. Se observa que los nodos A y B no presentan una diferencia estadísticamente significativa.

Figura 6-17*Comparación por pares del % de reducción de área*

Nota: Los nodos muestran el rango promedio de cada nivel.

6.1.7 *Discusión (Conclusiones y recomendaciones)*

Discusión

- **UTS (resistencia ultima a la tracción):**

El análisis de la varianza unifactorial demostró que existen diferencias significativas en la resistencia a la tracción (UTS) entre los tres grupos ($p < 0,001$), con un ajuste del modelo ($R^2 = 76.28 \%$). El grupo A presentó la mayor resistencia, seguido del grupo B y del grupo C. Las pruebas post hoc de Tukey confirmaron que todas las comparaciones por pares eran estadísticamente significativas. Estos resultados sugieren que la condición de la fabricación de la probeta del material representado por el grupo A proporciona una resistencia a la tracción superior, mientras que el grupo C presenta la más baja entre los tres grupos. La resistencia a la tracción del grupo A y B se vio incrementada por el efecto del calor en el corte aun presentando una superficie menos lisa que el grupo C.

- **% de elongación:**

El valor p (0.029) obtenido de ANOVA, indica que existe una diferencia estadísticamente significativa en el porcentaje de elongación, con un ajuste R^2 (37.52 %). Aplicando el método de Tukey para las comparaciones entre pares se demostró que solo existen diferencias significativas entre los grupos A y C, siendo mayor la ductilidad en C respecto de A. La ductilidad del grupo B fue estadísticamente similar a los grupos A y C. Esto sugiere que las condiciones del proceso de fabricación en los grupos A y B afectan la ductilidad considerablemente.

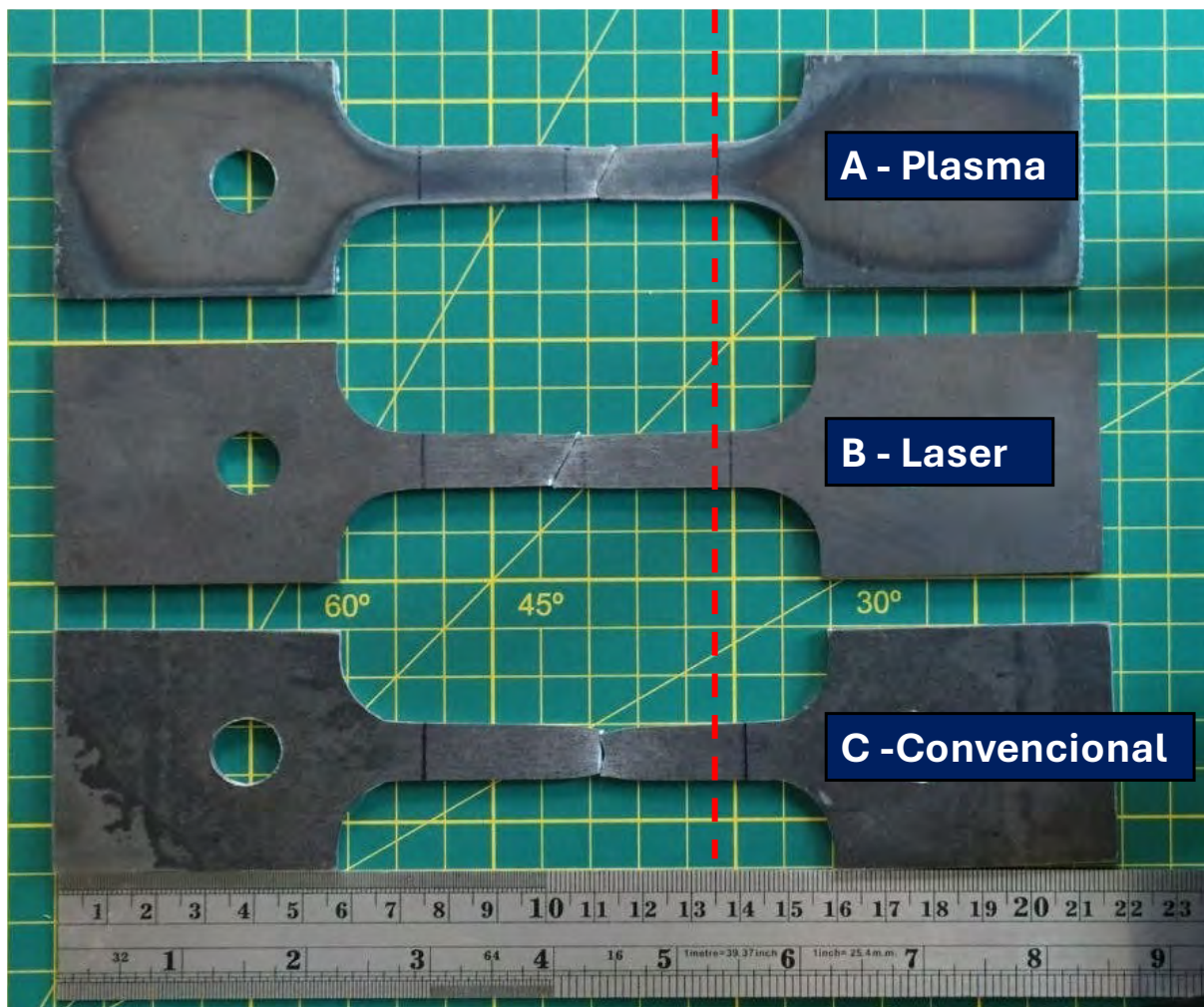
- **% de reducción de área:**

Se aplicó el método de Kruskal-Wallis para la prueba de hipótesis, obteniendo el valor de p (0.002), lo cual indica una diferencia significativa en la reducción de área de la sección transversal. De la comparación por pares aplicando el ajuste de Bonferroni se obtuvo que los

grupos A y B no presentan diferencias significativas. Observando los valores de las medianas se observa una gran diferencia del grupo C (62) frente a los grupos A (36) y B (36), esto indica que el proceso de fabricación de los grupos A y B reducen en gran medida el estrangulamiento e influyen en el tipo de fractura de la probeta. En los grupos A y B se presentó un tipo de fractura frágil en comparación de la fractura dúctil presentada por el grupo C (ver Figura 6-18).

Figura 6-18

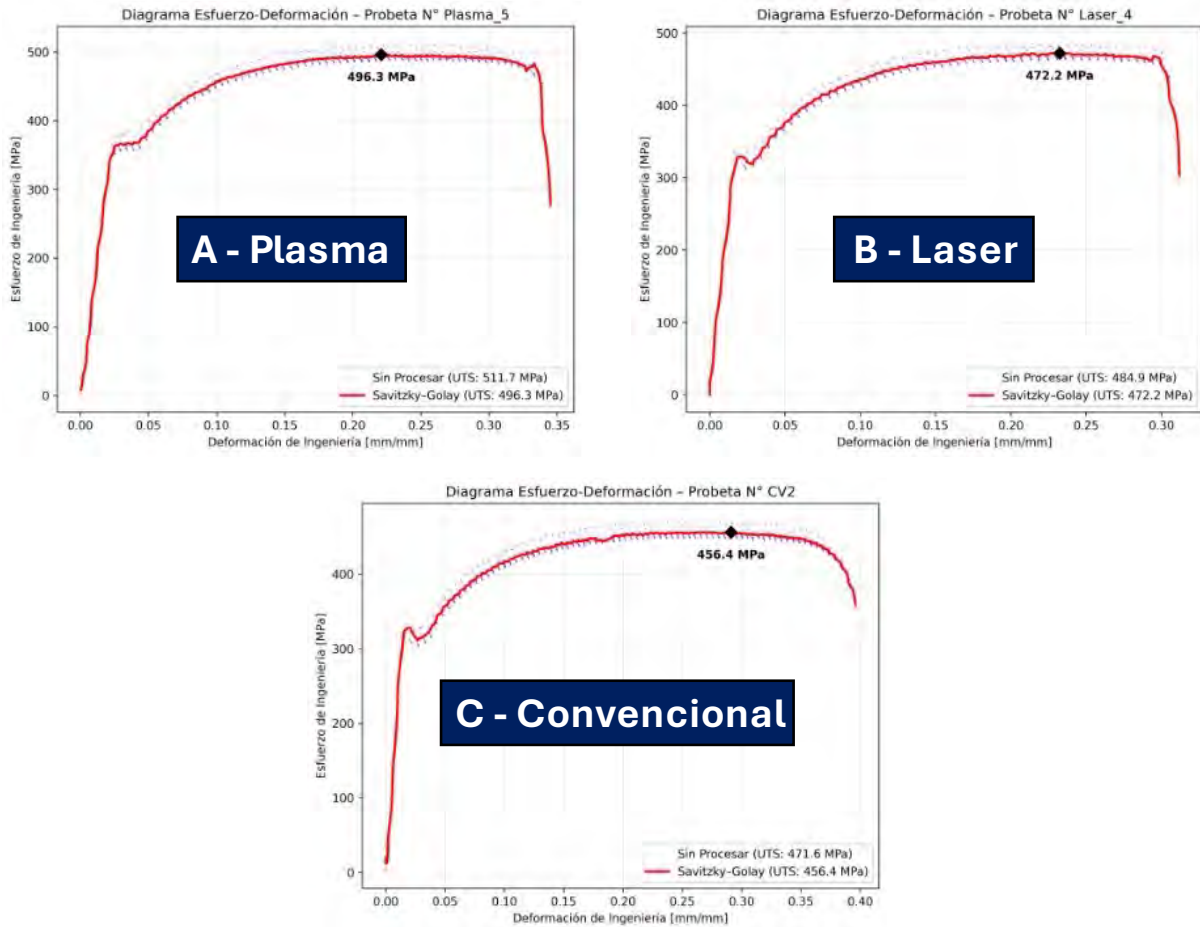
Detalle de la elongación y la fractura del grupo de probetas A, B y C



Nota: Las medias del % de elongación para el grupo de probetas A, B y C fueron: 26, 27.5 y 31 [%]; y para la reducción de área 36.5, 36 y 62 [%] respectivamente.

Figura 6-19

Comparación de los diagramas esfuerzo – deformación de las probetas obtenidas por corte plasma, plasma y convencional



Nota: Aplicación del filtro Savitzky-Golay representado con la línea en rojo. Las medias de la resistencia a la tracción UTS para el grupo de probetas A, B y C fueron: 491.8, 468.3 y 458.5[MPa] respectivamente.

Conclusiones

- La síntesis de la literatura identificó a la geometría y la fabricación de la probeta como los parámetros determinantes en el comportamiento mecánico a la tracción. De igual modo, se realizó el benchmarking para identificar brechas y limitaciones tecnológicas en los equipos de ensayo existentes respecto al costo, complejidad de adquisición y capacidades de monitoreo en tiempo real mediante software de código abierto.
- La aplicación de la directriz VDI 2221/19 en la ingeniería de diseño permitió obtener la documentación técnica de manera lógica y estructurada. El cálculo de los componentes se realizó aplicando el enfoque de rigidez lo que asegura que las deflexiones producidas al aplicar la carga de 20000 newtons no afecten significativamente la elongación durante el ensayo de tracción.
- El uso de componentes estándar y procesos de mecanizado convencional permitió obtener un costo de fabricación y ensamblaje de \$2,231.62 USD, de acuerdo con la valoración realizada en la lista de materiales (BOM). Adicionalmente, se logró implementar dos aplicaciones ejecutables con interfaz gráfica de usuario (GUI) basadas en Python para el procesamiento de datos post -ensayo y para el monitoreo y visualización de diagramas en tiempo real.
- El ensayo de tracción realizado de acuerdo con el estándar ASTM E8/E8M mostró con claridad el comportamiento mecánico del acero ASTM A36, en particular se observó la meseta 'Plateau' en la región alrededor de la resistencia máxima para probetas tipo lamina. Respecto a los resultados cuantitativos se obtuvo una media

($\bar{x}$) de 461.8 MPa ($s_r = 2.49\text{MPa}$) para la resistencia a la tracción, 29.29 % ($s_r = 3.73\%$) para el porcentaje de elongación y 62% ($s_r = 1.07\%$) para la reducción de área. Los valores de las medias concuerdan con el estándar ASTM A36 y la literatura de referencia, los valores mínimos de desviación estándar validan la repetibilidad de las mediciones obtenidas y la eficacia del módulo educativo de ensayo de tracción para mostrar los diagramas esfuerzo – deformación.

- Se demostró diferencias estadísticamente significativas en las tres propiedades con ($\alpha = 0.05$), se aplicó el método ANOVA unifactorial en la resistencia a la tracción y el % de elongación, en el % de reducción de área se aplicó el método de Kruskal-Wallis. En cuanto a la resistencia a la tracción (UTS), se observaron diferencias muy significativas entre los grupos ($p < 0.001$), siendo A el que presentó la media más alta (492 MPa), seguido de B (468 MPa) y C (459 MPa); todas las comparaciones por pares resultaron significativas según la prueba de Tukey. En el % de elongación, se encontró una diferencia significativa ($p = 0.029$), el grupo C (31 %) presentó una elongación mayor que A (26 %), mientras que B (27.5 %) se situó en un nivel intermedio y no mostró diferencias estadísticamente significativas con respecto a los otros grupos. Respecto a la reducción de área, se observaron diferencias significativas ($p = 0.002$), siendo C (62%) significativamente mayor tanto de A (36.5 %) como de B (36 %), que fueron estadísticamente similares. Estos resultados confirman los efectos del proceso de fabricación en el comportamiento mecánico.

Recomendaciones

- Diseñar un sistema de accionamiento mecánico o hidráulico, considerando la implementación de un sistema automatizado (retroalimentado) integrado al software de adquisición de datos.
- Continuar con el desarrollo del software para obtener el diagrama esfuerzo - deformación en tiempo real, así como del hardware del sistema de adquisición de datos e investigar el ruido de las señales y la implementación de filtros analógicos y/o filtros digitales adaptativos.
- Evaluar la repetibilidad y reproducibilidad del módulo educativo de ensayo de tracción mediante la comparación de sus resultados experimentales con un programa de ensayo interlaboratorio (6 laboratorios), de acuerdo con los estándares ASTM E8/E8M y ASTM E691.
- Investigar e implementar un sistema óptico – Digital Image Correlation (DIC) para obtener las mediciones de desplazamiento y deformación en la probeta integrado con el sensor de fuerza para analizar las propiedades de fluencia.

Referencias

- ABET. (2024). *Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2024 - 2025* - ABET. Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET). <https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/criteria-for-accrediting-engineering-programs-2024-2025/>
- Abichou, I., Soussi, H., Swissi, A., & Krichen, A. (2024). *Effects of Thickness Reduction on Tensile Behavior Using Proportional Specimens and Constant Aspect Ratio* (pp. 60-68). https://doi.org/10.1007/978-3-031-42659-9_7
- ASTM International. (2018). *ASTM A1011/A1011M-18 Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, Hot-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy, High-Strength Low-Alloy with Improved Formability, and Ultra-High Strength*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/A1011_A1011M-18
- ASTM International. (2019). *ASTM A36/A36M-19 Standard Specification for Carbon Structural Steel*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19
- ASTM International. (2022). *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-22
- ASTM International. (2024). *ASTM E8/E8M-24 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-24
- Baharuddin, & Yani I. (2018). Implementation of Design and Development Tensile Testing Machine for Application in Soft Material. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 5(12).

- Bender, B., & Gericke, K. (Eds.). (2021). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (9.^a ed.). Springer Vieweg Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7>
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly* (3.^a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420089288>
- Brockenbrough, R. L. (2003). MTR Survey of Plate Material Used in Structural Fabrication. *Engineering Journal*, 40(1), 42-49. <https://doi.org/10.62913/engj.v40i1.797>
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2021). *Shigley's Mechanical Engineering design SI units* (K. Tangchaichit, Ed.; 11th ed.). McGraw-Hill Education.
- Cross, N. (Ed.). (1984). *Developments in Design Methodology*. Wiley.
- Czichos, H., Saito, T., & Smith, L. (Eds.). (2011). *Springer Handbook of Metrology and Testing* (2.^a ed.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16641-9>
- Davis, J. R. (Ed.). (2004). *Tensile Testing*. ASM International.
- Dieter, G. E., & Schmidt, L. C. (2012). *Engineering Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Dowling, N. E., Kampe, S. L., & Kral, M. V. (2019). *Mechanical Behavior of Materials, Global Edition* (5th ed.). Pearson UK.
- Fábián, H., & Gergely, A. (2020). Design and Implementation of a Tensile Testing Machine. *Műszaki Tudományok Közlemények*, 13(1), 50-53. <https://doi.org/10.33894/mtk-2020.13.06>
- Felder, R. M., & Brent, R. (2016). *Teaching and Learning STEM: A Practical Guide* (1st ed.). JOSSEY-BASS a Wiley Brand.
- Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (Eds.). (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29569-0>

- Galilei, G. (1648). *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/c2013-0-13317-x>
- Galindo Suarez, J. S., & Montoya Alvarez, J. E. (2021). *Diseño y construcción del sistema mecánico de una máquina de tracción para materiales blandos*.
<http://hdl.handle.net/11634/42775>
- Gdoutos, E., & Konsta-Gdoutos, M. (2024). *Mechanical Testing of Materials* (1st ed., Vol. 275). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-45990-0>
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2016). *Mechanics of Materials* (9.^a ed.). Cengage Learning.
- González-Velázquez, J. L. (2019). *Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials* (Vol. 12). Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-29241-6>
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH. (2024). *Didactic concept: Learning pyramid*. G.U.N.T.
<https://gunt.de/en/didaktisches-konzept-en#companyJumper>
- GUNT Hamburg. (2024). *WP 300 Materials testing, 20kN*. G.U.N.T.
<https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/materials-testing/tensile-compression-bending-and-hardness-testing/materials-testing-20kn/020.30000/wp300/glct-1:pa-148:ca-34:pr-1540>
- Hall, A. S., Holowenko, A. R., & Laughlin, H. G. (1961). *Schaum's Outline of Theory and Problems of Machine Design*. McGraw-Hill.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Horath, L. (2019). *Fundamentals of Materials Science for Technologists: Properties, Testing, and Laboratory Exercises* (3rd ed.). Waveland Press.
- Hosford, W. F. (2010). *Mechanical Behavior of Materials*. Cambridge University Press.

- Huda, Z. (2022). *Mechanical Behavior of Materials*. Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-84927-6>
- Instron Industrial Machinery Manufacturing. (2024). *Universal Testing Systems | Instron*.
<https://www.instron.com/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems>
- Írsel, G., & Güzey, B. N. (2021). Comparison of laser beam, oxygen and plasma arc cutting methods in terms of their advantages and disadvantages in cutting structural steels. *Journal of Physics: Conference Series*, 2130(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2130/1/012022>
- Jiang, W. (Ed.). (2019). *Analysis and Design of Machine Elements*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119276081>
- Jose Mathew, S., & Francis, V. (2020). *Development, Validation and Implementation of Universal Testing Machine*. Jönköping University, JTH, Industrial Product Development, Production and Design.
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2020). *Fundamentals of Machine Component Design* (7th ed.). Wiley.
- Komvopoulos, K. (2016). *Mechanical Testing of Engineering Materials* (1.^a ed.). Cognella Academic Publishing.
- Krahmer, D. M., Polvorosa, R., López de Lacalle, L. N., Alonso-Pinillos, U., Abate, G., & Riu, F. (2016). Alternatives for Specimen Manufacturing in Tensile Testing of Steel Plates. *Experimental Techniques*, 40(6), 1555-1565. <https://doi.org/10.1007/s40799-016-0134-5>
- Li, L., Merickel, J. W., Tang, Y., Song, R., Rittenhouse, J. E., Vakanski, A., & Xu, F. (2025). Empirical validation of size effects in sub-sized tensile specimens for nuclear structural materials. *Scientific Reports*, 15(1), 13846. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98849-5>

- Liu, X. (2021). *Design and Implementation of Open Source Testing Equipment in Engineering Education and Research*. <https://tspace.library.utoronto.ca/handle/1807/109212>
- MATEST. (2024). *Educational testing machine*. <https://www.matest.com/en/product/h017-universal-educational-testing-machine-20-kn>
- Middleton, J. A. (2021). *Experimental Statistics and Data Analysis for Mechanical and Aerospace Engineers* (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003094227>
- Miraoui, I., Boujelbene, M., & Zaied, M. (2016). High-Power Laser Cutting of Steel Plates: Heat Affected Zone Analysis. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2016/1242565>
- Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (Eighth Edition). John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2018). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (Seventh edition). Wiley.
- Mott, R. L., Vavrek, E. M., & Wang, J. (2017). *Machine Elements in Mechanical Design* (Sixth). Pearson.
- Ortiz Gómez, L. G., & Rosas Basurco, C. P. (2021). *Diseño Y Construcción De Una Máquina Didáctica Para Realizar Ensayos De Tracción De Metales En El Laboratorio De Materiales EPIMMEM – UCSM*. Universidad Católica de Santa María.
- PA Hilton. (2024). *UNIVERSAL TESTING MACHINE* | PA Hilton. <https://www.p-a-hilton.co.uk/products/strength-materials-hsm/universal-testing-machine>
- PASCO. (2024). *Comprehensive Materials Testing System - ME-8244 - Products* | PASCO. <https://www.pasco.com/products/lab-apparatus/mechanics/materials-testing/me-8244>

- Peterjohann - Consulting. (2024). *Norm, Standard oder Richtlinie?* <https://www.peterjohann-consulting.de/norm-standard-oder-richtlinie/>
- Rex, C. O., & Easterling, W. S. (1996). Research Report - Behavior and Modeling of Mild and Reinforcing Steel. *Innovative Steel Research For Construction Program*.
- Rizal, M., Aulia, U., & Yudiansyah, R. (2023). Development of a Portable Universal Testing Machine for Investigating the Mechanical Properties of Medium-Strength Materials. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 12(1), 25-32. <https://doi.org/10.13170/aijst.12.1.31159>
- Sharpe, W. N. (Ed.). (2008). *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* (1.^a ed.). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>
- Skolaut, W. (Ed.). (2014). *Maschinenbau*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2554-6>
- Soriano Gonzáles, Y. (2021). *Desarrollo De Una Máquina De Tracción De Probetas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- TECQUIPMENT. (2024). *BENCH TOP TENSILE TESTING MACHINE* | TecQuipment. <https://www.tecquipment.com/bench-top-tensile-testing-machine>
- The MathWorks Inc. (2024). *sampsizepwr - Sample size and power of test - MATLAB*. <https://www.mathworks.com/help/stats/sampsizepwr.html#buoobs1-4>
- Timoshenko, S. (1953). *History of Strength of Materials: With a Brief Account of the History of Theory of Elasticity and Theory of Structures* (Vol. 1). McGraw-Hill.
- Tinius Olsen Testing Machine Company. (2022, junio 3). *Tinius Olsen Materials Testing Machine Company*. Tinius Olsen. <https://www.tiniusolsen.com/our-company/>

- Tóth, L., & Rossmanith, P. (1999). *A törésmechanika és az anyagvizsgálat története*. Miskolci Egyetem. <https://vmek.oszk.hu/01100/01191/01191.pdf>
- Ugural, A. C. (2022). *Mechanical Engineering Design* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003251378>
- Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Yang, M. C. (2020). *Product Design and Development* (Seventh Edition). McGraw-Hill Education.
- Vajna, S. (Ed.). (2020). *Integrated Design Engineering* (1.^a ed.). Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-19357-7>
- VDI. (1998). *VDI 2225 Blatt 3: Design engineering methodics - Engineering design at optimum cost - Valuation of costs*.
- VDI. (2024a). *VDI 2221 Blatt 1 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung* | VDI. Verein Deutscher Ingenieure - VDI. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2221-blatt-1-entwicklung-technischer-produkte-und-systeme-modell-der-produktentwicklung>
- VDI. (2024b). *VDI 2221 Blatt 2 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse* | VDI. Verein Deutscher Ingenieure VDI. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2221-blatt-2-entwicklung-technischer-produkte-und-systeme-gestaltung-individueller-produktentwicklungsprozesse>
- VDI. (2024c). *VDI-Richtlinien | Normen, Regeln, Standards* | VDI. Verein Deutscher Ingenieure - VDI. <https://www.vdi.de/richtlinien>

Anexos

Anexo A: Matriz de Consistencia

Tabla A-0-1

Matriz de Consistencia

“DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO”		
Problema General	Objetivo General	Hipótesis
¿Cómo describir el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción?	Describir experimentalmente el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una carga de tracción mediante el diseño y fabricación de un módulo educativo.	El módulo educativo de ensayo de tracción, desarrollado con componentes asequibles y software de código abierto, generará eficazmente curvas de esfuerzo-deformación para demostrar el comportamiento mecánico del acero ASTM A36 bajo una fuerza de tracción uniaxial, sirviendo como alternativa viable, práctica y económica a los equipos comerciales existentes.
Problema Específico	Objetivos Específicos	
a. ¿Cómo se puede documentar la información para identificar los avances y brechas en el diseño y fabricación de módulos educativos de ensayo de tracción?	a. Sintetizar la literatura relevante sobre el comportamiento mecánico de materiales bajo carga de tracción y el desarrollo de módulos educativos de ensayo de tracción, identificando brechas tecnológicas y mejores prácticas en el ensayo de tracción.	
b. ¿Cuál es el proceso de diseño en ingeniería mecánica que se utiliza como marco de referencia para desarrollar el módulo educativo y obtener la documentación técnica?	b. Aplicar el proceso de diseño en ingeniería mecánica siguiendo la directriz VDI 2221/2019 para obtener la documentación técnica del módulo educativo de ensayo de tracción.	
c. ¿Qué procedimientos se llevan a cabo para la fabricación y ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción?	c. Fabricar y ensamblar el módulo educativo de ensayo de tracción, asegurando el costo efectivo y la integración del sistema de adquisición de datos.	
d. ¿Cuál es el estándar para realizar el ensayo de tracción y el análisis de los resultados obtenidos?	d. Realizar el ensayo experimental de tracción del acero ASTM A36 de acuerdo al estándar ASTM E8/E8M y la estadística de precisión para validar los resultados y evaluar la precisión del módulo educativo.	
e. ¿En qué medida la preparación de la probeta afecta la resistencia a la tracción y las propiedades de ductilidad?	e. Evaluar el efecto de la preparación de la probeta en la resistencia a la tracción y las propiedades de ductilidad mediante el análisis de la varianza.	

Anexo B: Benchmarking

Tabla B-0-2

Módulos de tracción disponibles en el mercado y en proyecto (Benchmarking)

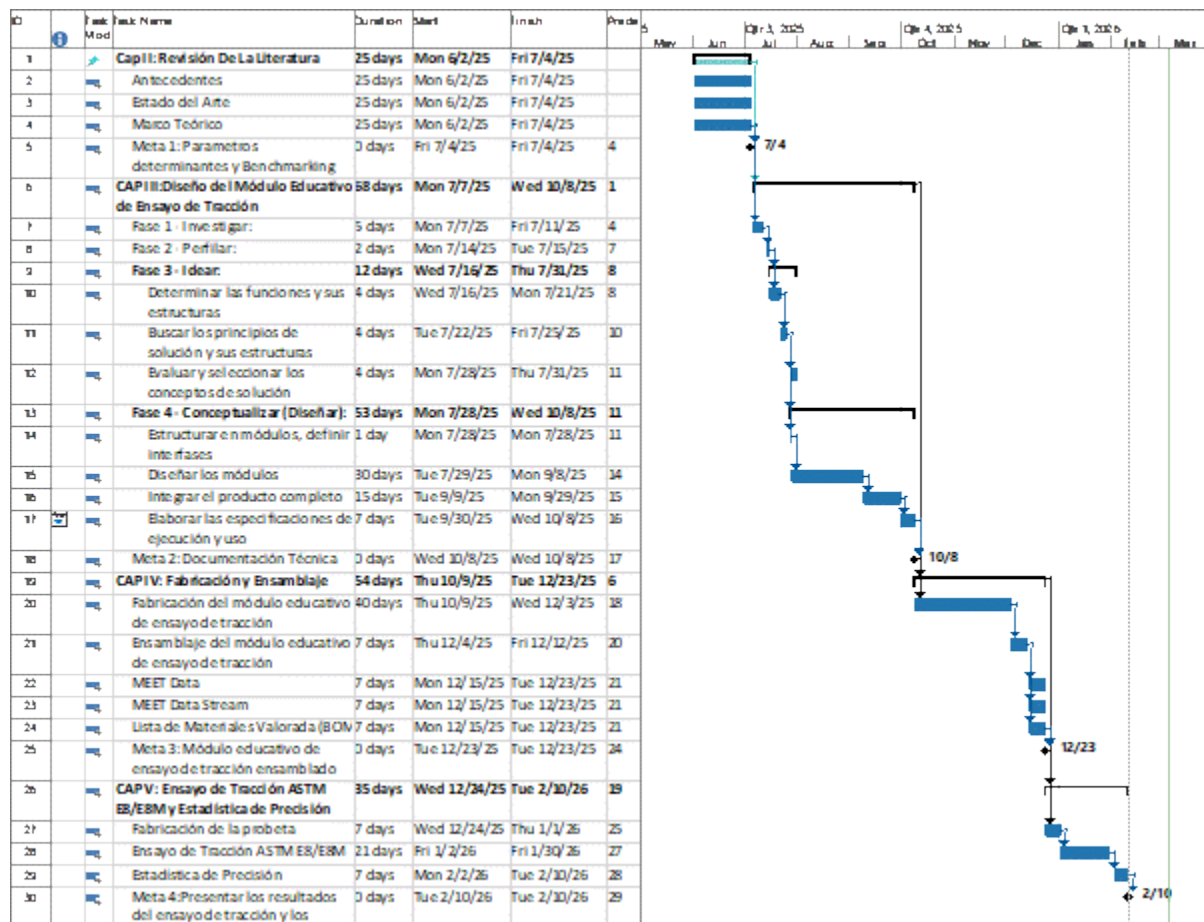
N°	Marca/Autor	Nombre del Producto/Proyecto	Tipo	Accionamiento	Grafica (σ - ϵ)	Cap. (kN)	Disp. H/V	Costo (USD)
1	Gunt Hamburgo	WP 300 Ensayo de Materiales	Comercial	Hidráulico manual (manivela)	Si	20	V	-
2	Pasco	(ME-8236) Sistema Integral de Ensayos de Pruebas (Solo tracción / Integral)	Comercial	Mecánico manual (manivela)	Si	7.1	V	4,000.00 7,000.00
3	Matest	(HO17) Máquina Universal Educativa De Ensayos	Comercial	Hidráulico manual (manivela)	Si	20	V	-
4	PA Hilton	(HSM58) Máquina Universal	Comercial	Hidráulico manual (palanca)	Si	35	V	31,000.00
5	Tecquipment	(SM1002) Máquina De Ensayo De Tracción De Sobremesa	Comercial	Mecánico manual (manivela)	Si	20	H	12,000.00
6	(Jose Mathew & Francis, 2020)	Desarrollo, Validación e Implementación de una Máquina de Ensayo Universal	Tesis de Maestría	Electromecánico	Si	10	V	No se indica
7	(Liu, 2021)	Diseño e Implementación de un Equipo de Ensayos de Código Abierto Para la Enseñanza y la Investigación en Ingeniería	Tesis de Maestría	Electromecánico	Si	1.5 y 0.5	V y H	525 y 202

8	(Ortiz Gómez & Rosas Basurco, 2021)	Diseño y Construcción de una Máquina Didáctica Para Realizar Ensayos de Tracción de Metales en el Laboratorio de Materiales EPIMMEM – UCSM	Tesis de Grado	Hidráulico (bomba hidráulica)	No	122	V	5,489.00
9	(Soriano Gonzáles, 2021)	Desarrollo de Una Máquina de Tracción de Probetas de PLA	Tesis de Grado	Electromecánico	Si	≈ 0.5	H	10,639.00
10	(Galindo Suarez & Montoya Alvarez, 2021)	Diseño y Construcción del Sistema Mecánico de Una Máquina de Tracción Para Materiales Blandos	Tesis de Grado	Electromecánico	No	49	V	No se indica
11	(Fábián & Gergely, 2020)	Diseño e Implementación de Una Máquina de Ensayo de Tracción	Artículo	Electromecánico	Si	6.5	V	No se indica
12	(Rizal et al., 2023)	Desarrollo de Una Máquina de Ensayo Universal (UTM) Portátil Para Investigar las Propiedades Mecánicas de Materiales de Resistencia Media	Artículo	Electromecánico	Si	10	V	No se indica
13	(Baharuddin & Yani I., 2018)	Implementación de Diseño y desarrollo de Máquina de Ensayo de Tracción Para Aplicación en Material Blando	Artículo	Electromecánico	Si	5	V	No se indica

Nota. Benchmarking de las características principales de los módulos educativos comerciales y proyectos de investigación.

Anexo C: Cronograma

Cronograma de actividades para realizar el proyecto de tesis



Nota. Objetivos específicos en forma de actividades para desarrollar el proyecto de tesis.

Anexo D: Planos

N° de Plano	Descripción
1.	Placa A
2.	Placa B
3.	Placa C
4.	Placa D
5.	Barra A & B
6.	Barra C & D
7.	Acople PC
8.	Sujetador superior
9.	Sujetador inferior
10.	Brazo deslizante
11.	Acople superior del DRO
12.	Acople inferior del DRO
13.	Acople del brazo deslizante
14.	Bastidor
15.	Ensamblaje del módulo educativo de ensayo de tracción
16.	MEET – ENSAMBLE GENERAL
17.	MEET - ENSAMBLE EXPLOSIONADO

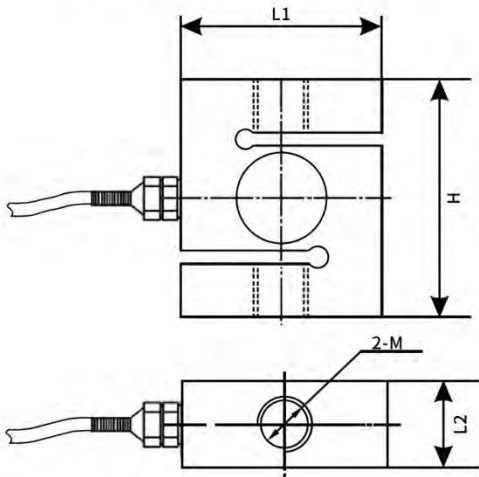
Anexo E: Sensores y Componentes Electrónicos

Anexo E:1 Sensor de fuerza tipo S – (S-Type Load Cell)

DECENT® LOAD CELL



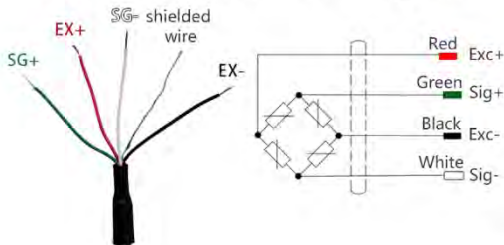
Outline Dimension Unit:mm



Product Parameter
S-type Tension Pressure Sensor

Specification			
Parameter	Value /Unit	Parameter	Value /Unit
Output Output -R.O.	2.0mV/V	Response frequency	1kHz
Zero point output	±1%F.S.	Material	Alloy Steel
Non-linearity	0.05%F.S.	Impedance	350Ω
Hysteresis	0.05%F.S.	Insulation resistance	≥5000MO/100V DC
Repeatability	0.03%F.S.	Working Power	DC 5-15V
Creep (30 min)	0.05%F.S.	Operating temperature range	-20-80℃
Temperature sensitivity drift	0.05%F.S./10℃	Safety overload	150%R.C.
Zero temperature drift	0.05%F.S./10℃	Extreme overload	200%R.C.

Cable Connection Diagram



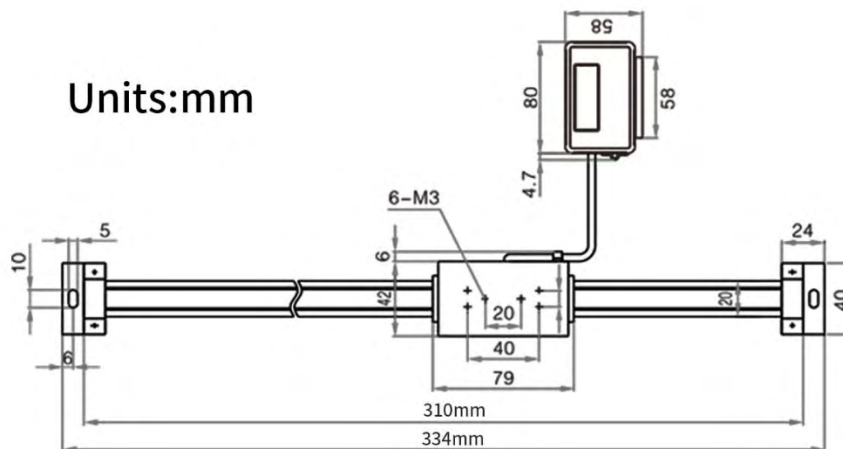
Range	2-M	H	L2	L1
300kg 500kg	M12*1.75	70	25	60
1T 1.5T	M16*2	70	25	60
2T	M16*2	70	25	64
3T 5T	M18*1.5	94	35	86
10T	M30*2	137	60	110

Anexo E.2: Sensor de desplazamiento lineal – Digital Readout (DRO)



Product parameters

【Model number】 : 5204-200 **【Range】** : 0-200mm/8"
【Resolution】 : 0.01 mm/0.0005" **【Accuracy】** : $\pm 0.08\text{mm}/\pm 0.0035''$



Anexo E.3: Microcontrolador ESP32, módulo ADC HX711 y pantalla LCD2004

Microcontrolador ESP32.



Technical Details

Screen Resolution	1920 x 1080
Max Screen Resolution	1920x1080
Processor	2.4 GHz a33_arm_cortex_a7_quad_core
RAM	520 KB DDR
Memory Speed	240 Mhz
Hard Drive	SSD
Graphics Coprocessor	Integrated Graphics
Chipset Brand	Espressif Systems
Card Description	Integrated
Wireless Type	802.11n

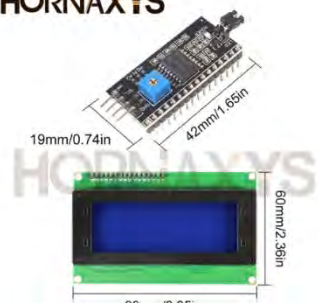
Módulo ADC HX711 24-bit - FSXSEMI.



Detalles

Paquete	module	es personalizado	Si
Número de modelo	HX711 24-bit ADC module	Potencia de disipación	module
Voltaje de Alimentación	module	Aplicación	module
Tipo	Módulo	Nombre de la marca	FSXSEMI
Temperatura de Funcionamiento	module		
Condición	Nuevo		

Módulo de pantalla LCD2004 Blue I2C – HORNAXYS



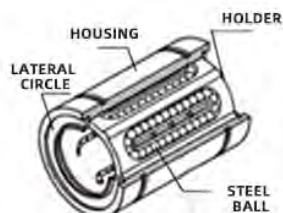
Descripción

2004 Modulo de pantalla LCD de caracteres 204 20X4 Retroiluminación azul.
Condición: nuevo
Retroiluminación azul
Modulo LCD 20x4 serie completamente ensamblado y probado
Formato de pantalla: 20 caracteres x 4 líneas
Tensión de alimentación: 5V
El módulo se puede conectar fácilmente con una MCU.
El módulo es un módulo LCD de caracteres de bajo consumo de energía con un controlador incorporado.

Anexo F: Componentes Mecánicos

Anexo F.1: Rodamiento Lineal

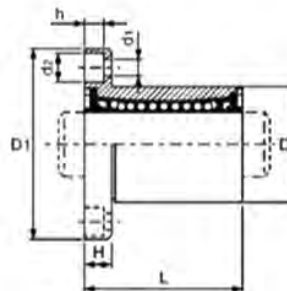
SPECIFICATION PARAMETERS



The combination of linear bearings and linear guide shafts utilizes steel balls to circulate and roll along the track groove formed by the shell and retainer, achieving infinite linear motion. It can achieve low friction and high-precision linear motion, and is widely used in various fields such as handling devices and semiconductor devices.

>>>>METHOD LAN LINEAR BEARING

LMK.....



model	Nu m b e r o f s p h e r i c a l c o l u m n s	Dimensions												Verti cal i t y o f fl a n g e	radia l run o u t	Basic Load Ratings		KG		
		inside diameter		outside diameter		length		flange				Connect ion Hole				move	quiet			
		dr	publi c erran	D	publi c erran	L	publi c erran	D1	K	H	Ø	d1	d2					h		
LMK6	4	6	0 -0.009	12	0 -0.011	19	0 -0.020	28	22	5	20	3.5	6	3.1	-0.012	-0.012	21	27	0.022	0.017
LMK8S	4	8		15		17		32	25	5	24	3.5	6	3.1			18	22		
LMK8	4	8		15		24		32	25	5	24	3.5	6	3.1			28	40	0.035	0.027
LMK10	4	10		19		29		40	30	6	29	4.5	7.5	4.1			38	56	0.066	0.047
LMK12	4	12		21		30		42	32	6	32	4.5	7.5	4.1			52	80	0.070	0.053
LMK13	4	13		23		32		43	34	6	33	4.5	7.5	4.1			52	80	0.079	0.064
LMK16	5	16		28		37		48	37	6	38	4.5	7.5	4.1			79	120	0.122	0.102
LMK20	5	20		32	42		54	42	8	43	5.5	9	5.1			90	140	0.163	0.12	
LMK25	6	25	0 -0.010	40	0 -0.016	59		62	50	8	51	5.5	9	5.1	-0.015	-0.015	100	160	0.311	0.272
LMK30	6	30		45		64	0 -0.030	74	58	10	60	6.6	11	6.1			160	280	0.42	0.34
LMK35	6	35		52		70		82	64	10	67	6.6	11	6.1			170	320	0.60	0.496
LMK40	6	40	0 -0.012	60	0 -0.019	80		96	75	13	78	9	14	8.1	-0.020	-0.020	220	410	0.749	0.773
LMK50	6	50		80		100		116	92	13	98	9	14	8.1			390	810	1.96	1.72
LMK60	6	60	0 -0.015	90	0 -0.022	110		134	106	18	112	11	17.5	10.8	-0.025	-0.025	480	1020	2.7	2.25

Anexo F.2: NEWTRY - Bomba hidráulica manual CP-180 + Cilindro hidráulico RSC - 1050

NEWTRY CP-180 MANUAL HYDRAULIC HAND PUMP

HIGH PRESSURE OUTPUT

SMALL & PORTABLE

EASY OPERATION

1. Movable Handle
Used to pressurize the hydraulic pump.

2. Relief Valve Switch
Rotate clockwise to pressurize and counter - clockwise to relieve pressure.

3. 3/8" fast female connector

NEWTRY

Internal Diameter
Outer diameter
STROKE: 2"/50mm

PRODUCT PARAMETERS

TONNAGE	SELF HEIGHT	STROKE	OUTER DIAMETER	INTERNAL DIAMETER	WEIGHT	EFFECTIVE AREA	USED WITH PUMP
10T	4"/100mm	2"/50mm	2.36"/60mm	1.77"/45mm	5.5lbs/2.5kg	2.46sq.in/ 15.89cm²	CP-180

3/8"

FEMALE CONNECTOR ON THE PUMP

Please open the oil filling hole at the tail of the hydraulic pump and pour in 2/3 of No. 15 hydraulic oil.

Please note: The hydraulic pump comes with oil pre-filled at the factory. Only perform the oil filling operation when the oil level is insufficient.

Anexo G: Tablas y figuras para el diseño mecánico

Table 10.2 Basic Dimensions of ISO Metric Screw Threads

Nominal Diameter d (mm)	Coarse Threads			Fine Threads		
	Pitch p (mm)	Minor Diameter d_f (mm)	Stress Area A_s (mm ²)	Pitch p (mm)	Minor Diameter d_f (mm)	Stress Area A_s (mm ²)
3	0.5	2.39	5.03			
3.5	0.6	2.76	6.78			
4	0.7	3.14	8.78			
5	0.8	4.02	14.2			
6	1	4.77	20.1			
7	1	5.77	28.9			
8	1.25	6.47	36.6	1	6.77	39.2
10	1.5	8.16	58.0	1.25	8.47	61.2
12	1.75	9.85	84.3	1.25	10.5	92.1
14	2	11.6	115	1.5	12.2	125
16	2	13.6	157	1.5	14.2	167
18	2.5	14.9	192	1.5	16.2	216
20	2.5	16.9	245	1.5	18.2	272
22	2.5	18.9	303	1.5	20.2	333
24	3	20.3	353	2	21.6	384
27	3	23.3	459	2	24.6	496
30	3.5	25.7	561	2	27.6	621
33	3.5	28.7	694	2	30.6	761
36	4	31.1	817	3	32.3	865
39	4	34.1	976	3	35.3	1030

None: Metric threads are identified by diameter and pitch as "M8 $\times$ 1.25."

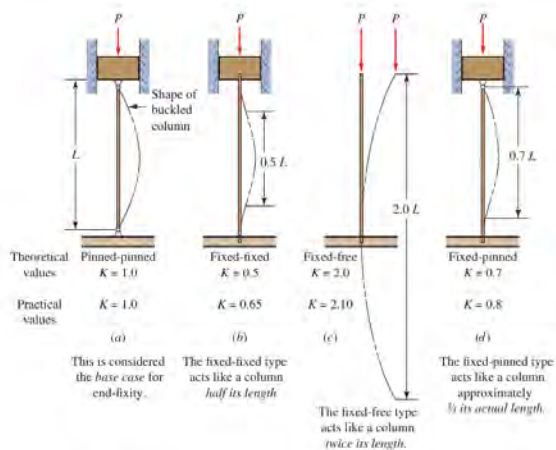
Table 10.5 Specifications for Steel Used in Millimeter Series Screws and Bolts

SAE Class	Diameter <i>d</i> (mm)	Proof Load (Strength) ^a	Yield Strength ^b	Tensile Strength	Elongation, Minimum	Reduction of Area, Minimum	Core Hardness, Rockwell	
		<i>S_p</i> (MPa)	<i>S_y</i> (MPa)	<i>S_u</i> (MPa)	(%)	(%)	Min	Max
4.6	5 thru 36	225	240	400	22	35	B67	B87
4.8	1.6 thru 16	310	—	420	—	—	B71	B87
5.8	5 thru 24	380	—	520	—	—	B82	B95
8.8	17 thru 36	600	660	830	12	35	C23	C34
9.8	1.6 thru 16	650	—	900	—	—	C27	C36
10.9	6 thru 36	830	940	1040	9	35	C33	C39
12.9	1.6 thru 36	970	1100	1220	8	35	C38	C44

^aProof load (strength) corresponds to the axially applied load that the screw or bolt must withstand without permanent set.

^bYield strength corresponds to 0.2% offset measured on machine test specimens.

Source: Society of Automotive Engineers standard J1199 (1970).

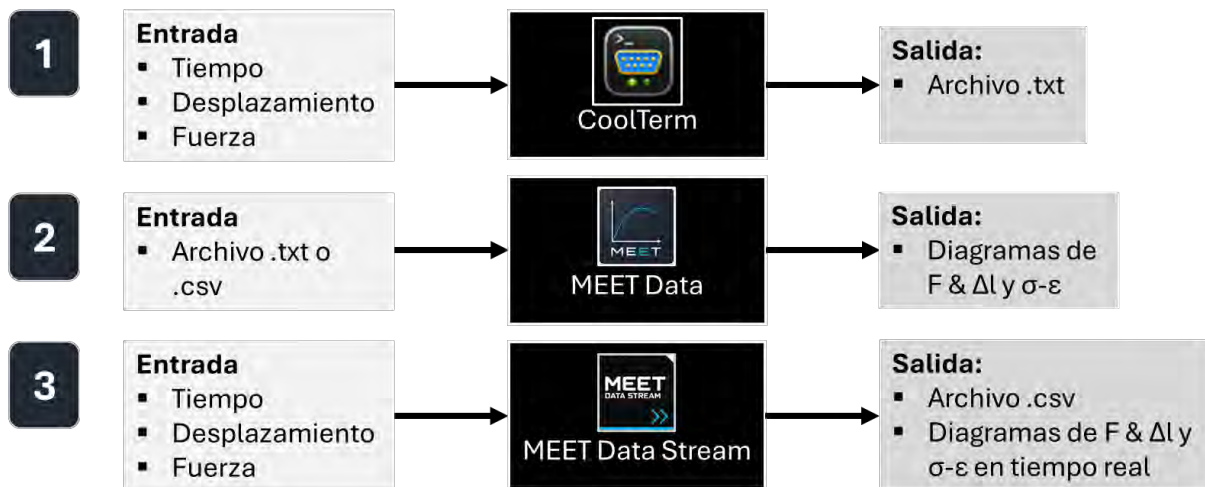


Anexo I: Manual Del Módulo Educativo De Ensayo De Tracción:

Se presenta los siguientes manuales:

- Manual del Software MEET Data.
- Manual del Software MEET DATA Stream.
- Manual del Módulo Educativo de Ensayo de Tracción.

Black Box de los software de procesamiento de datos:



Anexo J: Repositorio Online

Acceder al *link* “https://codeberg.org/mc_apps” para descargar los siguientes archivos:

- MEET Data

https://codeberg.org/mc_apps/MEET_Data

- MEET Data Stream

https://codeberg.org/mc_apps/MEET_Data_Stream

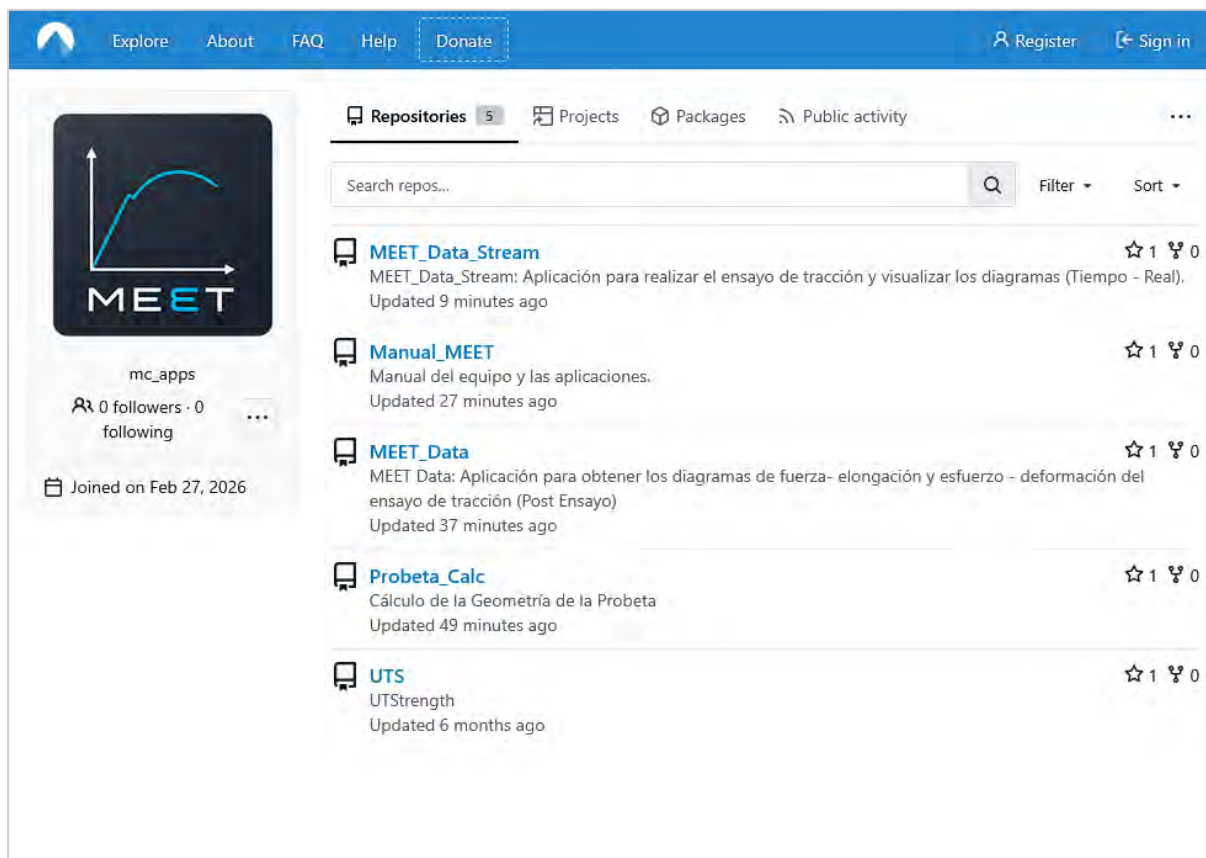
- Excel - Cálculo de la Geometría de la Probeta

https://codeberg.org/mc_apps/Probeta_Calc.git

- Manual

https://codeberg.org/mc_apps/Manual_MEET.git

- Contraseña: [Ensayo_de_Traccion_MC_UNSAAC]



The screenshot displays the Codeberg repository page for the user 'mc_apps'. The page header includes navigation links: Explore, About, FAQ, Help, and Donate. The user profile section on the left shows 'mc_apps' with 0 followers and 0 following, and a join date of Feb 27, 2026. The main content area lists five repositories:

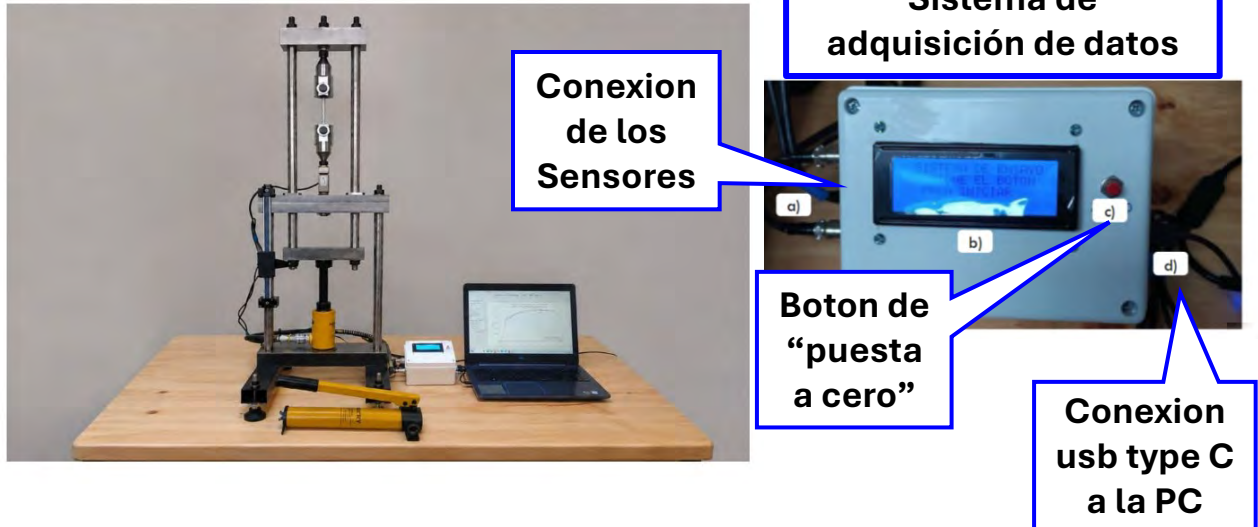
Repository Name	Description	Updated	Stars	Forks	Clones
MEET_Data_Stream	MEET_Data_Stream: Aplicación para realizar el ensayo de tracción y visualizar los diagramas (Tiempo - Real).	Updated 9 minutes ago	1	0	0
Manual_MEET	Manual del equipo y las aplicaciones.	Updated 27 minutes ago	1	0	0
MEET_Data	MEET Data: Aplicación para obtener los diagramas de fuerza- elongación y esfuerzo - deformación del ensayo de tracción (Post Ensayo)	Updated 37 minutes ago	1	0	0
Probeta_Calc	Cálculo de la Geometría de la Probeta	Updated 49 minutes ago	1	0	0
UTS	UTStrength	Updated 6 months ago	1	0	0

MEET DATA Stream



1. Realizar la conexión de los sensores al sistema de adquisición de datos y la conexión a la PC:

Conexión del MEET con el sistema de adquisición de datos y la PC



2. Abrir la aplicación MEET_Data_Stream en la PC.
3. Dar *click* en “Refresh Ports”.
4. Dar *click* en “connect”.
5. Dar *click* en “Start Monitoring”
6. Completar la información de la probeta:
 - Test Number (número de ensayo)
 - Material
 - Specimen shape → Rectangular
 - Width → ancho en mm
 - Thickness → espesor en mm
 - Gauge Length → longitud de calibre en mm
7. Establecer la escala de los ejes:
8. Presionar el botón rojo de puesta a cero en el sistema de adquisición de datos para iniciar el ensayo de tracción.
9. Accionar la bomba hidráulica con un ritmo constante.
10. Después de fracturar la probeta, presionar el botón rojo de puesta a cero.
11. Dar *click* en “Stop Monitoring” para guardar el archivo “csv” y “png” generados del ensayo de tracción.

Aplicación MEET_Data_Stream:

Entrada

- Tiempo
- Desplazamiento
- Fuerza

MEET
DATA
STREAM

Salida:

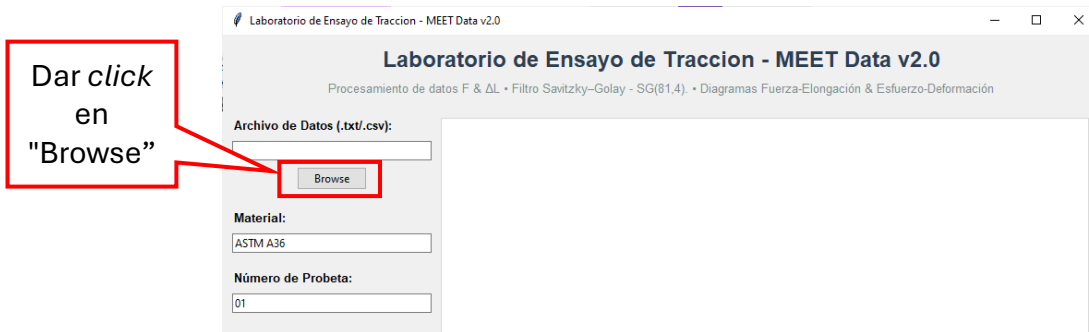
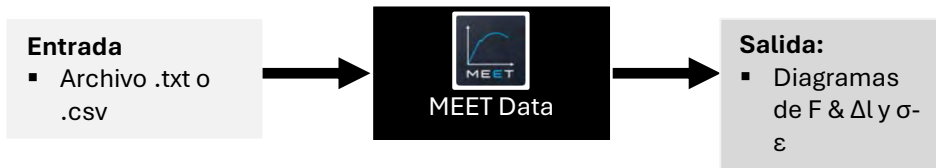
- Archivo .csv
- Diagramas de F & Δl y σ - ϵ en tiempo real



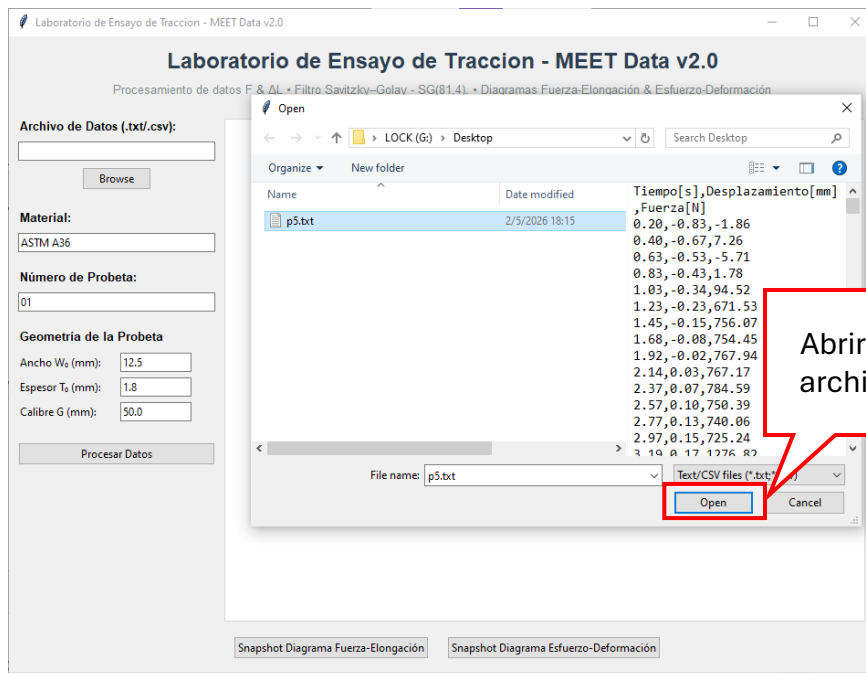
MEET DATA



1. Abrir la aplicación MEET DATA y dar click en “Browse”:



2. Abrir el archive txt o csv:



3. Completar la información de la Probeta:

Completar la información de la probeta de tracción

Laboratorio de Ensayo de Tracción - MEET Data v2.0

Procesamiento de datos F & ΔL • Filtro Savitzky-Golay - SG(81,4) • Diagramas Fuerza-Elongación & Esfuerzo-Deformación

Archivo de Datos (.txt/.csv):
G:/Desktop/p5.txt
Browse

Material:
ASTM A36

Número de Probeta:
01

Geometría de la Probeta

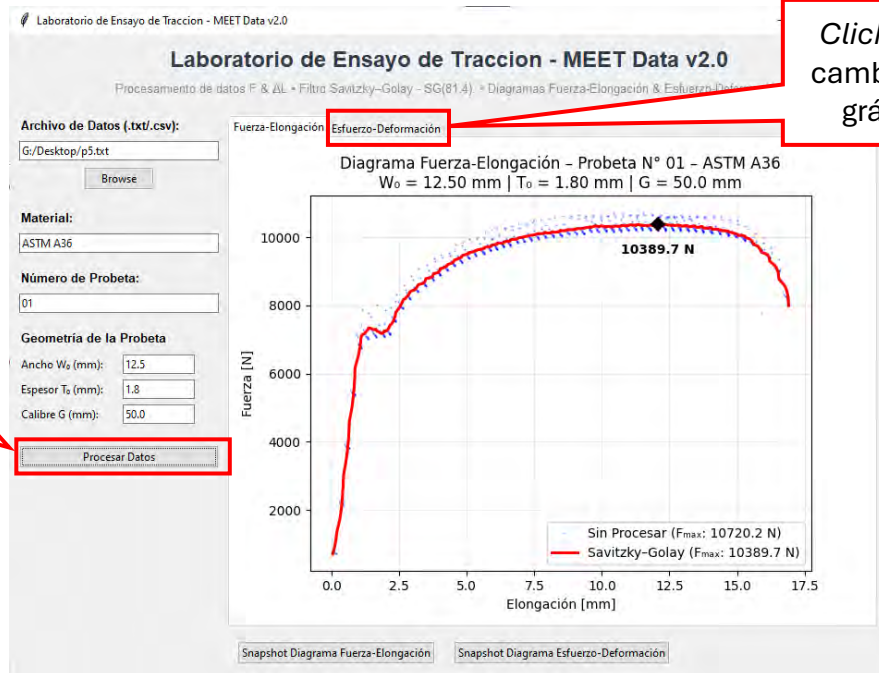
Ancho W_0 (mm): 12.5
Espesor T_0 (mm): 1.8
Calibre G (mm): 50.0

Procesar Datos

Snapshot Diagrama Fuerza-Elongación Snapshot Diagrama Esfuerzo-Deformación

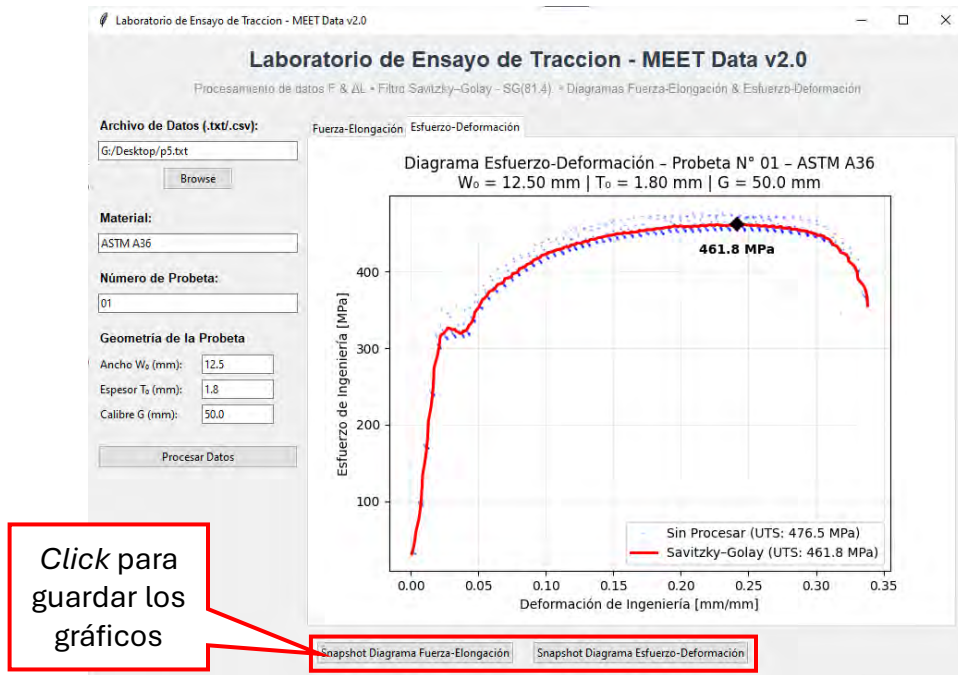
4. Dar click en “Procesar Datos”:

Dar click en “Procesar Datos”

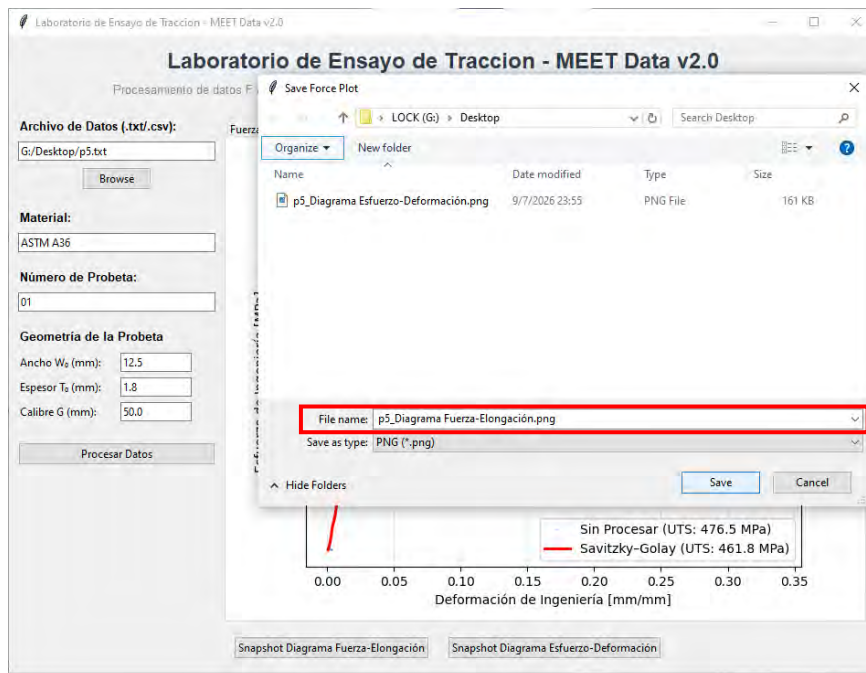


Click para cambiar de gráfico

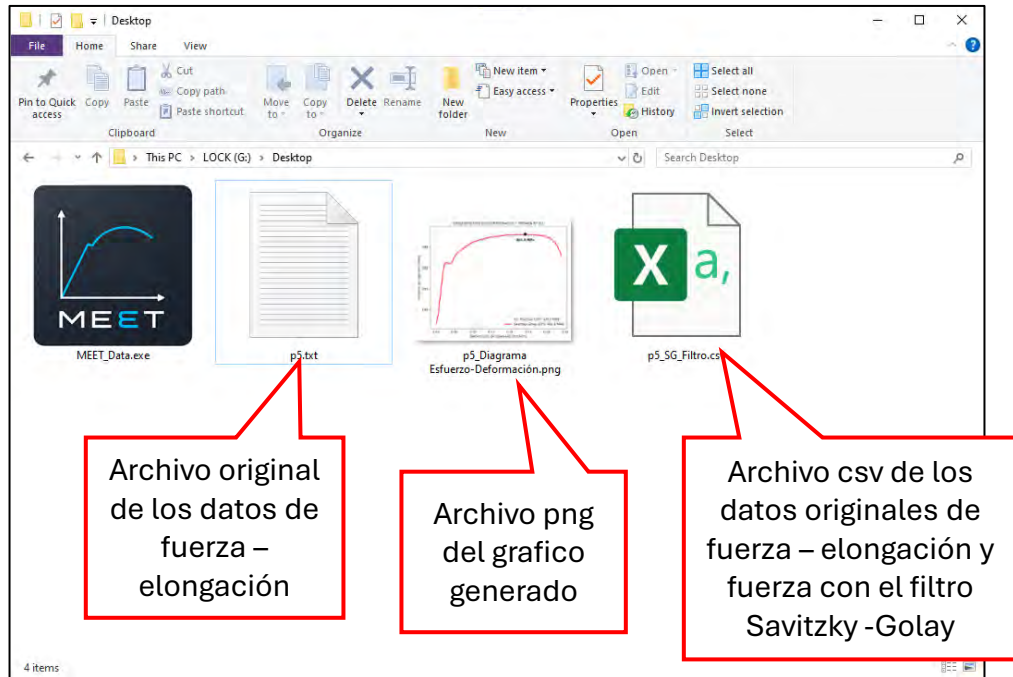
5. Guardar los gráficos generados:



6. Guardar los gráficos con los nombres por defecto:



7. Los archivos png y csv se guardan en la misma carpeta:



8. El archivo csv incluye una columna adicional a la derecha “SG_Fuerza[N]” con el filtro Savitzky-Golay:

Datos originales de fuerza – elongación

Datos de fuerza con el filtro Savitzky -Golay

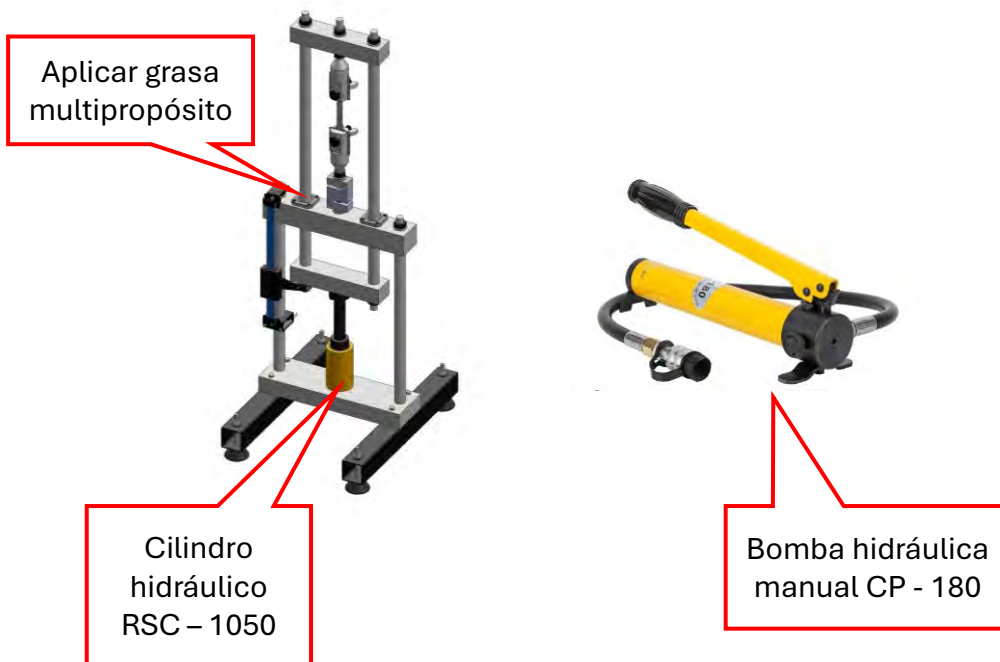
	A	B	C	D	E
1	Tiempo[s]	Desplazar	Fuerza[N]	SG_Fuerza[N]	
2	2.14	0.03	767.17	713.5369	
3	2.37	0.07	784.59	806.2028	
4	2.57	0.1	750.39	909.4358	
5	2.77	0.13	740.06	1022.438	
6	2.97	0.15	725.24	1144.432	
7	3.19	0.17	1276.82	1274.66	
8	3.42	0.2	1636.98	1412.384	
9	3.62	0.25	2238.35	1556.884	
10	3.82	0.29	2191.94	1707.463	
11	4.02	0.32	2181.02	1863.441	
12	4.24	0.35	2173.31	2024.159	
13	4.47	0.37	2169.85	2188.979	
14	4.67	0.39	2163.57	2357.28	
15	4.87	0.4	2156.71	2528.462	
16	5.07	0.42	2151.78	2701.947	
17	5.29	0.42	2277.08	2877.172	
18	5.51	0.44	2929.38	3053.598	
19	5.71	0.48	3927.2	3230.705	
20	5.91	0.52	3874.22	3407.991	
21	6.11	0.55	3856.1	3584.975	
22	6.33	0.58	3844.09	3761.195	

Módulo Educativo de Ensayo de Tracción



Operación del modulo educativo de ensayo de tracción:

- 1. Antes de iniciar el ensayo de tracción, se debe purgar el cilindro hidráulico.**
- 2. Accionar la bomba hidráulica manual para desplazar completamente el cilindro hidráulico 2-3 veces seguidas sin carga. Girar la válvula en sentido horario para presurizar (modo de trabajo) y en sentido anti horario para liberar la presión del sistema y retraer el cilindro hidráulico.**
- 3. Reemplazar el aceite hidráulico (ISO VG15 o HLP 15) cada 6 meses.**
- 4. Anadir grasa multipropósito a los rodamientos lineales.**
- 5. No desconectar el cilindro hidráulico de la bomba hidráulica para evitar perdida de fluido hidráulico.**



Hoja de Cálculo de la Geometría de la Probeta:

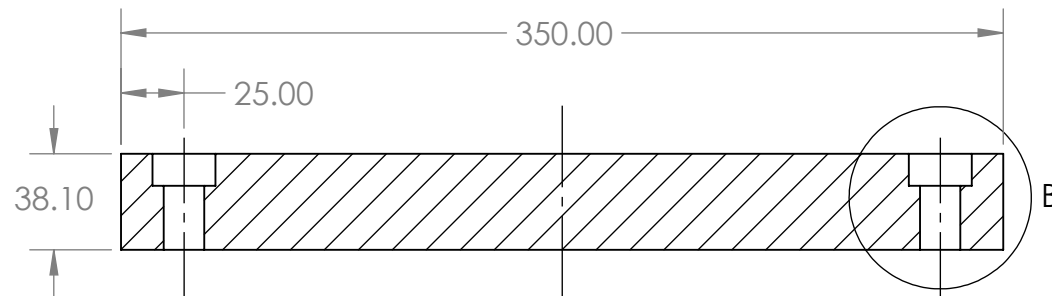
Espesores Máximos

Diámetros Máximos

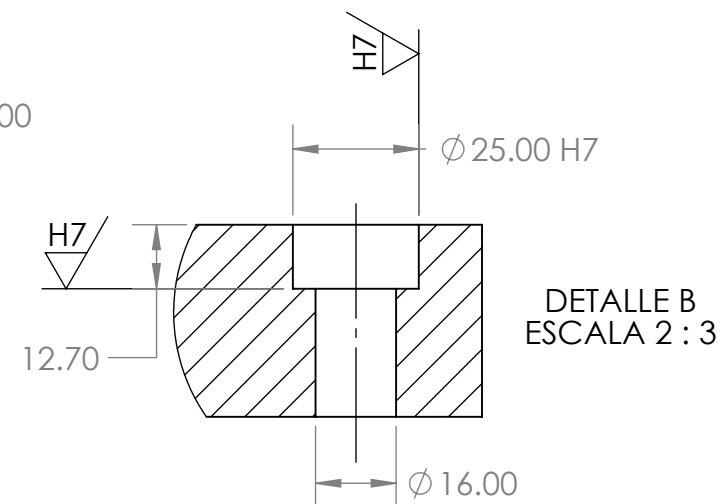
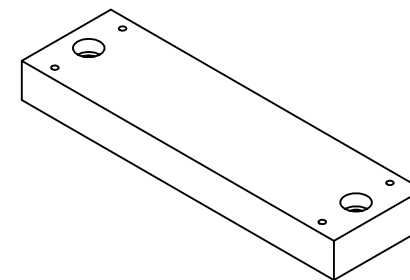
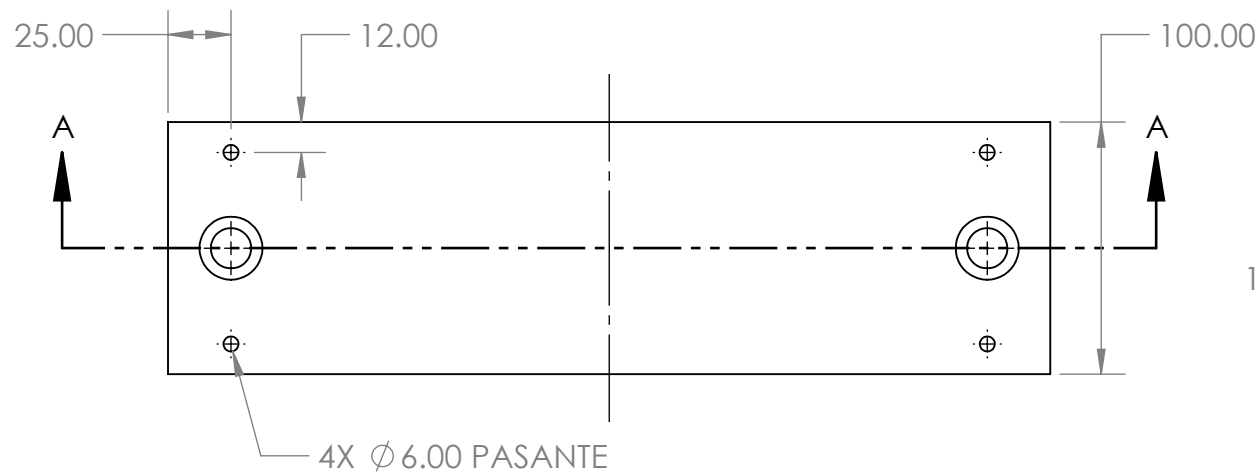
Otros Materiales

Cálculo de la Geometría de la Probeta										
Material	SAE 1020	AISI 1045	A36	AISI 316	Aluminio 6063-T5	A36	SAE 1020	AISI 1045	otro	otro
Resistencia última a la tracción	1	2	3	4	5	6	7			
UTS (Mpa)	460	700	550	680	200	550	460	700		
Width/Diam (mm)	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	5.5	6	5		
Thickness (mm)	2	1.5	1.8	1.5	3.8					
A (mm²)	25	18.75	22.5	18.75	47.5	23.758294	28.274334	19.634954	0	0
F= SutxA (N)	11,500.00	13,125.00	12,375.00	12,750.00	9,500.00	13,067.06	13,006.19	13,744.47	0.00	0.00
F. S.	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
F_dis= FxFS (N)	17,250.00	19,687.50	18,562.50	19,125.00	14,250.00	19,600.59	19,509.29	20,616.70	0.00	0.00
F_dis (kN)	18	20	19	20	15	20	20	21	0	0
F_dis (Kg)	1758	2007	1892	1950	1453	1998	1989	2102	0	0
Nota	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E8	E8
Tipo de Sección	■	■	■	■	■	●	●	●	●	■
POSIBLE?	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

'Si' para probetas permitidas



SECCION A-A
ESCALA 1 : 3



DETALLE B
ESCALA 2 : 3

NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm .

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: PLACA A

DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

MATERIAL: ASTM A36

REVISADO E.W.S. P.

ESCALA: 1:3

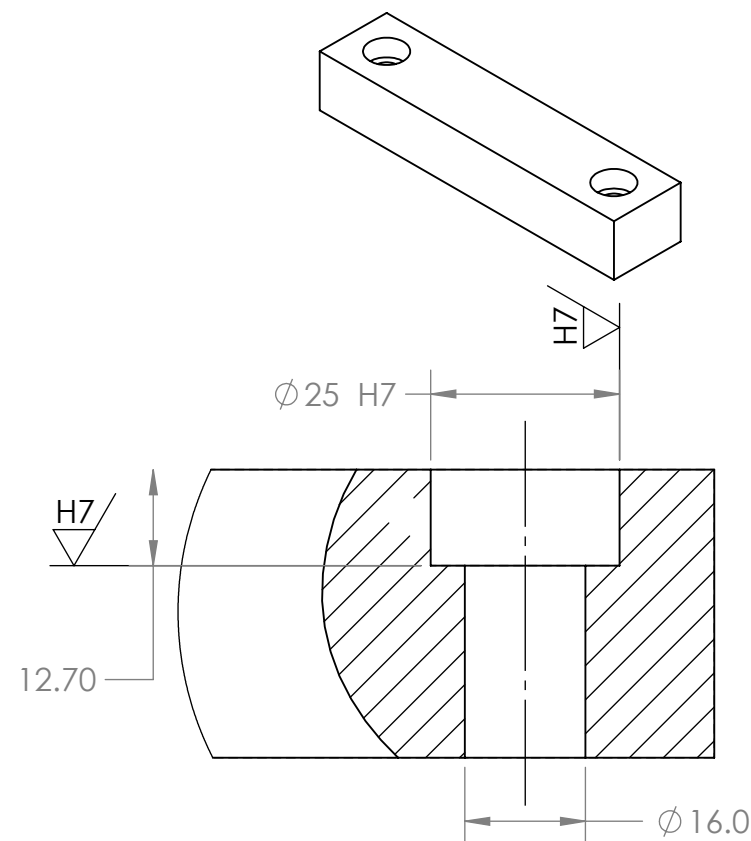
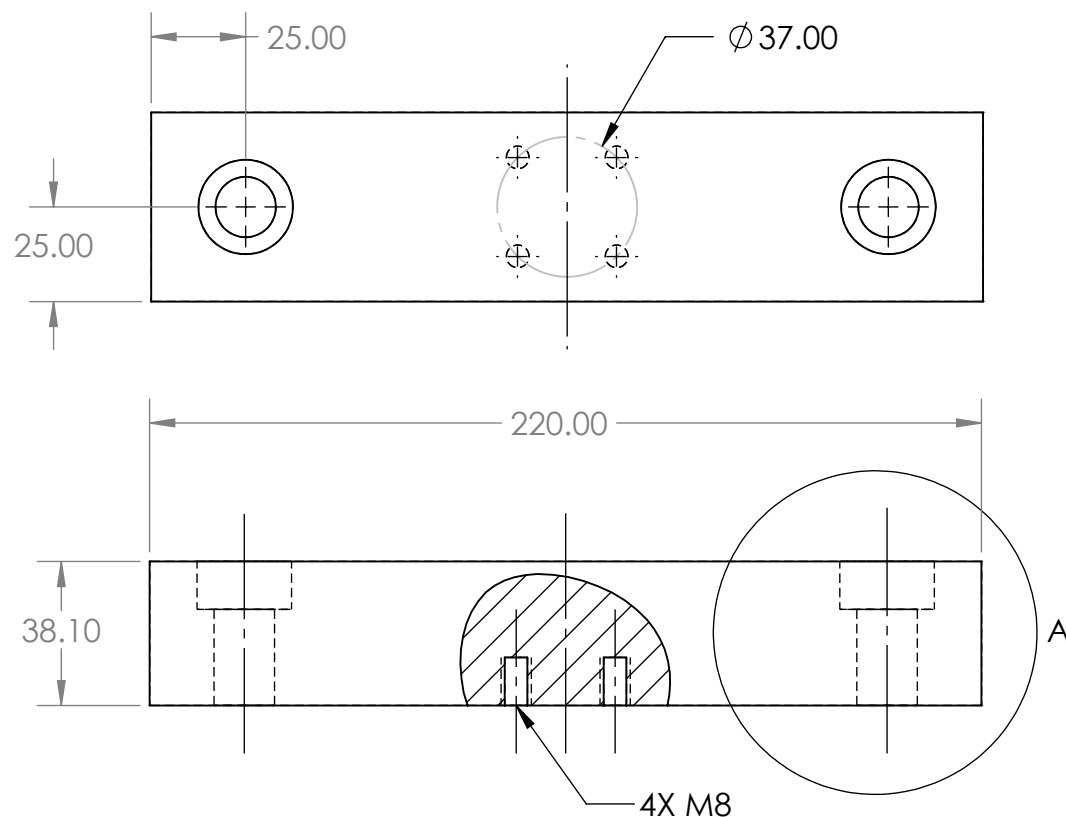
FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 01



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm .

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: PLACA B

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

REVISADO: E.W.S.P.



ESCALA: 1:2

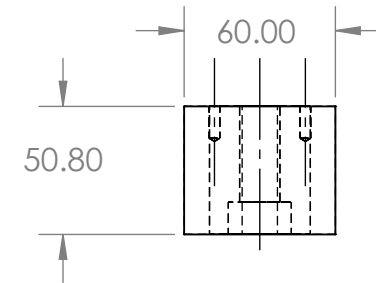
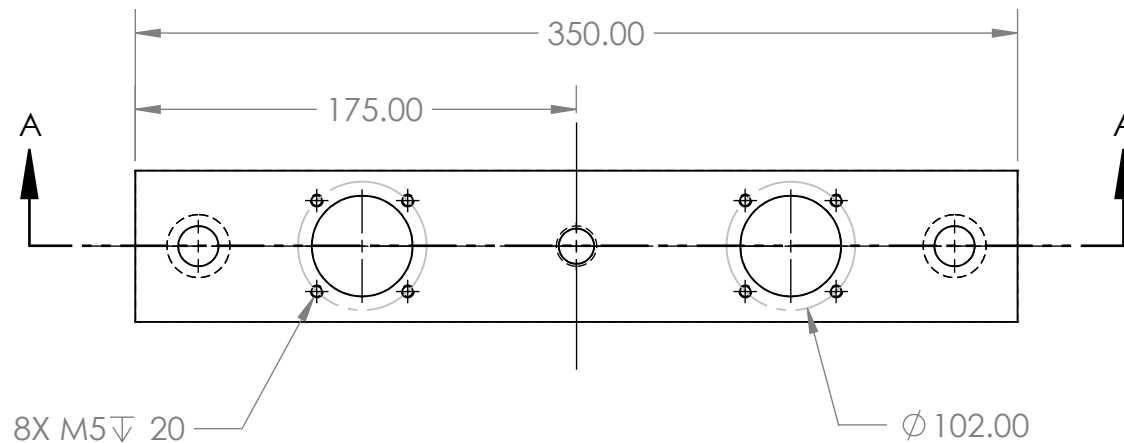
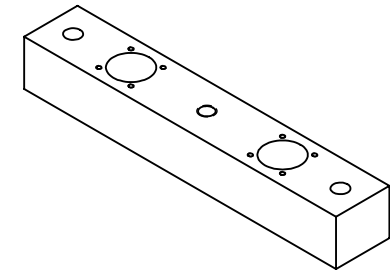
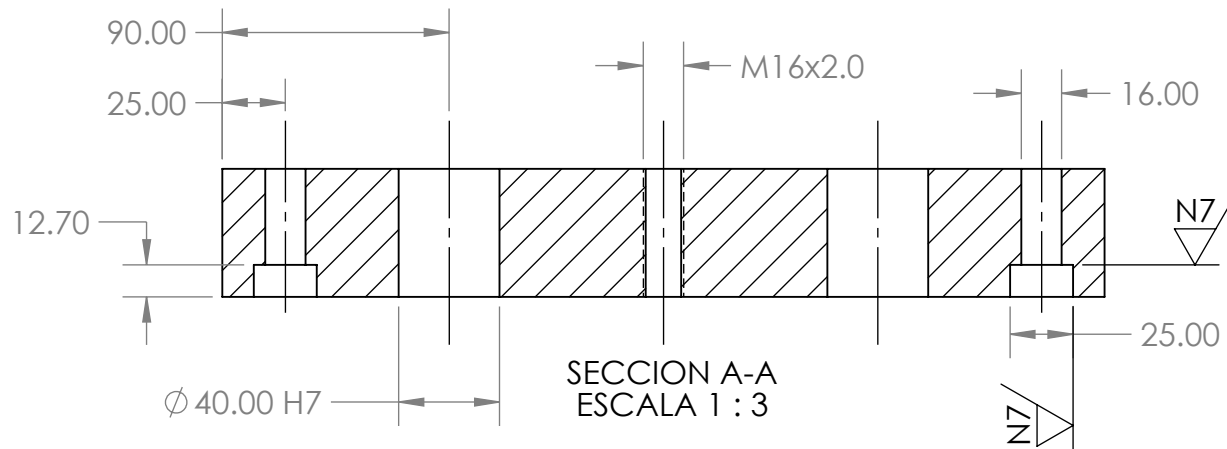
FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 02



NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm .

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: PLACA C

DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

MATERIAL: ASTM A36

REVISADO: E.W.S.P.

ESCALA: 1:3

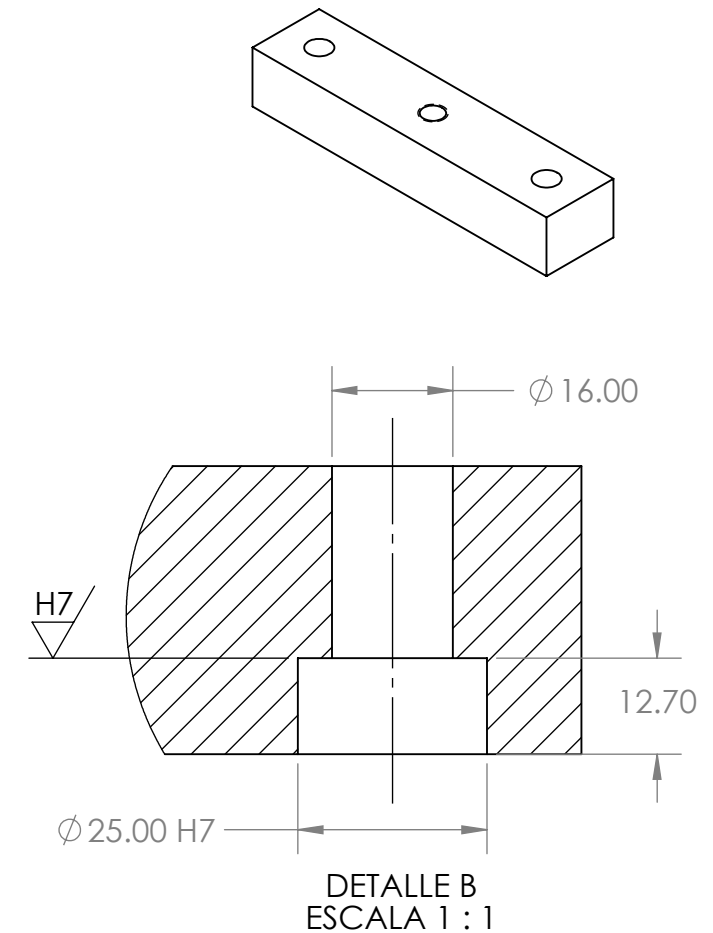
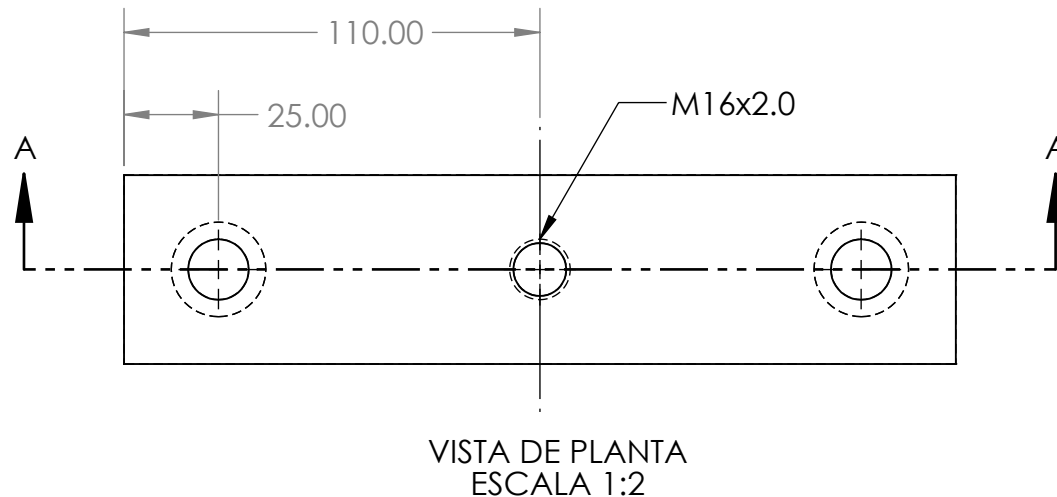
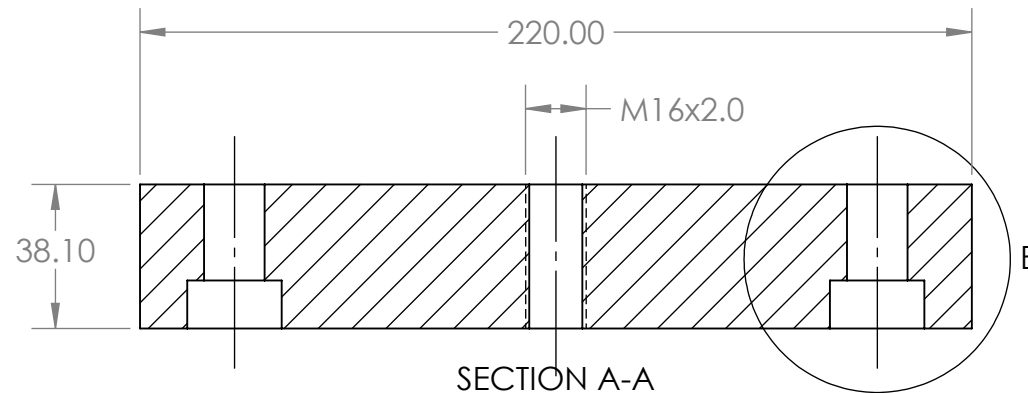
FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 03



NOTAS:

(1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
(2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm .

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



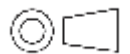
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: PLACA D

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

REVISADO: E.W.S.P.



ESCALA: 1:2

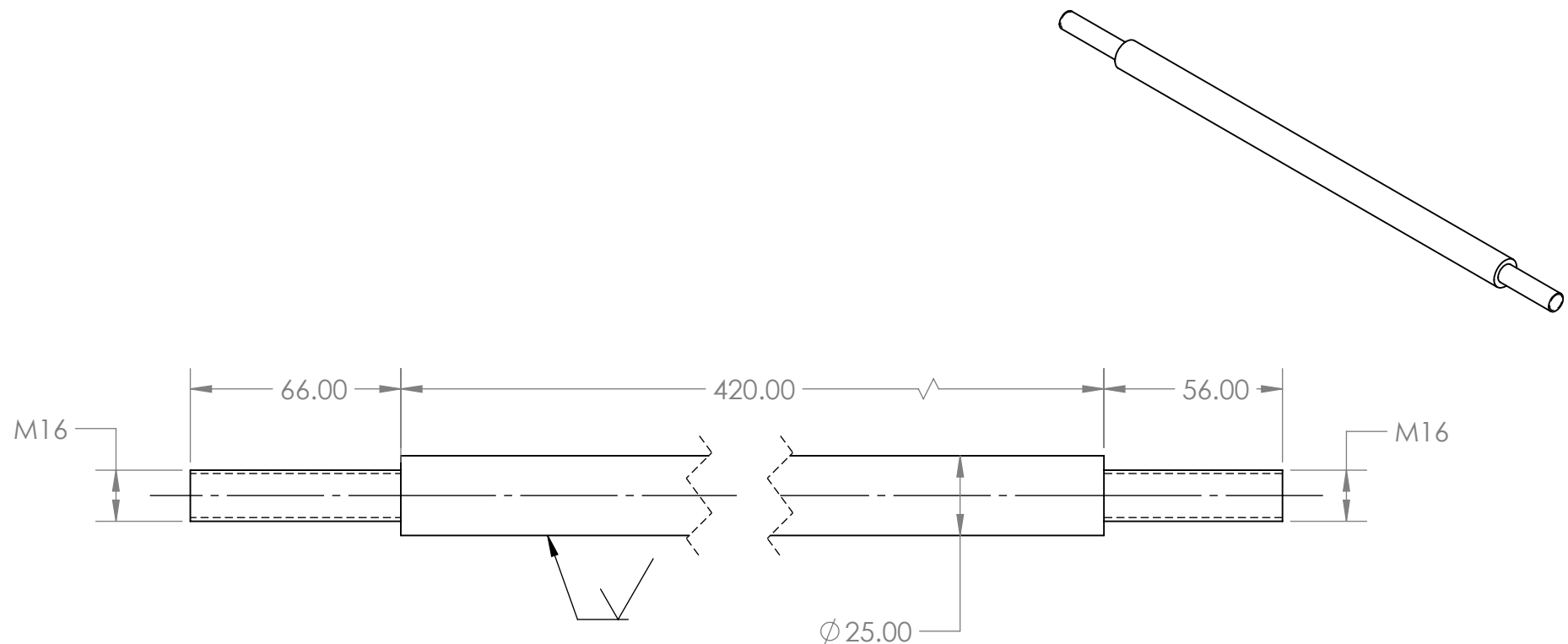
FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 04



NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm , excepto roscas.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:2

FECHA: 10/12/25



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: BARRA A - B

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

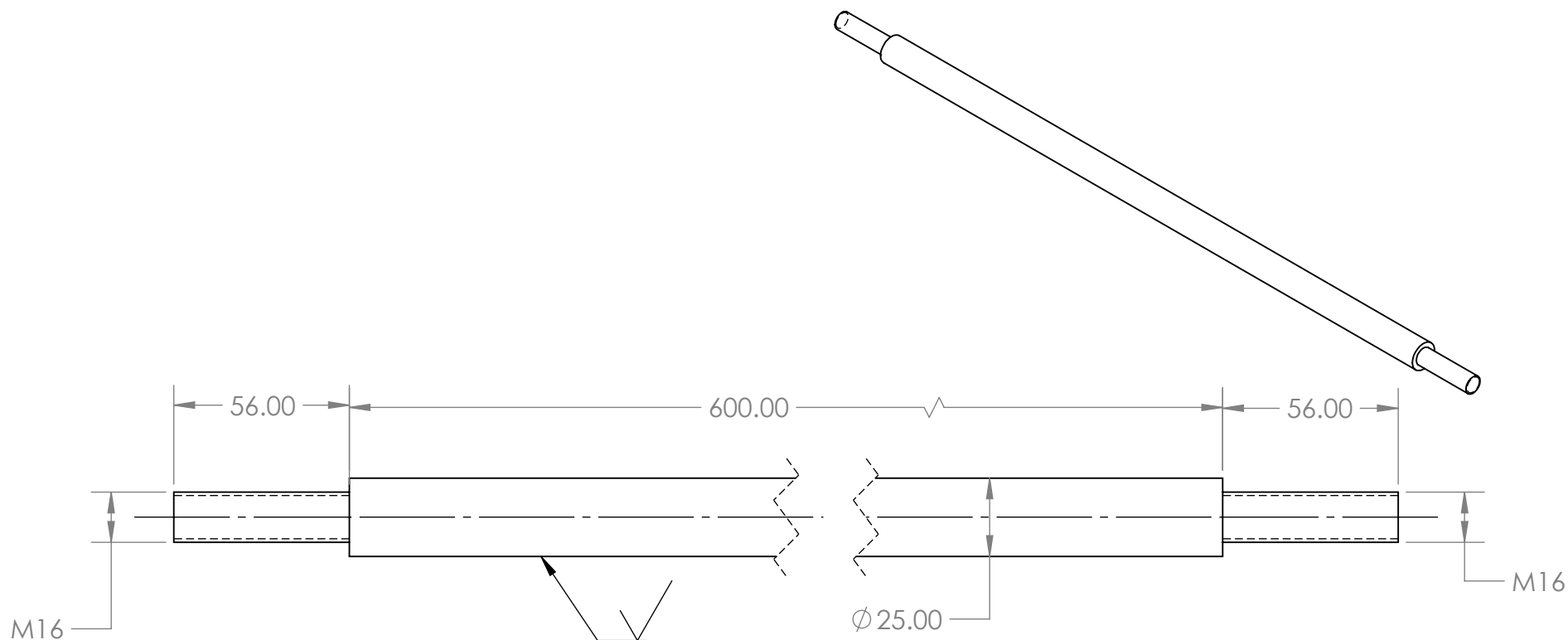
REVISADO: E.W.S.P.

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 05



NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
 (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 µm, excepto roscas.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:2

FECHA: 10/12/25



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: BARRA C - D

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

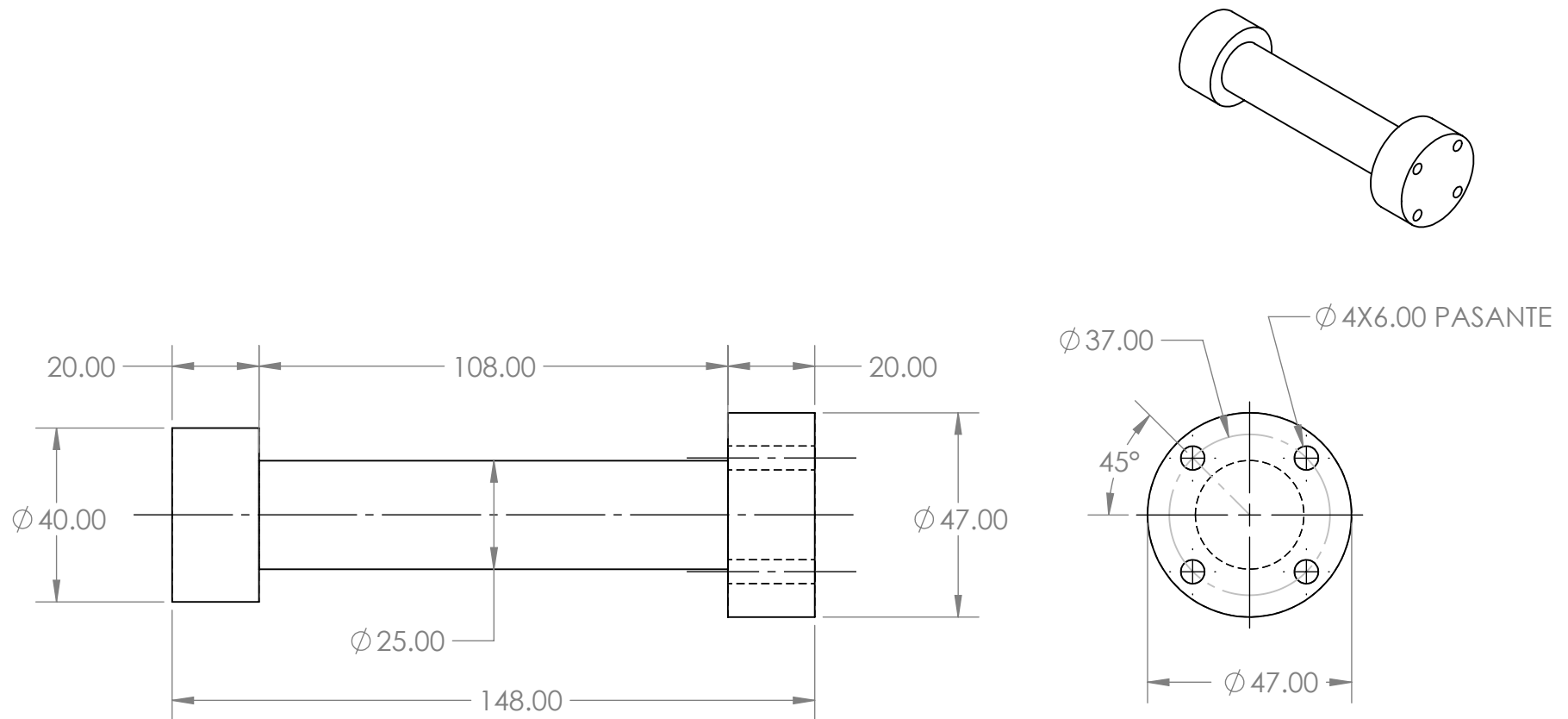
REVISADO: E.W.S.P.

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 02

HOJA: 06



NOTAS:

Todas las medidas en mm

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:1.5

FECHA: 10/12/25



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: ACOUPLE PC

DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

MATERIAL: ASTM A36

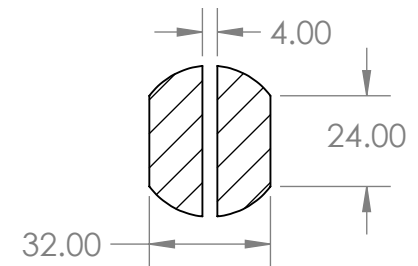
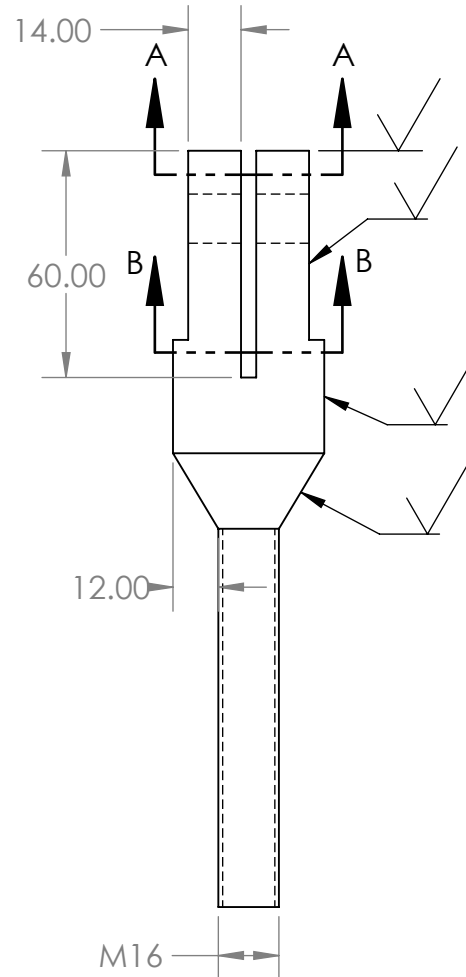
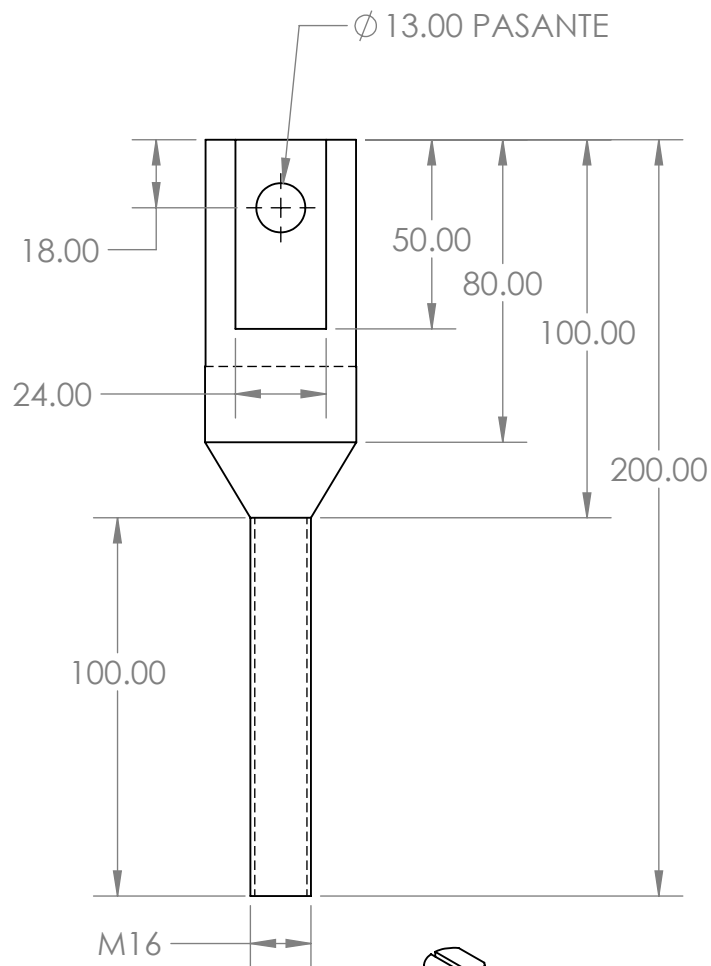
REVISADO: E.W.S. P.

UNIDADES: mm

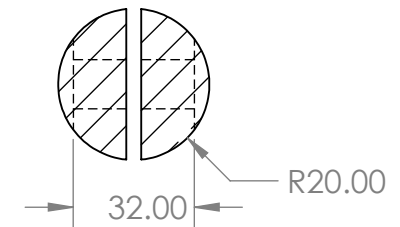
TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 07



SECCION A-A
ESCALA 1 : 2



SECCION B-B
ESCALA 1 : 2

NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 μm , excepto roscas.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



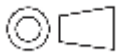
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: SUJETADOR SUPERIOR

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

REVISADO: E.W.S.P.



ESCALA: 1:2

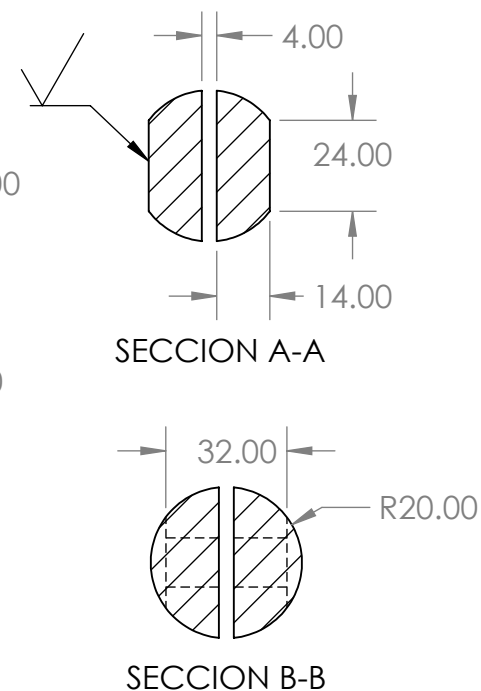
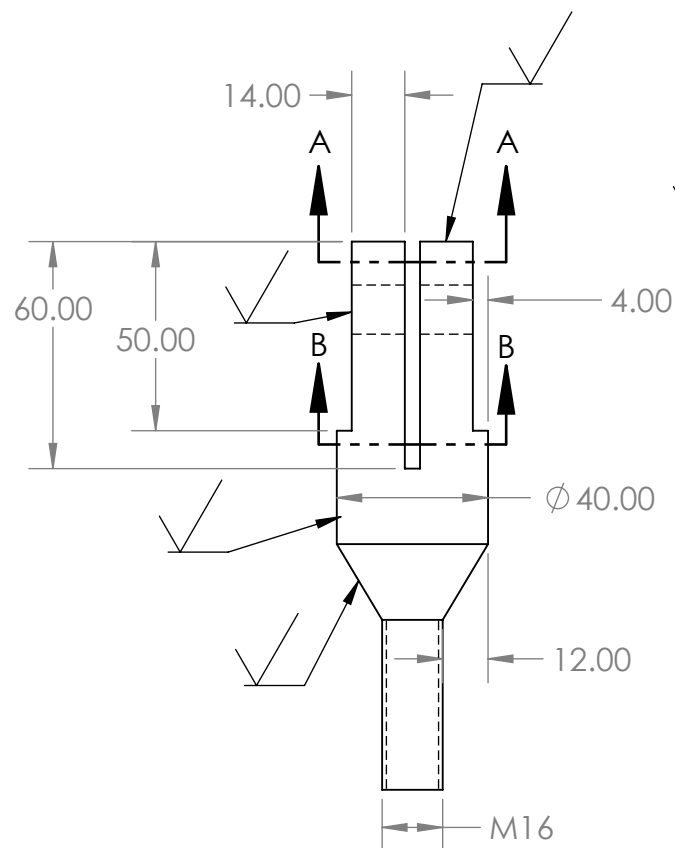
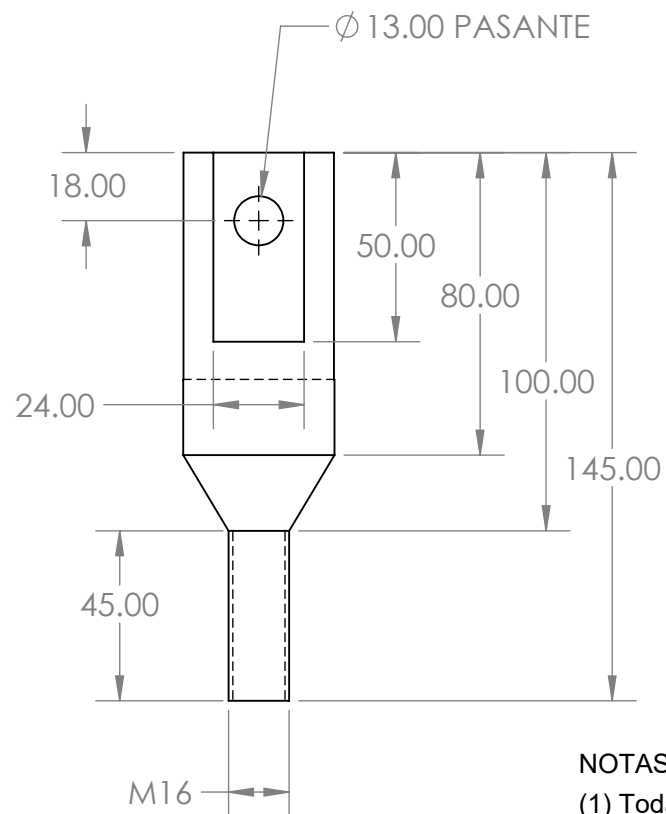
FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

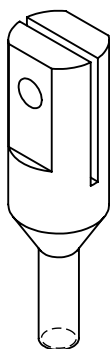
CANTIDAD: 01

HOJA: 08



NOTAS:

- (1) Todas las superficies serán mecanizadas con rugosidad N8, salvo indicación contraria.
- (2) Protección superficial: Laca acrílica transparente en todas las superficies externas, espesor 30–50 µm, excepto roscas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:2

FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 09



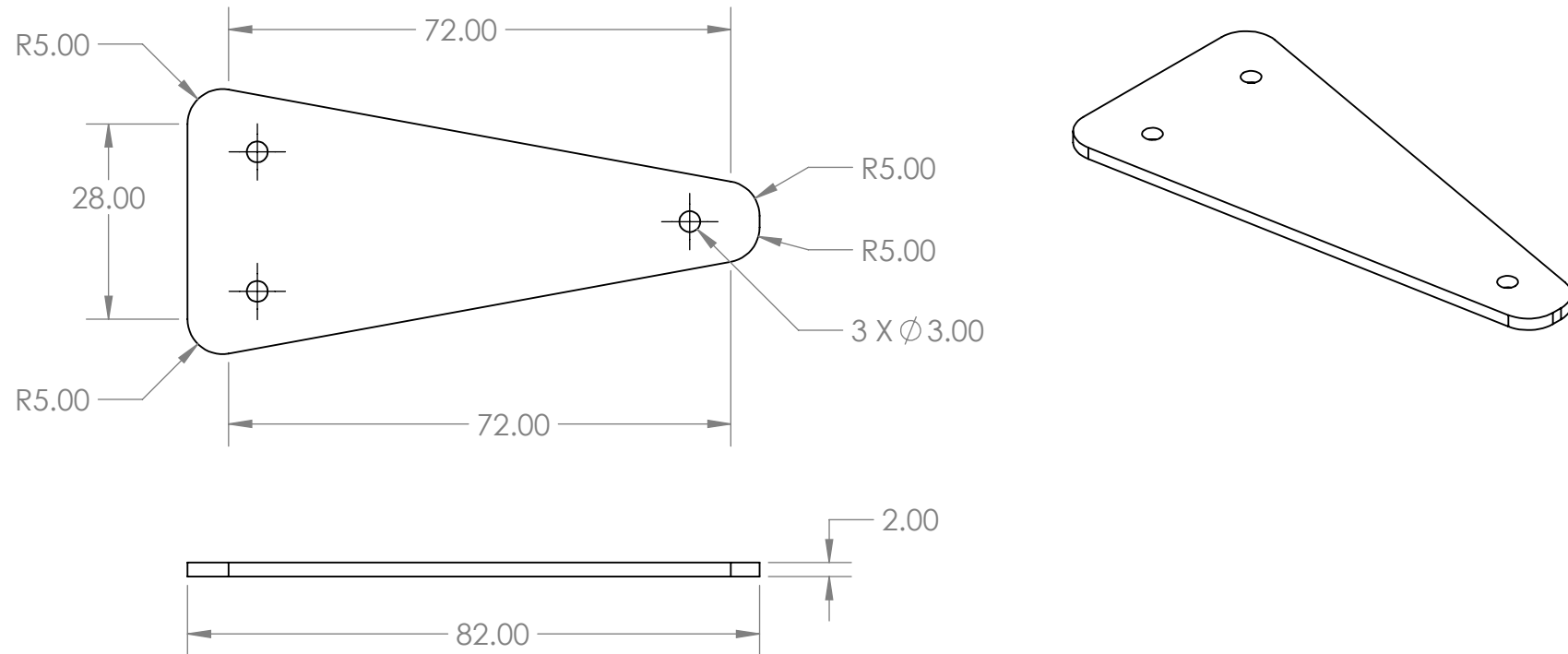
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: SUJETADOR INFERIOR

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

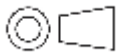
REVISADO: E.W.S.P.



NOTAS:

(1) Acabado superficial: Pintura esmalte negro brillante, espesor 40–60 μm , aplicado en todas las superficies externas, salvo indicación contraria.

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:1

FECHA: 10/12/25



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL
ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: BRAZO DESLIZANTE

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

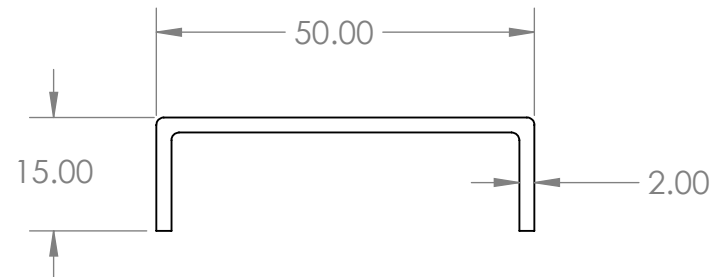
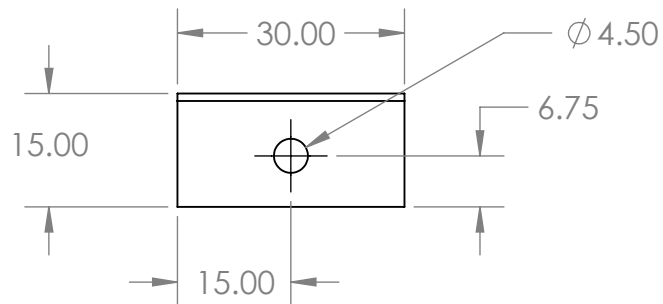
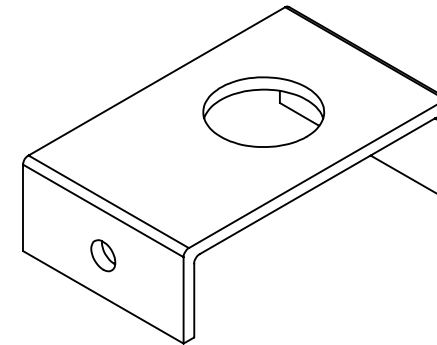
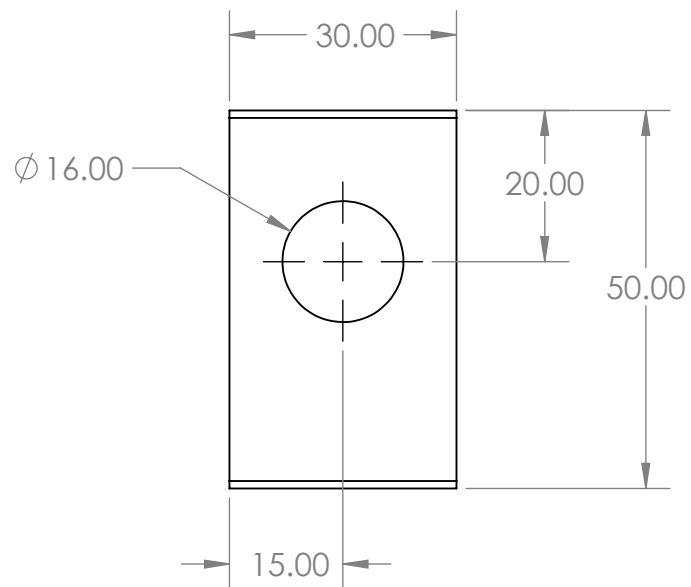
REVISADO: E.W.S.P.

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

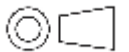
HOJA: 10



NOTAS:

(1) Acabado superficial: Pintura esmalte negro brillante, espesor 40–60 μm , aplicado en todas las superficies externas, salvo indicación contraria.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:1

FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 11



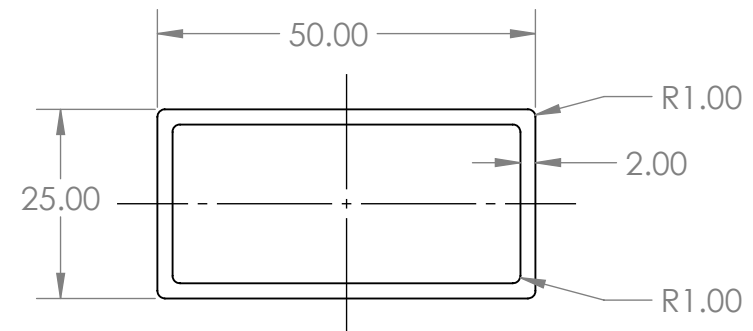
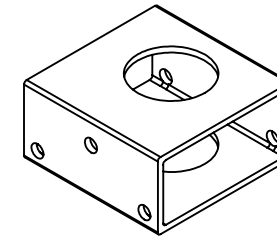
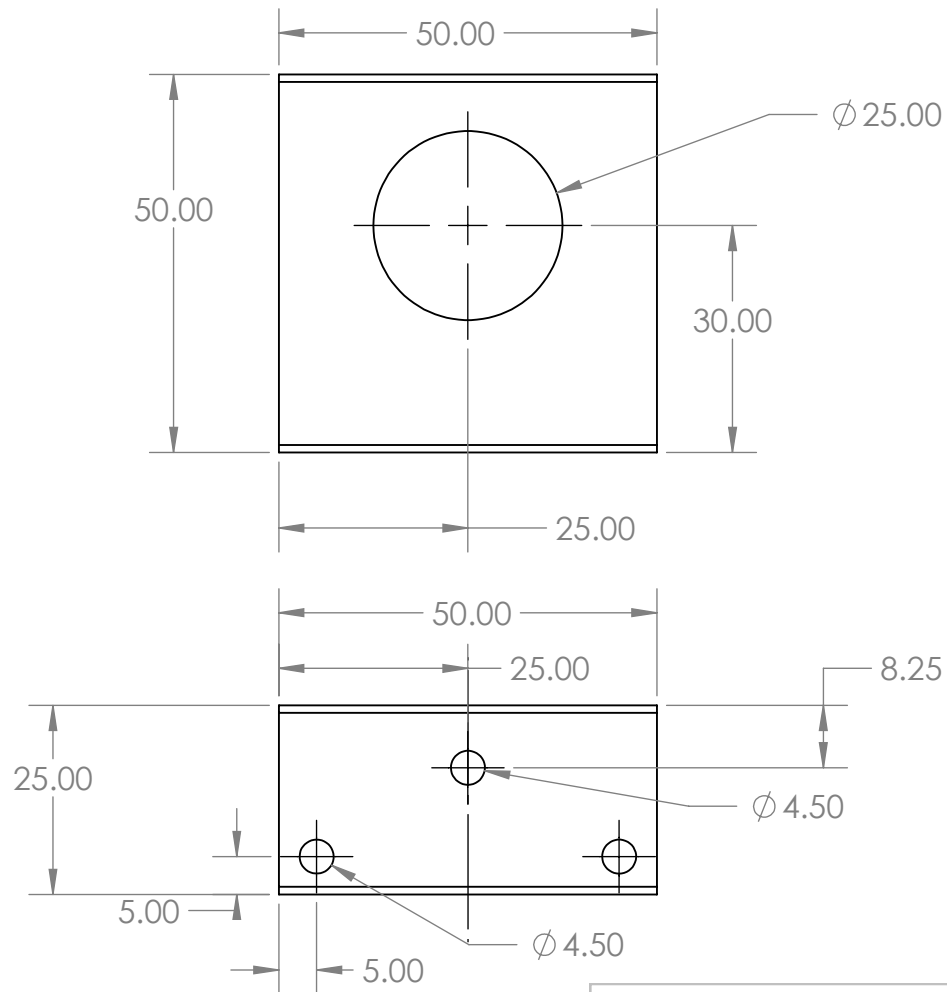
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: ACOUPLE SUPERIOR DEL DRO

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

DIBUJADO: E.W.S.P.



NOTAS:

(1) Acabado superficial: Pintura esmalte negro brillante, espesor 40–60 μm , aplicado en todas las superficies externas, salvo indicación contraria.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:1

FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 12



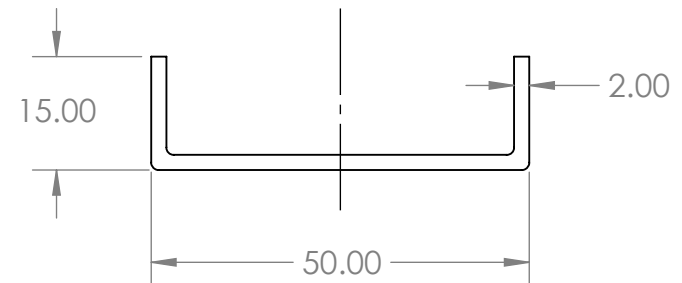
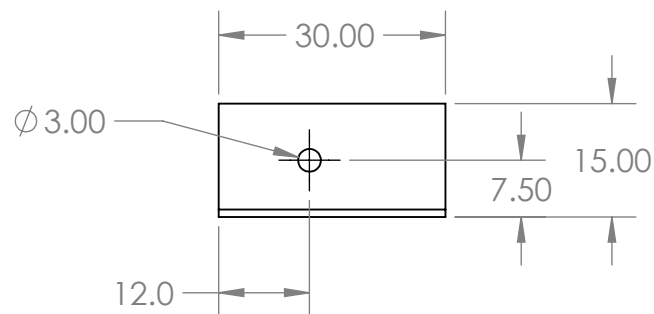
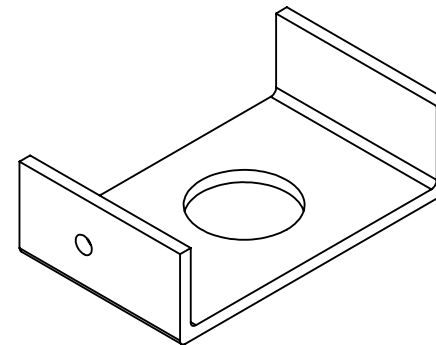
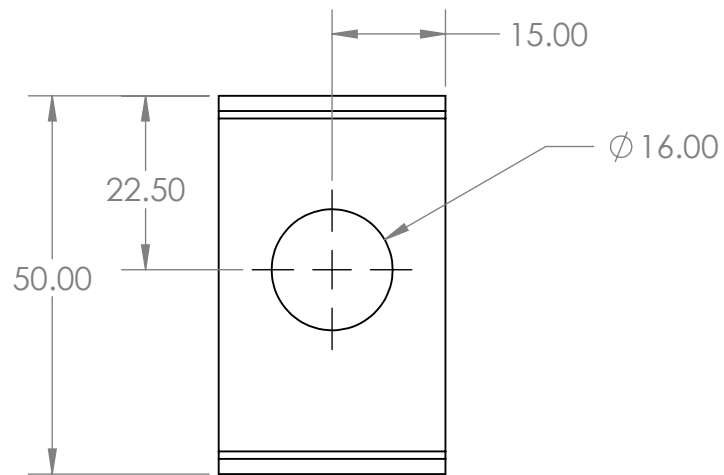
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: ACOUPLE INFERIOR DEL DRO

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

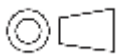
REVISADO: E.W.S.P.



NOTAS:

(1) Acabado superficial: Pintura esmalte negro brillante, espesor 40–60 μm , aplicado en todas las superficies externas, salvo indicación contraria.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:1

FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 01

HOJA: 13



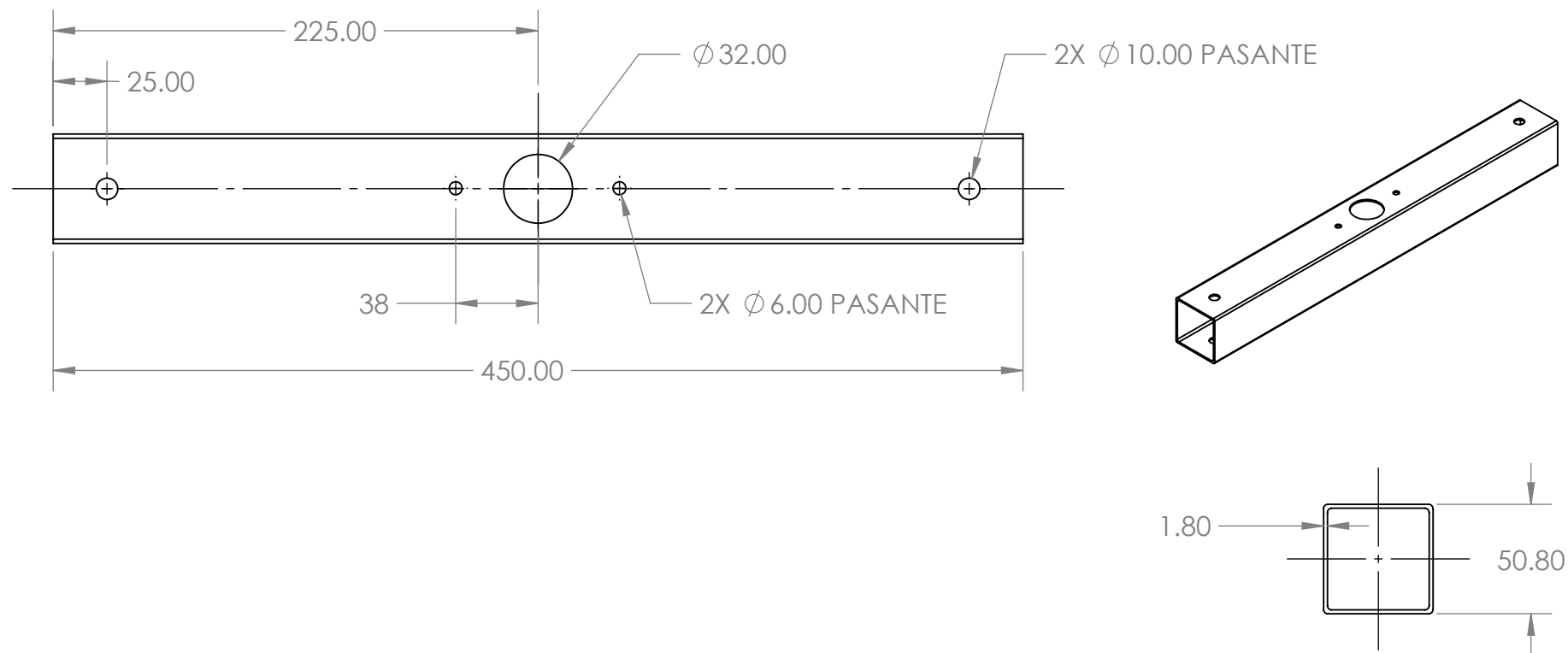
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: ACOPLER DEL BRAZO DESLIZANTE

MATERIAL: ASTM A36

DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

REVISADO: E.W.S.P.



NOTAS:

- (1) Acabado superficial: Pintura esmalte negro brillante, espesor 40 - 60 μm , aplicado en todas las superficies externas salvo indicación contraria
 (2) Tubo Cuadrado 50x50x1.8 mm

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:3

FECHA: 10/12/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A4

CANTIDAD: 02

HOJA: 14



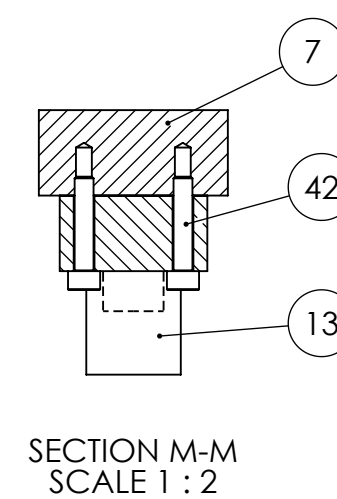
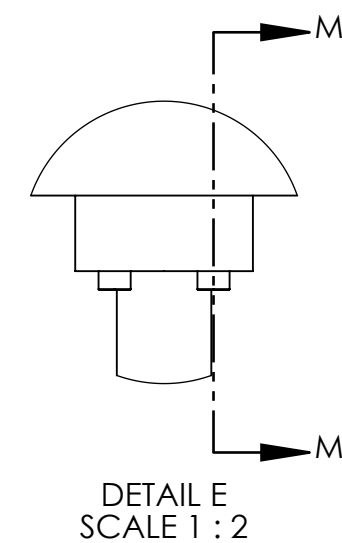
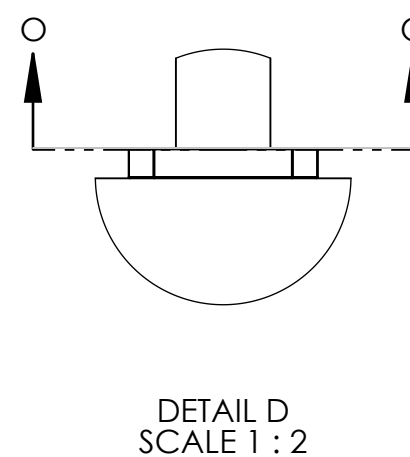
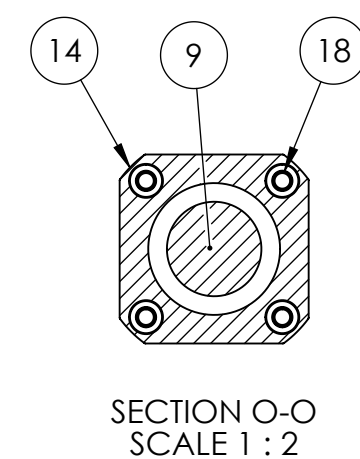
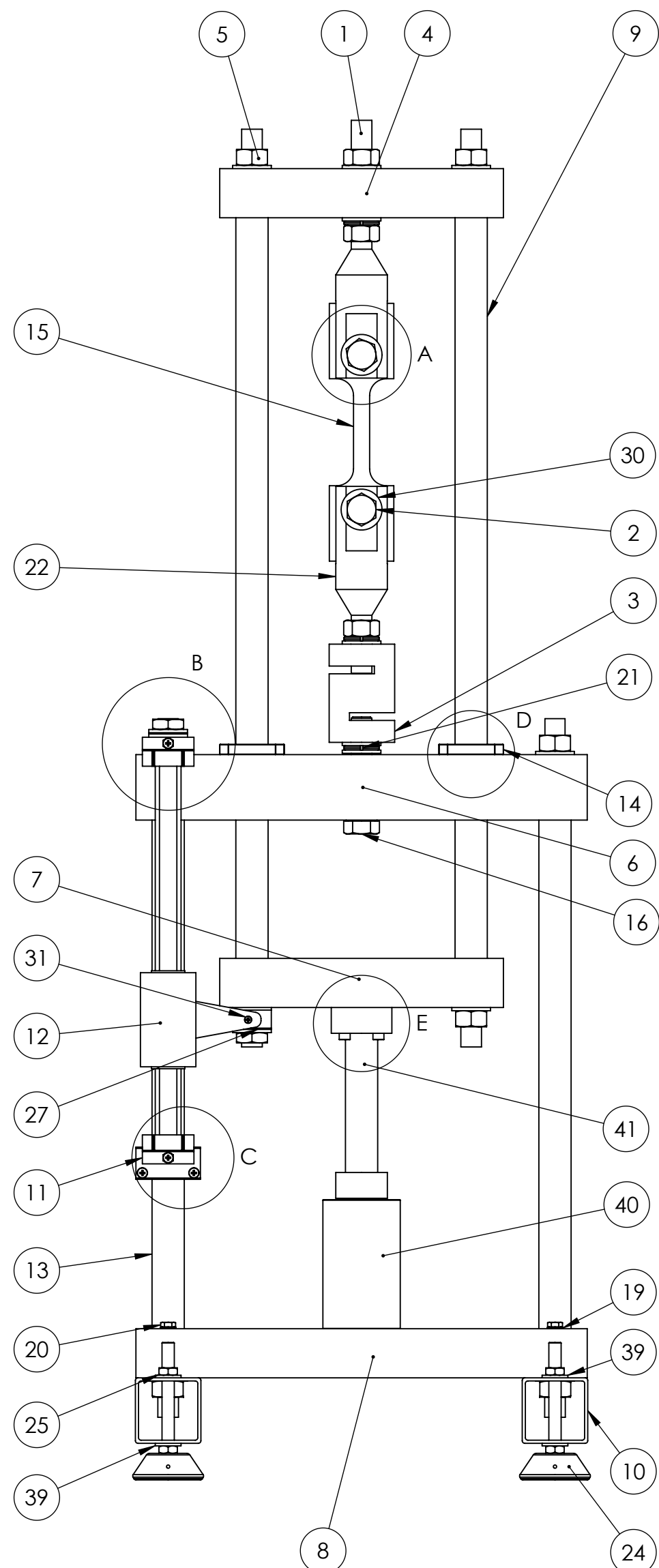
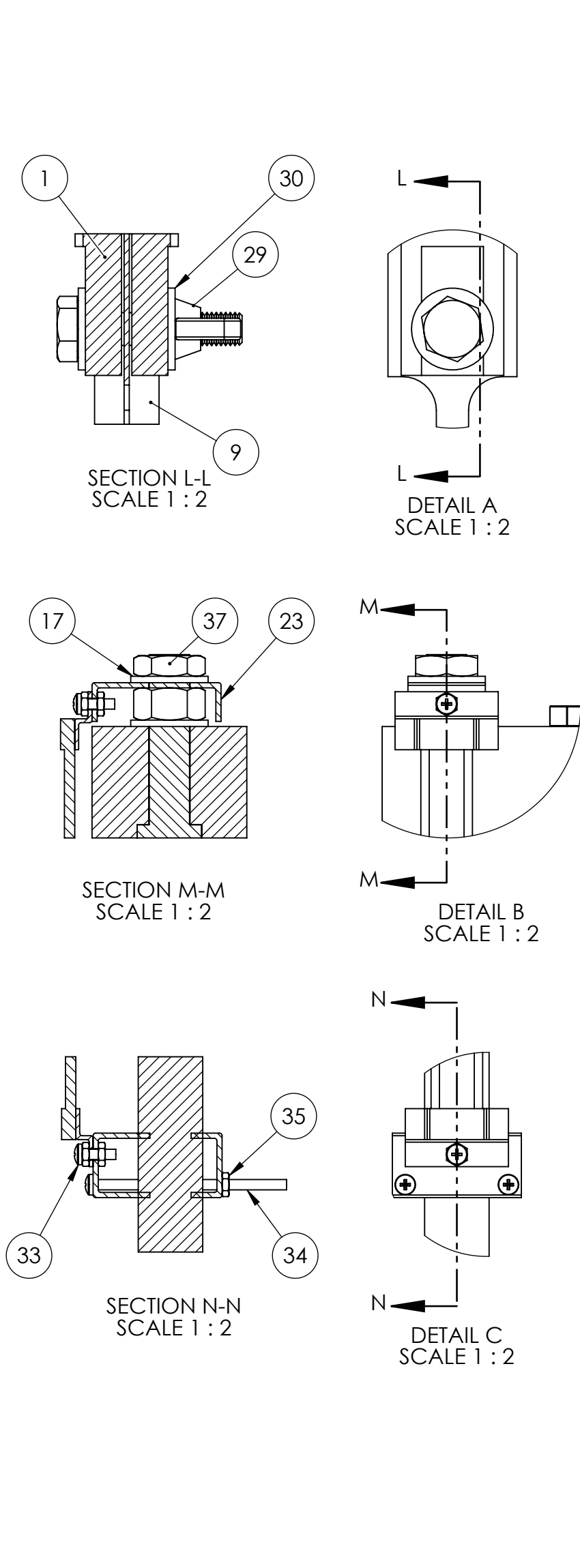
PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

TÍTULO: BASTIDOR

DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

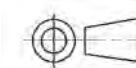
MATERIAL: ASTM A36

REVISADO E.W.S.P.



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Sujetador de Probeta Superior	1
2	Perno 0.5 in - 13 x 2.5	2
3	Sensor de Fuerza Tipo	1
4	Placa D	1
5	Tuerca Hexagonal M16	11
6	Placa C	1
7	Placa B	1
8	Placa A	1
9	Barra Movil C & D	2
10	Tubo cuadrado 50x50x1.5 mm	2
11	Sensor de Desplazamiento DRO	1
12	Deslizador	1
13	Barra Fija A & B	2
14	Rodamiento Lineal LMK25	2
15	Probeta	1
16	Perno M16 x 2.0 x 80	1
17	Arandela Plana M16	15
18	Tornillo Allen M5 x 12	8
19	Arandela Plana M6	8
20	Perno M6 x 2 x 100	4
21	Arandela de Presión M16	3
22	Sujetador de Probeta Inferior	1
23	Acople superior del DRO	1
24	Pata Niveladora 50*10*60	4
25	Tuerca Hexagonal M10	8
26	Brazo Deslizador	1
27	Acople del brazo deslizante	1
28	Acople inferior del DRO	1
29	Tuerca Mariposa 0.5 in - 13 UNC	2
30	Arandela 0.5 in	4
31	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	1
32	Tornillo M3 x 0.5 x 5	2
33	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	2
34	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	2
35	Tuerca Hexagonal M5 x 0.8	6
36	Tuerca Hexagonal M5 x 0.8	1
37	Tuerca Hexagonal Baja M16 x 2	2
38	Tuerca Hexagonal M6 x 1	4
39	Arandela M10	8
40	Cilindro_Hidraulico	1
41	Acople_HC	1
42	Tornillo Allen M5 x 25 mm	4

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD
DEL CUSCO**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:4

FECHA: 12/19/25



PROYECTO: DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL ACERO ASTM A36 BAJO UNA CARGA DE TRACCIÓN MEDIANTE EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A2

TÍTULO: Ensamblaje MEET

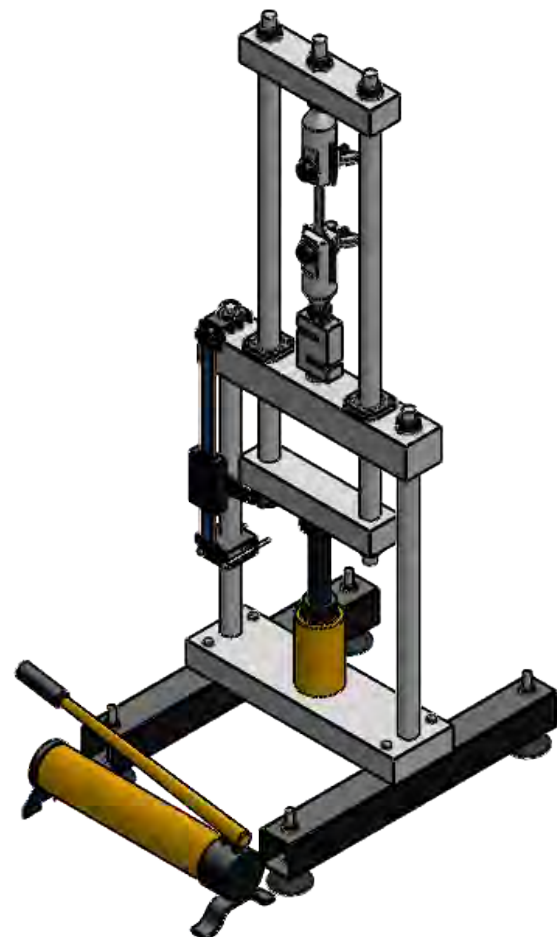
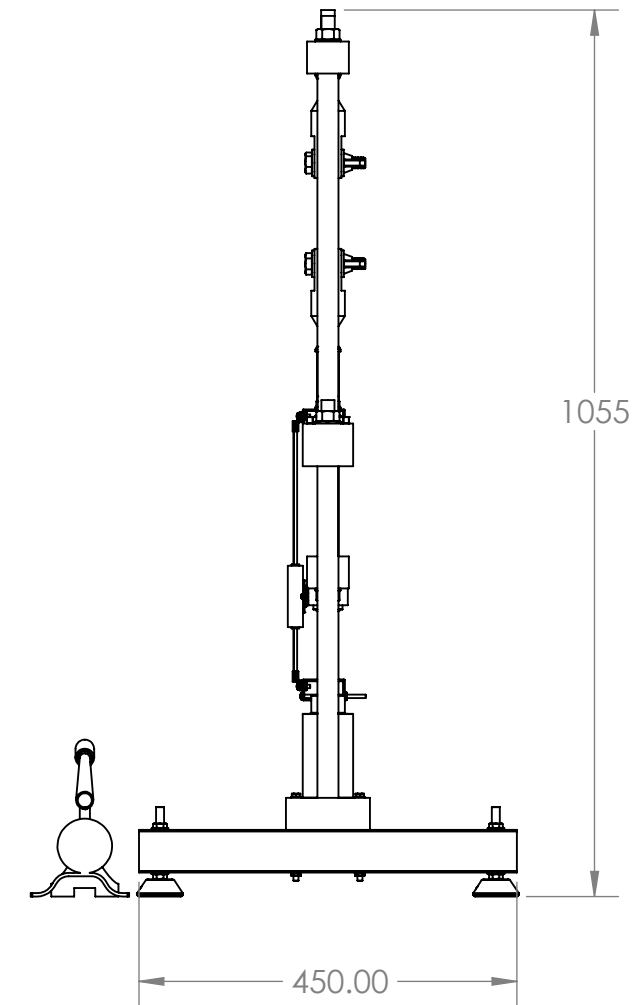
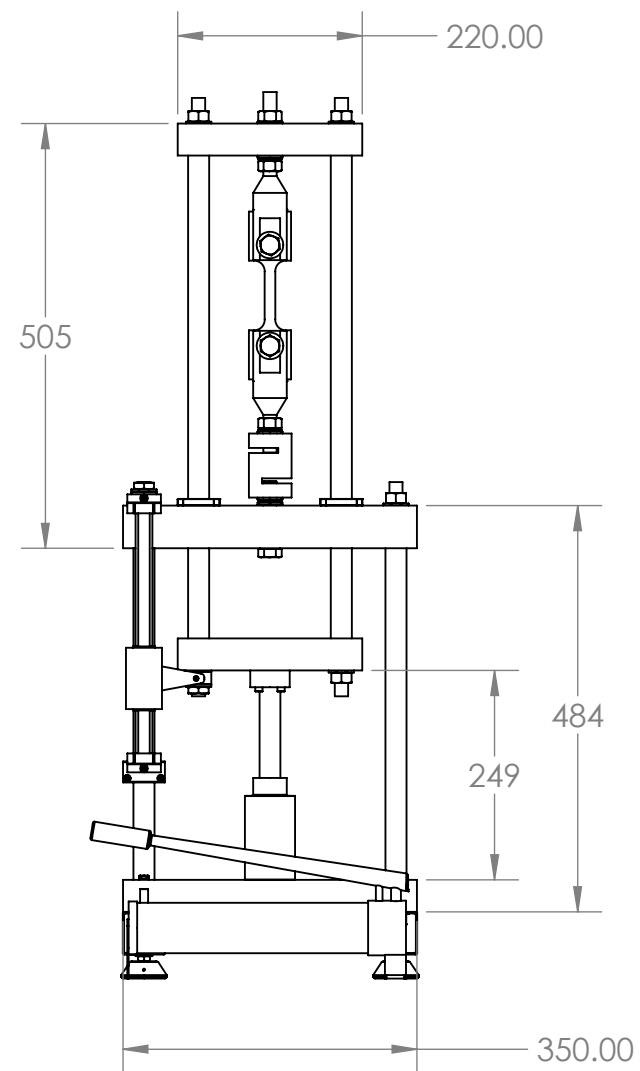
DIBUJADO: J.D.A.V. - J.C.A.V.

CANTIDAD: 1

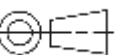
MATERIAL: -

REVISADO: E.W.S.P.

HOJA: 15



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:9

FECHA:12/19/25

UNIDADES: mm

TAMAÑO: A3

CANTIDAD: 01

HOJA: 16



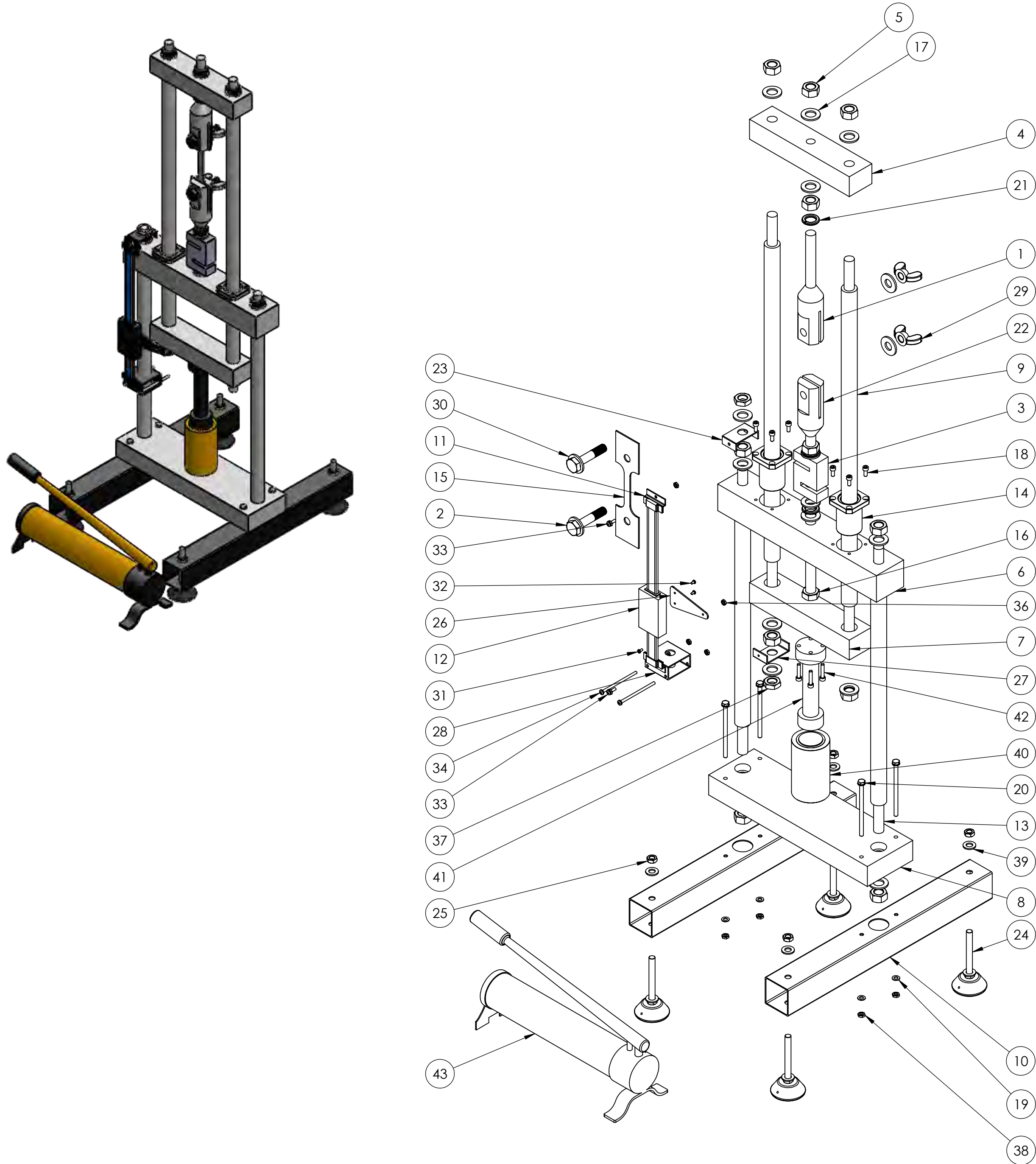
PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN CON UNA CAPACIDAD DE 20 KN

TÍTULO: MEET - ENSAMBLE GENERAL

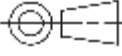
DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.

MATERIAL: -

REVISADO: E.W.S.P.



NO ITEM.	NÚMERO DE PARTE	CANT.
1	Sujetador de Probeta Superior	1
2	Perno 0.5 in - 13 x 2.5	2
3	Sensor de Fuerza Tipo S	1
4	Placa D	1
5	Tuerca Hexagonal M16	11
6	Placa C	1
7	Placa B	1
8	Placa A	1
9	Barra Movil C & D	2
10	Tubo cuadrado 50x50x1.8 mm	2
11	Sensor de Desplazamiento DRO	1
12	Deslizador	1
13	Barra Fija A & B	2
14	Rodamiento Lineal LMK25	2
15	Probeta	1
16	Perno M16 x 2.0 x 80	1
17	Arandela Plana M16	15
18	Tornillo Allen M5 x 12	8
19	Arandela Plana M6	8
20	Perno M6 x 2 x 100	4
21	Arandela de Presión M16	3
22	Sujetador de Probeta Inferior	1
23	Acople superior del DRO	1
24	Pata Niveladora 50*10*60	4
25	Tuerca Hexagonal M10	8
26	Brazo Deslizador	1
27	Acople del brazo deslizante	1
28	Acople inferior del DRO	1
29	Tuerca Mariposa 0.5 in - 13 UNC	2
30	Arandela 0.5 in	4
31	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	1
32	Tornillo M3 x 0.5 x 5	2
33	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	2
34	Tornillo stovebolt 5/32 x 2 1/2 in	2
35	Tuerca Hexagonal M5 x 0.8	6
36	Tuerca Hexagonal M5 x 0.8	1
37	Tuerca Hexagonal Baja M16 x 2	2
38	Tuerca Hexagonal M6 x 1	4
39	Arandela M10	8
40	Cilindro Hidraulico RSC - 1050	1
41	Acople HC	1
42	Tornillo Allen M5 x 25 mm	4
43	Bomba hidraúlica manual CP - 180	1

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO		
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA		ESCALA: 1:4
		FECHA: 12/19/25
	PROYECTO: DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MÓDULO EDUCATIVO PARA REALIZAR ENSAYOS DE TRACCIÓN CON UNA CAPACIDAD DE 20 KN	UNIDADES: mm
	TÍTULO: MEET - ENSAMBLE EXPLOSIONADO	TAMAÑO: A2
	DIBUJADO: J.D.A.V. Y J.C.A.V.	CANTIDAD: 01
	MATERIAL: -	HOJA: 17
	REVISADO: E.W.S.P.	