Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales

Escuela Profesional de Ingenieria Mecanica, Mecanica-Electrica y Mecatronica

Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas

Tesis presentada por:

Carpio Mercado, Eduardo

ORCID: 0009-0009-5409-2135

Herrera Carrera, Jorge Andre

ORCID: 0009-0003-0553-0326

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor (a):

Dr. Alcázar Rojas, Hermann Enrique

ORCID: 0000-0002-7651-9269

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 24 de Enero del 2026

Dictamen: 014764-C-EPIMMEM-2026

Visto el borrador del expediente 014764, presentado por:

2015120021 - HERRERA CARRERA JORGE ANDRE
2015100361 - CARPIO MERCADO EDUARDO

Titulado:

DISEÑO Y FABRICACION DE UN MODULO EDUCATIVO PARA PRUEBAS DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECÁNICO

29479140 - VALENCIA SALAS MARIO JOSE
DICTAMINADOR

21535915 - DONAYRE CAHUA JESUS MANUEL
DICTAMINADOR

29685318 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS
DICTAMINADOR

DISEÑO Y FABRICACION DE UN MODULO EDUCATIVO PARA PRUEBAS DE PANDEO EN BARRAS E

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%	2%	0%	2%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María	Trabajo del estudiante
2	tesis.ucsm.edu.pe	Fuente de Internet
3	www.campustudionline.com	Fuente de Internet

Excluir citas	Apagado	Excluir coincidencias	< 1%
Excluir bibliografía	Apagado		

DEDICATORIA

Este trabajo se dedica con profundo respeto y gratitud a nuestras familias, quienes, con su apoyo incondicional, paciencia y confianza, nos acompañaron en cada etapa de este camino académico. A nuestros padres, por su esfuerzo silencioso y su ejemplo permanente de perseverancia; a nuestros hermanos, por estar presentes incluso en los momentos más difíciles; y a todos aquellos que, con una palabra de ánimo o un gesto de aliento, hicieron posible que este proyecto se concrete. Cada logro alcanzado es también suyo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindar fortaleza, claridad y constancia para culminar esta investigación.

Al Dr. Alcázar Rojas, Hermann Enrique, asesor del proyecto, por su guía académica, rigor técnico y permanente disposición durante el desarrollo del trabajo.

A los docentes y personal administrativo que, directa o indirectamente, contribuyeron al avance de esta tesis.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito diseñar, fabricar y validar experimentalmente un módulo educativo para ensayos de pandeo en barras esbeltas, concebido para reproducir de manera controlada el fenómeno de pérdida de estabilidad bajo carga axial de compresión. El proceso inicia con el desarrollo del diseño conceptual y la definición del marco normativo aplicable, seguido por la ingeniería básica y de detalle que permite dimensionar los componentes principales del módulo: soporte base, columnas principales, puente de columnas principales, puente guía para cubo superior, puente porta tornillo, tornillo de avance, adaptador para cubo inferior, cubos de apoyo empotrado y cubos de apoyo articulado. Todos estos elementos son fabricados mediante mecanizado convencional utilizando acero estructural ASTM A36 Grado A36, garantizando rigidez, alineamiento y precisión geométrica. La validación experimental se realiza con 12 tipos de probetas metálicas de acero ASTM A36, cada una ensayada en tres repeticiones bajo configuraciones de apoyo empotrado–empotrado, empotrado–articulado y articulado–articulado. Se emplea un dinamómetro analógico de 2500 N para registrar la carga crítica de pandeo. Los resultados evidencian una variabilidad controlada, con coeficientes de variación generalmente inferiores al 10 %, lo que asegura la repetibilidad conforme al ASTM Manual 7 (MNL7-E13). Asimismo, la comparación entre los valores teóricos calculados mediante la ecuación de Euler con factores de longitud efectiva ideales y recomendados por la AISC 360-22 y los valores experimentales muestra que las configuraciones de apoyo articuladas presentan mayor correspondencia, mientras que la condición de apoyo empotrado–empotrado evidencia discrepancias asociadas a la rigidez rotacional. Los hallazgos confirman que el módulo educativo diseñado y fabricado reproduce de manera confiable el comportamiento real del pandeo en barras esbeltas, convirtiéndose en una herramienta sólida y precisa para la enseñanza práctica de este fenómeno.

Palabras Clave: Pandeo, carga crítica, módulo educativo.

ABSTRACT

This work aims to design, manufacture, and experimentally validate an educational module for buckling tests in slender bars, conceived to reproduce in a controlled manner the loss of stability under axial compression. The process begins with the development of the conceptual design and the definition of the applicable regulatory framework, followed by the basic and detailed engineering that allows proper dimensioning of the module's main components: base support, main columns, main column bridge, upper guide bridge for the support cube, screw-support bridge, lead screw, lower cube adapter, fixed-end support cubes, and pinned-end support cubes. All these components are manufactured through conventional machining using ASTM A36 Grade A36 structural steel, ensuring rigidity, alignment, and geometric precision. Experimental validation is performed using 12 types of metallic specimens made of ASTM A36 steel, each tested in three repetitions under fixed–fixed, fixed–pinned, and pinned–pinned support configurations. A 2500 N analog dynamometer is used to record the critical buckling load. The results show controlled variability, with coefficients of variation generally below 10 %, ensuring repeatability in accordance with ASTM Manual 7 (MNL7-E13). Likewise, the comparison between theoretical values calculated using Euler's equation with ideal effective length factors and those recommended by AISC 360-22 and the experimental measurements shows that articulated configurations exhibit greater correspondence, whereas the fixed–fixed condition presents discrepancies associated with rotational stiffness. The findings confirm that the educational module designed and manufactured reliably reproduces the real behavior of buckling in slender bars, becoming a robust and precise tool for the practical teaching of this phenomenon.

Keywords: Buckling, critical load, educational module.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO **4**

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 4

1.2. OBJETIVOS 5

1.2.1. Objetivo general 5

1.2.2. Objetivos específicos 5

1.3. JUSTIFICACIÓN 5

1.3.1. Justificación teórica 5

1.3.2. Justificación académica 6

1.3.3. Justificación institucional 6

1.3.4. Justificación técnica 6

1.4. ALCANCES 7

1.5. LIMITACIONES 7

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO **10**

2.1. COMPORTAMIENTO DE MATERIALES BAJO CARGA AXIAL 10

2.1.1. Carga axial: definición y efectos 10

2.1.2. Límite elástico y deformación plástica 11

2.1.3. Criterio de Von Mises 13

2.2. FUNDAMENTOS DE PANDEO 14

2.2.1. Definición y características del pandeo 14

2.2.2. Relevancia en estructuras esbeltas 15

2.2.3. Aplicaciones prácticas del ensayo de pandeo 16

2.2.4. Fundamento matemático del modelo de Euler 17

2.2.5. Supuestos del modelo y limitaciones 18

2.2.6. Propiedades geométricas de la sección circular maciza 19

2.2.7. Propiedades geométricas de una sección rectangular 20
2.2.8. Capacidad crítica de pandeo – Fórmula de Johnson 22
2.2.9. Carga crítica de pandeo – Método de Johnson 22
2.2.10. Factor de seguridad frente a pandeo 23
2.2.11. Condiciones de frontera y longitud efectiva 24
2.2.12. Pandeo de Euler 26
2.3. NORMATIVA TÉCNICA APLICADA 28
2.3.1. Norma ASTM E9-19: fundamentos y alcance 28
2.3.2. Complementariedad con la norma AISC 360 28
2.3.3. Norma ISO/IEC 17025:2017 30
2.3.4. ASTM Manual 7 – MNL7-E13 31
2.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL TORNILLO DE AVANCE 31
2.4.1. Geometría de roscas ISO y parámetros 31
2.4.2. Criterio de autobloqueo 33
2.4.3. Par de accionamiento y fricción helicoidal 33
2.4.4. Esfuerzo cortante por torsión 34
2.4.5. Esfuerzo equivalente de Von Mises 35
2.4.6. Área resistente de la rosca 36
2.4.7. Palanca de operación y torque manual 37
2.4.8. Reparto de carga entre hilos 38
2.5. ELEMENTOS CRÍTICOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL 38
2.5.1. Probetas: características geométricas y normativas 38
2.5.2. Dinamómetro: función y selección 40
2.5.3. Registro de datos: carga y modo de falla 40
2.6. ESTADO DEL ARTE DE MÓDULOS EDUCATIVOS DE PANDEO 41
2.7. METODOLOGÍA DE DISEÑO 45
CAPÍTULO III
3. DISEÑO CONCEPTUAL 50
3.1. FUNCIONES Y REQUERIMIENTOS DE LA MÁQUINA 50
3.1.1. Sujeción y configuración de apoyos 51
3.1.2. Ajuste de la longitud útil 51
3.1.3. Admisión y preparación de probetas 51
3.1.4. Aplicación de carga axial controlada 51
3.1.5. Medición de carga 51

3.1.6. Alineación y centrado de la carga 52
3.1.7. Seguridad operativa 52
3.1.8. Reconfiguración rápida 52
3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO 52
3.2.1. Alternativas de diseño conceptual del módulo educativo de pandeo 52
3.2.2. Aplicación de carga axial 55
3.2.3. Medición de fuerza 56
3.2.4. Configuración y fijación de probetas 57
3.2.5. Base estructural y guías 58
3.2.6. Criterios de modelado estructural y simplificaciones adoptadas 58
3.2.7. Alcances del análisis estructural del sistema de carga 59
3.2.8. Alternativas seleccionadas en los subsistemas del diseño 60
3.3. BOSQUEJO PRELIMINAR DEL MÓDULO EDUCATIVO PARA ENSAYOS DE PANDEO 60
CAPÍTULO IV
4. DISEÑO 63
4.1. CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO 63
4.1.1. Marco normativo aplicable 63
4.1.2. Alcances y limitaciones del diseño básico 64
4.1.3. Lineamientos generales de seguridad y sobre resistencia 65
4.2. DEFINICIÓN DE MATERIALES Y GEOMETRÍA 66
4.2.1. Selección del material estructural 66
4.2.2. Geometría propuesta de los componentes principales 69
4.3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES 83
4.3.1. Criterio de Von Mises como parámetro de diseño 83
4.3.2. Esfuerzo axial en columnas principales 84
4.3.3. Análisis de pandeo en columnas principales 85
4.3.4. Comportamiento del puente porta tornillo y guía roscada ante el pandeo súbito de la probeta 87
4.4. PLAN DE MEJORA Y ETAPA DE INGENIERÍA DE DETALLE 88
4.4.1. Iteraciones proyectivas de análisis FEA en Inventor 88
4.4.2. Síntesis comparativa y decisión de diseño 100
4.5. DIMENSIONES PRINCIPALES PROPUESTAS 105
4.5.1. Resumen de dimensiones para elaboración de planos 105

4.5.2. Descripción técnica del módulo educativo de pandeo 114
4.5.3. Acabado superficial y protección de los componentes del módulo 116
4.6. PLANOS DE CONJUNTO, MONTAJE Y DESPIECE 117
CAPÍTULO V
5. COSTOS Y RESULTADOS 120
5.1. FABRICACIÓN 120
5.2. COSTOS 121
5.2.1. Costos directos 121
5.2.2. Costos Indirectos 123
5.2.3. Costo total del módulo educativo de pandeo 124
5.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS Y CONDICIONES DE ENSAYO 124
5.4. PROCESO DE ENSAMBLAJE DEL MÓDULO EDUCATIVO DE PANDEO 127
5.5. CÁLCULO TEÓRICO DE LA CARGA CRÍTICA DE PANDEO 128
5.6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CARGA CRÍTICA DE PANDEO 133
5.7. ANÁLISIS DE VARIACIÓN ENTRE REPETICIONES EXPERIMENTALES ... 140
5.8. COMPARACIÓN ENTRE VALORES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES 141
5.9. GUÍA DE LABORATORIO PARA EL USO DEL MÓDULO EDUCATIVO DE PANDEO 143
CONCLUSIONES 145
RECOMENDACIONES 147
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Representación del momento interno inducido por la carga axial en una columna esbelta 18

Figura 2.2 Configuración de columnas con diferentes condiciones de apoyo y sus valores de longitud efectiva *K*. 24

Figura 2.3 Variación del factor de longitud efectiva *K* en función del parámetro *RΔ* para distintos valores de δ_2 25

Figura 2.4 Comportamiento de una barra con apoyos fijos sometida a carga crítica de pandeo 27

Figura 2.5 Modos de pandeo en probetas según el tipo de deformación predominante 39

Figura 2.6 Máquina de ensayos universales de tipo dual-column-floor-standing 43

Figura 2.7 Máquina de ensayo diseñada por Cóndor y Quispe 44

Figura 3.1 Modelo conceptual de la alternativa mecánica del módulo educativo para ensayos de pandeo 53

Figura 3.2 Modelo conceptual de la alternativa hidráulica del módulo educativo para ensayos de pandeo 54

Figura 3.3 Modelo conceptual de la alternativa neumática del módulo educativo para ensayos de pandeo 55

Figura 3.4 Modelo conceptual preliminar del módulo educativo para ensayos de pandeo .. 61

Figura 4.1 Bosquejo de columna principal 70

Figura 4.2 Bosquejo de soporte base 70

Figura 4.3 Bosquejo del puente de columnas principales 71

Figura 4.4 Bosquejo del puente porta tornillo 72

Figura 4.5 Bosquejo del tornillo de avance 83

Figura 4.6 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la primera iteración 89

Figura 4.7 Aplicación de cargas en el módulo para la primera iteración 90

Figura 4.8 Resultado del análisis de esfuerzos para la primera iteración 91

Figura 4.9 Resultado FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la primera iteración 91

Figura 4.10 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la segunda iteración 93

Figura 4.11 Aplicación de cargas en el módulo para la segunda iteración 94

Figura 4.12 Resultado del análisis de esfuerzos para la segunda iteración 95

Figura 4.13 Resultado del FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la segunda iteración 95

Figura 4.14 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la tercera iteración 97
Figura 4.15 Aplicación de cargas en el módulo para la tercera iteración 98
Figura 4.16 Resultado del análisis de esfuerzos para la tercera iteración 99
Figura 4.17 Resultado FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la tercera iteración 100
Figura 4.18 Esquema constructivo del soporte base propuesto 105
Figura 4.19 Esquema constructivo de la columna principal propuesta 106
Figura 4.20 Esquema constructivo del inserto cilíndrico propuesto 107
Figura 4.21 Esquema constructivo del puente de columnas principales propuesto 107
Figura 4.22 Esquema constructivo del puente guía para cubo superior propuesto 108
Figura 4.23 Esquema constructivo del puente porta tornillo propuesto 109
Figura 4.24 Esquema constructivo del tornillo de avance propuesto 109
Figura 4.25 Esquema constructivo de la base superior del tornillo propuesto 110
Figura 4.26 Esquema constructivo de la palanca propuesta 110
Figura 4.27 Esquema constructivo de la base inferior de tornillo propuesto 111
Figura 4.28 Esquema constructivo del adaptador para cubo inferior propuesto 112
Figura 4.29 Esquema constructivo del cubo inferior con mordaza propuesta 112
Figura 4.30 Esquema constructivo del cubo superior con mordaza propuesto 113
Figura 4.31 Esquema constructivo del cubo superior e inferior de apoyo articulado propuesto 114
Figura 4.32 Medidas generales del módulo educativo de pandeo 115
Figura 5.1 Fabricación del puente guía del cubo superior 120
Figura 5.2 Componentes del puente guía del cubo superior 121
Figura 5.3 Extremo de la probeta en el cubo de apoyo empotrado 126
Figura 5.4 Extremo de la probeta en el cubo de apoyo articulado 127
Figura 5.5 Probetas para ensayo de pandeo de acero estructural ASTM A36 – Grado A36 133
Figura 5.6 Extremos de contacto de probetas para ensayo de pandeo según la condición de apoyo 134
Figura 5.7 Encaje y alineamiento de las probetas en los cubos de apoyo empotrado 135
Figura 5.8 Encaje y alineamiento de las probetas en los cubos de apoyo articulado 136
Figura 5.9 Deformación característica de las probetas durante el ensayo de pandeo según las condiciones de apoyo 140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Ponderación de alternativas para aplicación de carga axial 56
Tabla 3.2 Ponderación de alternativas para medición de fuerza 57
Tabla 3.3 Ponderación de alternativas para configuración y fijación de probetas 57
Tabla 3.4 Alternativas seleccionadas por subsistema..... 60
Tabla 4.1 Comparación de materiales estructurales propuestos..... 67
Tabla 4.2 Datos de diseño y propiedades del tornillo de avance..... 73
Tabla 4.3 Geometría y parámetros de la rosca M24 para distintos pasos 76
Tabla 4.4 Par de operación estimado para distintos pasos de rosca M24..... 77
Tabla 4.5 Par de operación y esfuerzo manual estimado para distintos pasos de rosca M24 77
Tabla 4.6 Resistencia del vástago..... 78
Tabla 4.7 Número de hilos en contacto para distintos pasos de rosca M24 79
Tabla 4.8 Comparación cuantitativa de las iteraciones 101
Tabla 4.9 Ponderación cualitativa (uso, fabricación y operación) 103
Tabla 5.1 Costos directos de materiales 122
Tabla 5.2 Costos directos de estructura metálica del módulo 122
Tabla 5.3 Costos directos de fabricación..... 123
Tabla 5.4 Costo total del módulo educativo de pandeo..... 124
Tabla 5.5 Características geométricas de las probetas de acero ASTM A36 – Grado A36 125
Tabla 5.6 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Empotrado-Empotrado 130
Tabla 5.7 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Empotrado-Articulado..... 131
Tabla 5.8 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Articulado-Articulado 132
Tabla 5.9 Resultados experimentales de carga crítica de pandeo (N) 138
Tabla 5.10 Comparación porcentual entre valores teóricos y experimentales según tipo de apoyo 142

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Planos de conjunto y despiece del Módulo Educativo de Pandeo 154

Anexo B: Tabla consolidada de probetas, dimensiones, repeticiones y carga crítica experimental 171

Anexo C: Guía de laboratorio para el uso del módulo educativo de pandeo 174

Anexo D: Panel fotográfico del ensamblaje y prueba de funcionamiento del módulo educativo de pandeo 184

Abreviaturas y listas de símbolos

Abreviaturas

AISC	American Institute of Steel Construction
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Diseño Asistito por Computadora (Computer-Aided Design)
EPIMMEM	Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica
FEA	Análisis por Elementos Finitos (Finite Element Analysis)
mm	Milímetro

Lista de símbolos

A	Área de la sección transversal	[mm²]
E	Módulo de elasticidad del material	[MPa] o [N/mm²]
F o P	Carga axial aplicada	[N]
Pcr	Carga crítica de pandeo (fórmula de Euler)	[N]
I	Momento de inercia de la sección	[mm⁴]
L	Longitud efectiva de la barra	[mm]
r	Radio de giro de la sección	[mm]
λ	Relación de esbeltez	[adimensional]
σ	Esfuerzo axial	[MPa]
δ	Desplazamiento lateral	[mm]
FS	Factor de seguridad	[adimensional]
g	Aceleración de la gravedad	[m/s²]
v	Coeficiente de Poisson	[adimensional]
ρ	Densidad del material	[kg/m³]
M	Número de Mach (para caracterización del tipo de flujo)	[adimensional]

INTRODUCCIÓN

La formación de ingenieros con competencias sólidas en análisis estructural requiere, hoy más que nunca, de entornos académicos que integren no solo la teoría, sino también la experimentación aplicada bajo criterios técnicos normados. En especial, el estudio del pandeo en elementos esbeltos, fenómeno crítico en el diseño de estructuras resistentes a compresión, exige herramientas pedagógicas que permitan observar de manera controlada los efectos de la inestabilidad estructural. Sin embargo, en la mayoría de las instituciones universitarias peruanas, esta experiencia de aprendizaje se ve limitada por la ausencia de módulos didácticos específicos que simulen fielmente las condiciones de carga axial que inducen dicho comportamiento.

En este contexto, la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María, mediante sus esfuerzos por fortalecer el vínculo entre enseñanza y aplicación práctica, ha identificado la necesidad de contar con un dispositivo educativo que permita a sus estudiantes explorar el comportamiento mecánico de barras esbeltas sometidas a compresión axial, contrastando los resultados experimentales con los modelos teóricos vigentes. Para ello, resulta indispensable desarrollar un módulo de ensayos que se fundamente en estándares internacionales, como la norma ASTM E9-19, y que permita replicar de forma confiable el fenómeno de pandeo elástico en condiciones controladas.

Así, el presente trabajo se enmarca en la proyección académica e investigativa de la UCSM, al proponer el diseño y la fabricación de un módulo educativo orientado a la observación, medición y análisis del pandeo estructural, como parte esencial de la enseñanza en resistencia de materiales. Esta iniciativa no solo responde a la necesidad institucional de fortalecer sus laboratorios con equipos funcionales y normados, sino que también contribuye a cerrar una brecha técnica en la formación de futuros ingenieros, quienes requieren

experiencias experimentales que complementen su comprensión teórica del comportamiento estructural de los materiales.

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO

1. MARCO METODOLÓGICO

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El pandeo es un fenómeno físico que ocurre cuando elementos estructurales esbeltos, sometidos a cargas axiales de compresión, experimentan inestabilidad lateral antes de alcanzar el límite de resistencia del material. Este tipo de falla es común en estructuras mecánicas y civiles, por lo que su análisis resulta esencial en el diseño de componentes que aseguren estabilidad, funcionalidad y seguridad. Sin embargo, en muchos entornos académicos, el estudio del pandeo se limita a enfoques teóricos, sin ofrecer a los estudiantes la oportunidad de observar su comportamiento real bajo condiciones controladas ni validar empíricamente los modelos estructurales que explican este fenómeno.

Actualmente, el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica (EPIMMEM) de la Universidad Católica de Santa María no cuenta con un equipo didáctico que permita la realización de ensayos de pandeo. Esta limitación afecta el desarrollo de competencias prácticas en los estudiantes, quienes no disponen de medios para experimentar con distintas condiciones de carga, longitudes efectivas o configuraciones de apoyos. Aunque en el mercado existen módulos educativos como los fabricados por la empresa alemana GUNT, estos presentan costos elevados y no trabajan bajo ninguna norma técnica estandarizada. Su funcionamiento se basa exclusivamente en la aplicación de la fórmula de Euler, lo cual impide garantizar que los ensayos se realicen bajo condiciones repetibles ni que las probetas cumplan con parámetros técnicos definidos, afectando la confiabilidad y trazabilidad de los resultados obtenidos.

Además, se ha evidenciado que en los últimos años no se han desarrollado propuestas de tesis a nivel nacional que aborden el diseño de equipos específicamente orientados a ensayos de pandeo, lo que revela una brecha significativa en la formación experimental vinculada a la estabilidad estructural. Esta situación limita la integración de estándares reconocidos como la norma ASTM E9-19, la cual, si bien no estudia directamente el pandeo, establece parámetros esenciales para la correcta aplicación de carga axial, alineación de probetas y medición precisa de deformaciones, condiciones indispensables para observar el comportamiento estructural previo al colapso (ASTM International, 2019). Ante esta problemática, se hace evidente la necesidad de desarrollar una propuesta académica que

permita diseñar y fabricar un módulo educativo para ensayos de pandeo en barras esbeltas, que no solo cubra las limitaciones del entorno universitario, sino que además se sustente en normativas técnicas internacionales y fortalezca la formación práctica de futuros ingenieros en el análisis y prevención de fallas estructurales por inestabilidad.

Por lo tanto, considerando el escenario expuesto, se establece la necesidad de diseñar y fabricar un módulo educativo, conforme a la norma ASTM E9-19, que permita la realización de pruebas de pandeo en barras esbeltas bajo condiciones técnicas estandarizadas en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Diseñar y fabricar un módulo educativo para la realización de pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N.

1.2.2. Objetivos específicos

1) Analizar el fenómeno físico del pandeo en barras esbeltas, con énfasis en su comportamiento mecánico-estructural, como base para el desarrollo del módulo educativo.
2) Diseñar mecánicamente cada uno de los componentes que conformarán el módulo, asegurando su funcionalidad, precisión y operatividad bajo condiciones estandarizadas.
3) Elaborar los planos de detalle y los planos de ensamble del equipo, cumpliendo criterios técnicos que faciliten su fabricación e implementación.
4) Desarrollar una guía de laboratorio que oriente a los estudiantes en el uso adecuado del módulo y potencie su comprensión del fenómeno de pandeo mediante la experimentación.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1. Justificación teórica

Desde una perspectiva teórica, el estudio se basa en los fundamentos del comportamiento mecánico de elementos estructurales sometidos a compresión, en especial

bajo condiciones que inducen inestabilidad lateral, fenómeno conocido como pandeo. Se toma como base el modelo clásico de Euler para barras esbeltas, el cual establece una relación entre la carga crítica de pandeo y parámetros como la esbeltez, la longitud efectiva y las condiciones de apoyo. Este modelo constituye un referente clave en la teoría de estructuras, por lo que su validación experimental en laboratorio permite fortalecer su comprensión, identificar sus límites y analizar su aplicabilidad en condiciones reales. Así, el diseño del módulo permitirá conectar de manera directa los conceptos matemáticos con los resultados experimentales observables, favoreciendo la apropiación teórica del fenómeno desde un enfoque ingenieril.

1.3.2. Justificación académica

El presente estudio tiene una relevancia académica significativa al proponer un módulo educativo que permitirá a los estudiantes de ingeniería observar y analizar de forma práctica el fenómeno del pandeo estructural en barras esbeltas. En un entorno educativo donde predomina la enseñanza teórica, esta propuesta busca fomentar la experimentación activa, fortalecer el aprendizaje significativo y vincular los contenidos curriculares de resistencia de materiales con aplicaciones reales en laboratorio. Al proporcionar una herramienta concreta de exploración, se contribuye directamente al desarrollo de competencias profesionales clave, tales como la interpretación de resultados experimentales, la validación de modelos teóricos y la toma de decisiones fundamentadas en evidencia empírica.

1.3.3. Justificación institucional

A nivel institucional, el desarrollo de este proyecto representa una mejora tangible para el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica de Santa María. Actualmente, este espacio no cuenta con un módulo específico para la evaluación experimental del pandeo, lo que limita la posibilidad de realizar prácticas estructurales con estándares técnicos adecuados. El diseño y fabricación de un módulo propio permitirá ampliar la infraestructura disponible, potenciar el perfil práctico de los cursos de formación profesional y generar un recurso replicable para otras escuelas de ingeniería.

1.3.4. Justificación técnica

El componente técnico del presente estudio se sustenta en la necesidad de realizar ensayos de pandeo bajo condiciones controladas y replicables, siguiendo directrices

normativas reconocidas internacionalmente. Para ello, se toma como referencia la norma ASTM E9-19: Métodos de ensayo estándar de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente, la cual, si bien no evalúa directamente el pandeo, establece los criterios esenciales para la correcta aplicación de cargas axiales de compresión, condición necesaria para que dicho fenómeno se manifieste de forma controlada y medible. Esta norma garantiza aspectos como la alineación axial precisa de la carga, el diseño geométrico adecuado de las probetas, el control sobre la velocidad de carga y la calibración de instrumentos, asegurando así la validez de los resultados experimentales (ASTM International, 2019). Integrar esta normativa en el diseño del módulo refuerza la rigurosidad metodológica del proyecto, al mismo tiempo que eleva su valor didáctico y científico. Además, permite validar empíricamente el modelo de Euler, promoviendo el vínculo entre teoría y práctica, tal como es requerido en la formación de ingenieros. Además de tomar en consideración para los ensayos la norma AISC 360: Especificaciones para edificios de acero estructural, que se empleará como referencia técnica para la validación de condiciones de pandeo y el diseño de perfiles esbeltos.

1.4. ALCANCES

El Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica (EPIMMEM) cuenta con diversos equipos destinados a la evaluación de propiedades mecánicas de materiales; sin embargo, no dispone de un módulo específico para la realización de ensayos de pandeo en barras esbeltas. En ese contexto, el presente proyecto contempla el diseño, fabricación e implementación de un módulo educativo que permita reproducir de manera experimental el fenómeno del pandeo elástico bajo condiciones técnicas controladas, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM E9-19, AISC 360 y el modelo de Euler. El módulo será incorporado al laboratorio con fines académicos, permitiendo observar el comportamiento de elementos estructurales esbeltos bajo carga axial, y sirviendo como herramienta formativa para la validación de modelos teóricos como el de Euler.

1.5. LIMITACIONES

El desarrollo del presente proyecto puede enfrentar ciertas limitaciones asociadas al contexto técnico y logístico. En primer lugar, se reconoce la escasa disponibilidad en el mercado nacional de módulos educativos o equipos diseñados específicamente para ensayos de pandeo, lo que dificulta la comparación directa con modelos comerciales y restringe el

análisis de alternativas ya implementadas. Esta situación obliga a desarrollar un diseño completamente original, sustentado principalmente en normativas técnicas y literatura especializada.

Asimismo, podrían presentarse limitaciones en cuanto a la adquisición oportuna de determinados materiales y componentes requeridos para la fabricación del módulo, especialmente si se consideran las características mecánicas específicas que deben cumplir las piezas estructurales y los elementos de medición. Además, la disponibilidad de centros de mecanizado con tolerancias adecuadas y experiencia en fabricación de prototipos educativos también puede influir en los plazos de ejecución del proyecto.

Pese a estas limitaciones, se ha considerado un enfoque técnico viable y una planificación basada en recursos disponibles dentro del entorno universitario, así como el uso de normativa estandarizada (American Institute of Steel Construction, 2016; ASTM International, 2019), lo que permitirá mitigar los posibles impactos durante el desarrollo del módulo y la ejecución de los ensayos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de este capítulo tiene como propósito establecer las bases teóricas que sustentan el diseño y la fabricación del módulo educativo orientado a la realización de ensayos de pandeo en barras esbeltas. Esta herramienta didáctica ha sido concebida para facilitar la comprensión del comportamiento estructural bajo carga de compresión axial, permitiendo la observación directa del fenómeno de inestabilidad lateral que ocurre en elementos delgados cuando se supera una determinada carga crítica. Para ello, se consideran los fundamentos del modelo de Euler, descrito en la literatura especializada en mecánica estructural, el cual explica el pandeo elástico en condiciones ideales. Asimismo, se toman en cuenta los criterios técnicos establecidos en la norma ASTM E9-19 de ASTM International (ASTM International, 2019) y los aportes desarrollados por Hibbeler (Hibbeler, 2011) en el ámbito de la mecánica de materiales, la cual regula los procedimientos para ensayos de compresión en materiales metálicos. A partir de estos conceptos se construye un marco teórico sólido que permite analizar variables como la longitud efectiva, el momento de inercia, la rigidez estructural y la esbeltez, elementos clave para comprender la aparición del pandeo y validar los resultados experimentales que se obtendrán mediante el uso del módulo propuesto.

2.1. COMPORTAMIENTO DE MATERIALES BAJO CARGA AXIAL

2.1.1. Carga axial: definición y efectos

La carga axial se define como la fuerza aplicada paralela al eje longitudinal de un elemento estructural, lo que genera compresión o tensión sin producir momentos transversales significativos. Según Lee (Lee, 2025) esta fuerza actúa a lo largo del eje del miembro, y es común en columnas, montantes o elementos de soporte vertical. Cuando se trata de compresión axial, el material puede experimentar inestabilidad estructural, especialmente en elementos esbeltos propensos al pandeo.

La influencia de la carga axial en la estabilidad estructural se evidencia cuando el miembro supera una carga crítica denominada P_{cr}, tras la cual puede experimentar una deformación lateral súbita típicamente conocida como pandeo. La fórmula de Euler para columnas largas ofrece la expresión teórica de esta carga crítica:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \tag{2.1}$$

Donde:

- P_{cr} = carga crítica de pandeo (N)
- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- I = momento de inercia de la sección transversal (mm^4)
- L = longitud sin apoyo del elemento (mm)
- K = coeficiente de longitud efectiva según condiciones de apoyo (adimensional).

El estrés crítico correspondiente se expresa como:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \tag{2.2}$$

Donde:

- σ_{cr} = esfuerzo crítico de pandeo (MPa)
- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- L = longitud sin apoyo del elemento (mm)
- K = coeficiente de longitud efectiva según condiciones de apoyo (adimensional).
- r = radio de giro de la sección transversal (mm), definido como $\left[r = \sqrt{I/A}\right]$

Cabe resaltar, que el radio de giro es el valor fundamental para evaluar la susceptibilidad del elemento al pandeo en función de su esbeltez.

Desde una perspectiva aplicada, la carga axial afecta directamente el comportamiento post-elástico del material. Shepherd y Zirakian (Shepherd & Zirakian, 2023) señalan que columnas con esbeltez elevada pueden fallar por pandeo antes de alcanzar la fluencia del material, implicando que incluso esfuerzos por debajo del límite elástico pueden generar colapso estructural. Por ello resulta indispensable controlar tanto las dimensiones geométricas como las condiciones de apoyo para evitar la inestabilidad.

2.1.2. Límite elástico y deformación plástica

El límite elástico corresponde a la máxima tensión que un material puede soportar sin sufrir deformación permanente. Por debajo de este umbral, toda deformación es reversible y desaparece al retirar la carga. Veidht (Veidth, 2025) explica que al superarse este punto; llamado comúnmente punto de fluencia o *yield strength*; se inicia la deformación plástica, caracterizada por cambios permanentes en la estructura del material.

En el análisis tensio-deformacional, la relación entre esfuerzo y deformación lineal sigue la ley de Hooke dentro del límite elástico:

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{2.3}$$

Donde:

- σ = esfuerzo normal (MPa)
- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- ε = deformación unitaria (adimensional)

Según MechaniCalc (MechaniCalc, 2024), una vez que σ supera el punto de fluencia, el material entra en régimen plástico, y parte de la deformación ya no es recuperable.

Cuando la carga axial continúa más allá de la fluencia, la tensión excede el límite elástico y se presenta deformación irreversible, iniciando un comportamiento de endurecimiento por deformación (*strain hardening*). Esta fase se expresa mediante relaciones como:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \tag{2.4}$$

Donde:

- ε_p = deformación plástica residual (adimensional)
- σ = esfuerzo normal (MPa)
- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- ε = deformación unitaria (adimensional)

Veidth (Veidth, 2025) explica que dicho fenómeno se vuelve especialmente relevante en columnas sometidas a cargas elevadas, dado que el comportamiento plástico puede modificar la rigidez residual y alterar las predicciones de estabilidad.

El análisis combinado de tensión plástica y pandeo elástico-plástico requiere modelos más avanzados, como los desarrollados para el pandeo plástico. Karagiozova y Alves (Karagiozova & Alves, 2008) demostraron en estudios recientes sobre cilindros bajo compresión, se demostró que la incorporación de la plasticidad altera significativamente el cálculo de la carga crítica, y se propone una fórmula tipo Euler (Fórmula 2.1) corregida donde E_t es el módulo tangente en la región plástica del material.

2.1.3. Criterio de Von Mises

En el análisis de estructuras sometidas a cargas de compresión, como las columnas esbeltas utilizadas en los ensayos de pandeo, la teoría clásica de Euler determina la carga crítica de inestabilidad. Este enfoque acorde a Ugural y Fenster (Ugural & Fenster, 2020) es válido en el régimen elástico y permite predecir el punto en el que la columna pierde estabilidad. No obstante, en un módulo de ensayos fabricado con elementos metálicos, la verificación estructural no se limita únicamente a la inestabilidad geométrica. Asimismo, es imprescindible garantizar que los materiales empleados (aceros estructurales en soportes, columnas y uniones) no sobrepasen el límite elástico bajo el estado real de tensiones inducido por la carga aplicada.

En este contexto, el criterio de Von Mises se convierte en una herramienta de validación complementaria, el cual, según Dowling et al. (Dowling et al., 2019) se encuentra formulado en términos de la energía de distorsión, estableciendo que la fluencia en metales dúctiles ocurre cuando la tensión equivalente (δ_{eq}) alcanza el límite de fluencia en tracción uniaxial (δ_y). La expresión más común en tensiones principales es:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \tag{2.5}$$

Donde:

- δ_{eq} = tensión equivalente
- σ_1 = tensión principal mayor (MPa)
- σ_2 = tensión principal intermedia (MPa)
- σ_3 = tensión principal menor (MPa)
- σ_y = límite de fluencia del material en tracción uniaxial (MPa)

Ugural y Fenster (Ugural & Fenster, 2020) recalcan que para el caso de esfuerzo plano; situación frecuente en probetas rectangulares y en placas base del módulo, se emplea la forma reducida:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \tag{2.6}$$

Donde:

- σ_{eq} = esfuerzo equivalente de Von Mises (MPa)
- σ_x = esfuerzo normal en la dirección x (MPa)

- σ_y = esfuerzo normal en la dirección y (MPa)
- τ_{xy} = esfuerzo cortante en el plano xy (MPa)

En el diseño del módulo de pandeo, acorde a Arora y Acharya (Arora & Acharya, 2020) este criterio cumple dos funciones clave:

1) Validar la seguridad de componentes principales (columna, soporte base, puente guía), verificando que la tensión equivalente de Von Mises bajo la carga de ensayo sea inferior al límite de fluencia del acero considerado.
2) Aportar criterio de comparación en la simulación numérica realizada en Inventor (FEA), ya que este software calcula y representa los campos de tensiones equivalentes de Von Mises como parámetros estándar de postproceso.

A diferencia de la teoría de Euler, que únicamente evalúa la inestabilidad global de la columna, según Huang y Jiang (Huang & Jiang, 2023) Von Mises permite identificar zonas críticas localizadas donde se concentran tensiones (uniones soldadas, empotramientos o apoyos de módulo). De esta manera, se garantiza que el equipo no solo cumpla con reproducir el fenómeno de pandeo, sino que además posea una resistencia estructural adecuada, evitando deformaciones plásticas prematuras en los elementos que conforman el dispositivo de ensayo.

En síntesis, acorde a Shahid et al. (Shahid et al., 2023) la incorporación del criterio de Von Mises en el marco teórico de este estudio responde a la necesidad de integrar dos dimensiones del comportamiento estructural; por un lado, la estabilidad global de las columnas sometidas a pandeo, y por otro, la resistencia local del material ante esfuerzos multiaxiales. Esta dualidad asegura que el módulo educativo diseñado cumpla tanto con la precisión experimental del ensayo como con la seguridad y durabilidad de su propia estructura.

2.2. FUNDAMENTOS DE PANDEO

2.2.1. Definición y características del pandeo

El pandeo es un modo de inestabilidad estructural caracterizado por una deformación lateral significativa de una barra bajo carga axial, que ocurre abruptamente antes de que el material alcance su límite de resistencia. Según Puria Hafiz y Abdullahi Baru (Hafiz & Baru, 2018), el pandeo se manifiesta como una falla de inestabilidad en miembros largos y

delgados sometidos a altas cargas de compresión, representando un riesgo crítico incluso cuando el esfuerzo axial es inferior al estrés límite del material.

Además, investigaciones como las de Ziólkowski y Imielowski (Ziółkowski & Imiełowski, 2011) distinguen varios modos de pandeo según la geometría y rigidez del perfil: pandeo global o flexional, torsional y flexo-torsional. Estos últimos son especialmente relevantes en perfiles abiertos o asimétricos, donde la interacción entre flexión y torsión predomina el comportamiento inestable.

El comportamiento post-pandeo también es una característica clave. Ziólkowski y Imielowski (Ziółkowski & Imiełowski, 2011) observaron que, dependiendo de la esbeltez, puede haber una caída del esfuerzo de carga después del punto crítico, con aparición de deformaciones plásticas asimétricas y pérdida de rigidez. En muestras con esbeltez intermedia, el valor de carga crítica experimental fue hasta un 20 % menor que el predicho por el modelo clásico (Euler).

A nivel teórico, según Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) la transición entre el comportamiento inelástico y elástico de una columna bajo compresión se determina mediante la esbeltez crítica λ_c, definida por la relación:

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{\sigma_y}} \tag{2.7}$$

Donde:

λ_c = Esbeltez crítica (adimensional)

E = Módulo de elasticidad del material (MPa)

σ_y = Límite de fluencia (MPa)

Este valor marca el umbral a partir del cual el pandeo pasa de ser inelástico ($\lambda < \lambda_c$) a elástico ($\lambda > \lambda_c$), permitiendo seleccionar la formulación de diseño adecuada (Johnson o Euler). Esta relación es ampliamente utilizada en la evaluación de columnas metálicas y en la definición de curvas de pandeo en normas internacionales.

2.2.2. Relevancia en estructuras esbeltas

El comportamiento frente al pandeo es especialmente crítico en estructuras esbeltas, donde la relación entre longitud efectiva y radio de giro *(L_e/r)* es elevada. Amariles López et al. (Amariles López et al., 2022), evidenciaron que, en columnas de concreto de ultra alto

desempeño (UHPC), consideradas dentro de ese rango, se ha evidenciado que el método convencional del Código ACI 318 subestima la capacidad axial real en aproximadamente un 13 %, lo cual resalta la necesidad de incorporar los efectos de esbeltez en el diseño estructural.

Asimismo, El-Sayed et al. (El-Sayed et al., 2023) estudios sobre columnas UHPC sometidas a compresión axial han validado que la estabilidad frente al pandeo está fuertemente condicionada por la esbeltez. Cuando esta supera cierto umbral, los efectos de segundo orden (como la magnificación del momento) se vuelven significativos, por lo que el diseño debe incluir correcciones basadas en normas como ACI o Eurocódigo para garantizar niveles adecuados de seguridad.

Lee (Lee, 2025) sostiene que el análisis de pandeo en estructuras esbeltas no solo determina la carga crítica de falla, sino que también influye en la optimización de la sección transversal, la elección de perfil y el empleo de sistemas de arriostramiento. Diseño inteligente implica calcular con precisión la esbeltez y su influencia directa en la rigidez crítica lateral.

2.2.3. Aplicaciones prácticas del ensayo de pandeo

Uno de los usos más relevantes del ensayo de pandeo es la validación experimental de modelos teóricos. Por ejemplo, Franklin et al. (Franklin et al., 2022) llevaron a cabo ensayos físicos sobre columnas esbeltas de distintos materiales y condiciones de apoyo, comparando la carga crítica observada con resultados numéricos (ANSYS) y predicciones analíticas según la teoría de Euler. La concordancia resultante; diferencias inferiores al 5 %; refuerza el valor del ensayo como método para calibrar modelos estructurales reales.

En estructuras compuestas o paneles de pared delgados, los ensayos de pandeo permiten identificar modos locales, distorsionales o por cizallamiento. Attard (Attard, 2011) examinó columnas sándwich con núcleo suave y observó que, además del pandeo global, aparecían fallas por cizallamiento de cara o arrugamiento, especialmente en columnas de baja esbeltez. Estos datos facilitan el diseño de perfiles compuestos optimizados para aeronáutica o construcciones ligeras.

También en estructuras delgadas, como perfiles compuestos de PLA o PETG impresos en 3D, los ensayos de pandeo tienen aplicaciones en ingeniería experimental y educación. Baranovskyi et al. (Baranovskyi et al., 2025) probaron columnas 3D imprimiendo probetas de esos materiales, midiendo cargas críticas y respuesta posterior a captura acústica y óptica.

Estos resultados se emplean para ilustrar comportamiento elástico y post-pandeo en prototipos didácticos.

Además, en el diseño de dispositivos anti-sismo como las *Buckling-Restrained Braces* (BRB), se realizan ensayos de pandeo controlado para asegurar que el elemento axial resista cargas cíclicas manteniendo estabilidad. Este tipo de barra con restricción lateral ha sido aplicado en puentes y edificios para absorber deformaciones sin colapsar ante movimientos extremos.

2.2.4. Fundamento matemático del modelo de Euler

El modelo de pandeo de Euler se fundamenta en la resolución de una ecuación diferencial de segundo orden derivada del equilibrio de fuerzas en una columna esbelta. Para una columna perfectamente recta, homogénea y con carga axial pura, la ecuación es:

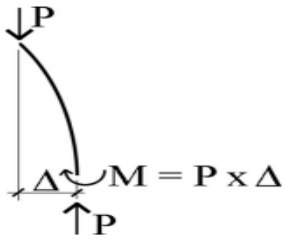
$$EI\frac{d^2y}{dx^2} + Py = 0 \tag{2.8}$$

Donde:

- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- I = momento de inercia de la sección transversal (mm^4)
- P = carga axial aplicada (N)
- $y(x)$ = deflexión lateral de la columna en función de la posición (mm)
- x = coordenada longitudinal medida a lo largo del eje de la columna (mm)

Ochshorn (Ochshorn, 2009) plantea que esta expresión se plantea como un problema de valores propios, cuya solución no trivial determina la carga crítica que origina la inestabilidad estructural. En este contexto, la relación $M=P\cdot\Delta$ ilustra cómo una carga axial P aplicada sobre una columna inicialmente recta genera un momento flector proporcional a la deflexión lateral Δ, base física del modelo de pandeo elástico de Euler (véase Figura 2.1).

Figura 2.1 Representación del momento interno inducido por la carga axial en una columna esbelta



Nota. Tomado de Ochshorn, (2009, p. 1).

Considerando condiciones de apoyo articuladas en ambos extremos (*pinned–pinned*), la solución general para *y(x)* toma la forma de un modo senoidal: $y(x) = B\sin(\pi x/L)$. Al aplicar las condiciones de frontera, se obtiene la clásica fórmula de carga crítica (Fórmula 2.1).

Ochshorn (Ochshorn, 2009) señala que esta corresponde a la expresión más utilizada para columnas con extremos articulados.

Para condiciones de apoyo más generales, se introduce el factor de longitud efectiva *K*, de modo que la carga crítica se corrige como se enunció en la fórmula 2.2 y el esfuerzo crítico asociado se escribe como se denotó en la fórmula 2.3. Goel et al. (Goel et al., 2021) explican que esta formulación generalizada es ampliamente reconocida en análisis estructurales y diseño técnico.

La validación experimental del modelo de Euler ha sido considerada en estudios como los de Franklin et al. (Franklin et al., 2022), quienes compararon cargas críticas obtenidas experimentalmente con valores analíticos y resultados de simulación numérica usando ANSYS. Encontraron buenas correlaciones (errores menores al 5 %) en columnas con distintas longitudes, condiciones de apoyo y materiales, confirmando la validez del modelo lineal hasta cierto régimen de esbeltez.

2.2.5. Supuestos del modelo y limitaciones

El modelo clásico de pandeo de Euler se basa en hipótesis ideales que rara vez se cumplen completamente en ensayos con barras reales. Entre ellas, se asume una barra perfectamente recta, homogénea, isotrópica, sin imperfecciones iniciales ni tensiones residuales, con carga estrictamente axial, sin considerar peso propio ni efectos térmicos. Manoli et al. (Manoli et al., 2022) señalan que, además, se exige que la deformación

permanezca dentro del rango lineal elástico antes del colapso. En el caso de un módulo experimental de pandeo (capacidad ~2500 N), incluso pequeñas desviaciones geométricas pueden alterar notablemente los resultados.

Adicionalmente, el modelo Euler sólo es válido para barras con alta esbeltez, donde el pandeo ocurre antes de la fluencia del material. Cuando la esbeltez disminuye, el modelo tiende a sobreestimar la carga crítica. Estudios recientes como el de Ziolkowski e Imielowski (Ziółkowski & Imiełowski, 2011) demostraron que incluso columnas con esbeltez en rango intermedio pueden sufrir fallas elasto-plásticas antes del pandeo, reduciendo la carga crítica en más de un 10–20 % respecto al valor teórico. Esto impacta directamente el diseño del módulo educativo, ya que requiere garantizar esbeltez adecuada para observación clara del fenómeno.

Otro aspecto relevante es la influencia de la plasticidad y las imperfecciones reales en la respuesta estructural. Franky et al. (Franky et al., 2022) investigaron sobre tubos de acero Q690 muestran que incluso pequeñas imperfecciones pre-pandeo y tensiones residuales pueden reducir significativamente la resistencia al pandeo, especialmente en presencia de deformación plástica combinada con geometría imperfecta. En el módulo educativo, esto implica que el diseño de probetas (precisión mecánica y calibración) es indispensable para obtener resultados confiables.

Asimismo, el modelo Euler no contempla efectos dinámicos o cargas controladas por desplazamiento, y por tanto no refleja fenómenos como la rigidez residual o la respuesta post-pandeo. Estudios recientes como el de Zeng (Zeng, 2023) revelan que la carga crítica observada puede diferir del valor estático predicho por Euler cuando el ensayo es controlado por desplazamientos, evidenciando variaciones en el pico y el comportamiento post-colapso. Esto sugiere que en el diseño del módulo se debe considerar el modo de control de carga (fuerza vs desplazamiento), para evitar errores interpretativos al medir la carga máxima.

2.2.6. Propiedades geométricas de la sección circular maciza

El análisis estructural de elementos sometidos a esfuerzos axiales o de pandeo requiere determinar sus propiedades geométricas básicas. Para una sección circular maciza de diámetro d_3, el área transversal resistente se calcula mediante:

$$A = \frac{\pi d_3^2}{4} \tag{2.9}$$

Donde:

- A = área transversal resistente de la sección (mm^2)
- d_3 = diámetro de la sección circular de la probeta (mm)

Mientras que el momento de inercia se determina con:

$$I = \frac{\pi d_3^4}{64} \tag{2.10}$$

Donde:

- I = momento de inercia de la sección transversal respecto al eje centroidal (mm^4)
- d_3 = diámetro de la sección circular de la probeta (mm)

La relación entre ambas propiedades permite obtener el radio de giro:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{d_3}{4} \tag{2.11}$$

Donde:

- r = radio de giro de la sección transversal (mm)
- I = momento de inercia de la sección transversal (mm^4)
- A = área transversal resistente de la sección (mm^2)
- d_3 = diámetro de la sección circular de la probeta (mm)

Estas propiedades según Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) son fundamentales para evaluar la estabilidad y rigidez de elementos estructurales esbeltos, como tornillos de avance, ya que determinan la capacidad de resistir cargas axiales sin deformaciones excesivas ni pandeo.

2.2.7. Propiedades geométricas de una sección rectangular

Las probetas utilizadas en los ensayos de pandeo poseen una sección transversal rectangular, por lo que el análisis teórico requiere emplear las expresiones geométricas correspondientes a este tipo de sección. Para una barra rectangular de espesor b y ancho h, el área de la sección transversal se determina como:

$$A = b\,h \tag{2.12}$$

Donde:

- A = área transversal resistente de la sección (mm^2)

- b = ancho de la sección rectangular (mm)
- h = espesor (o altura) de la sección rectangular (mm)

Tal como Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) presentan en los desarrollos de propiedades de sección para elementos prismáticos en textos clásicos de mecánica de materiales.

Asimismo, de acuerdo con Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009), el momento de inercia respecto al eje débil de una sección rectangular se calcula mediante:

$$I = \frac{b\,h^3}{12} \tag{2.13}$$

Donde:

- I = momento de inercia de la sección transversal respecto al eje considerado (mm^4)
- b = ancho de la sección rectangular (mm)
- h = espesor (o altura) de la sección rectangular (mm)

A partir de este momento de inercia y del área de la sección, el radio de giro se define como:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{2.14}$$

Donde:

- r = radio de giro de la sección transversal (mm)
- I = momento de inercia de la sección transversal respecto al eje considerado (mm^4)
- A = área transversal resistente de la sección (mm^2)

Relación que acorde a Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) permite vincular la distribución de material en la sección con su capacidad para resistir la inestabilidad elástica.

Por otro lado, la relación de esbeltez de la barra, fundamental para el análisis de pandeo, se expresa como:

$$\lambda = \frac{K\,L}{r} \tag{2.15}$$

Donde:

- $\lambda =$ relación de esbeltez (adimensional)
- $K =$ factor de longitud efectiva según condiciones de apoyo (adimensional)

- $L =$ longitud libre (o longitud real) del elemento estructural (mm)
- $r =$ radio de giro de la sección transversal respecto al eje considerado (mm)

Esta formulación según Timoshenko y Gere (Timoshenko & Gere, 1961) es ampliamente utilizada en el estudio de la estabilidad de columnas esbeltas.

2.2.8. Capacidad crítica de pandeo – Fórmula de Johnson

Cuando la esbeltez es intermedia, el pandeo no ocurre estrictamente de forma elástica (como en la ecuación de Euler), sino que intervienen también efectos plásticos. La fórmula de Johnson permite estimar la tensión crítica en este rango, combinando de forma empírica la resistencia a la fluencia y la tendencia al pandeo:

$$\sigma_{cr} = \sigma_y \left[1 - \frac{\sigma_y}{4\pi^2 E}\lambda^2\right] \tag{2.16}$$

Donde:

- σ_{cr} = esfuerzo crítico de pandeo en el régimen inelástico (MPa)
- σ_y = límite de fluencia del material (MPa)
- E = módulo de elasticidad del material (MPa)
- λ = relación de esbeltez de la columna (adimensional)

Esta relación según Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) es más conservadora y adecuada para elementos como tornillos estructurales, en los que la esbeltez no es extremadamente alta. Su uso asegura que el diseño se mantenga dentro de un rango seguro sin sobreestimar la carga crítica.

2.2.9. Carga crítica de pandeo – Método de Johnson

La carga crítica de pandeo se obtiene multiplicando la tensión crítica por el área resistente:

$$P_{cr}^{Johnson} = \sigma_{cr} A0 \tag{2.17}$$

Donde:

- $P_{cr}^{Johnson}$ = carga crítica de pandeo según el método de Johnson (N)
- σ_{cr} = esfuerzo crítico de pandeo en el régimen inelástico (MPa)
- A = área transversal resistente de la sección (mm^2)

Esta expresión integra según Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) la influencia conjunta de la capacidad resistente del material y de la geometría de la sección transversal, permitiendo estimar la carga crítica de pandeo en el régimen inelástico, donde la columna aún no se comporta de manera puramente elástica, pero tampoco ha alcanzado un estado de fluencia generalizada. En este rango de esbeltez, el comportamiento estructural se caracteriza por una combinación de deformaciones elásticas y plásticas, por lo que el uso exclusivo de la formulación de Euler podría conducir a una sobreestimación de la capacidad portante del elemento.

En el contexto del módulo educativo desarrollado, la aplicación del método de Johnson permite evaluar de forma más precisa la carga crítica de pandeo para configuraciones de probetas cuya esbeltez se encuentra dentro del intervalo de transición, lo cual resulta especialmente relevante para fines didácticos, ya que posibilita comparar los resultados experimentales con predicciones teóricas que consideran tanto los efectos del material como los geométricos. De este modo, el uso de esta expresión contribuye a una mejor interpretación del fenómeno de pandeo en condiciones reales de ensayo y refuerza la comprensión del comportamiento estructural de columnas esbeltas en laboratorio.

2.2.10. Factor de seguridad frente a pandeo

Para garantizar un comportamiento estructural estable y confiable, se evalúa el factor de seguridad frente al pandeo:

$$FS_{pandeo} = \frac{P_{cr}}{P} \tag{2.18}$$

Donde:

- FS_{pandeo} = factor de seguridad frente al pandeo (adimensional)
- P_{cr} = carga crítica de pandeo del elemento (N)
- P = carga axial aplicada durante el ensayo (N)

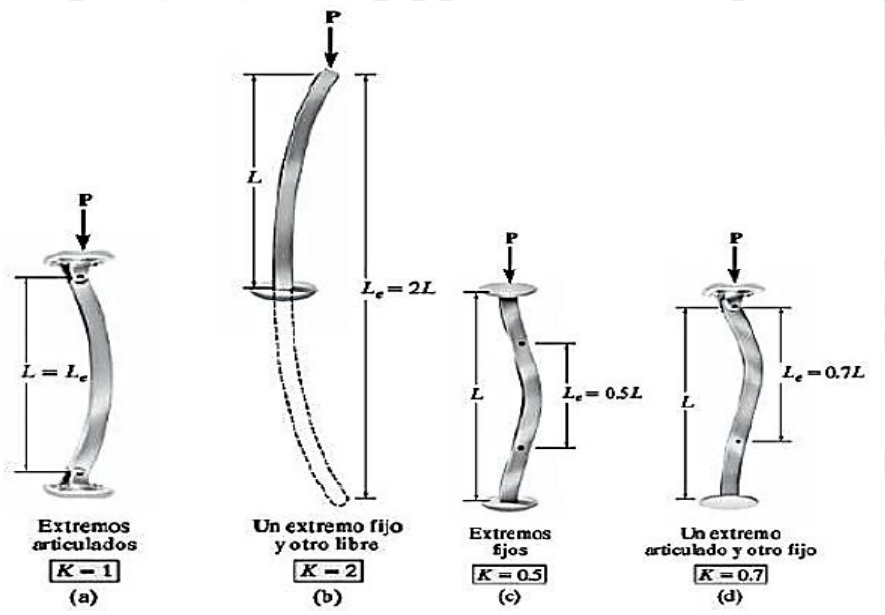
Este factor acorde a Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) expresa la relación entre la capacidad resistente del elemento frente a pandeo y la carga efectivamente aplicada durante el ensayo, permitiendo cuantificar el margen de seguridad estructural frente a la inestabilidad. Un valor de FS_{pandeo} mayor que la unidad indica que la carga de servicio se encuentra por debajo de la carga crítica de pandeo, garantizando que el elemento no alcanzará una condición de inestabilidad bajo las solicitaciones previstas.

En el contexto del módulo educativo desarrollado, la evaluación del factor de seguridad frente a pandeo permite verificar que las configuraciones de ensayo seleccionadas operan dentro de un rango seguro de carga, evitando fallas prematuras del sistema y garantizando la repetitividad de los ensayos. Asimismo, este indicador facilita la comparación entre distintas condiciones de apoyo y longitudes efectivas, reforzando el análisis experimental del efecto de la esbeltez en la estabilidad estructural de las probetas.

2.2.11. Condiciones de frontera y longitud efectiva

Se observan distintas configuraciones de columna sometida a carga axial pura, con sus respectivas condiciones de frontera: (a) extremos articulados (*K=1*), (b) un extremo fijo y otro libre (*K=2*), (c) ambos extremos fijos (*K=0.5*) y (d) un extremo fijo y otro articulado (*K=0.7*). Cada caso modifica la longitud efectiva L_e, influyendo directamente en la carga crítica de pandeo según la formulación de Euler (véase Figura 2.2).

Figura 2.2 Configuración de columnas con diferentes condiciones de apoyo y sus valores de longitud efectiva *K*.



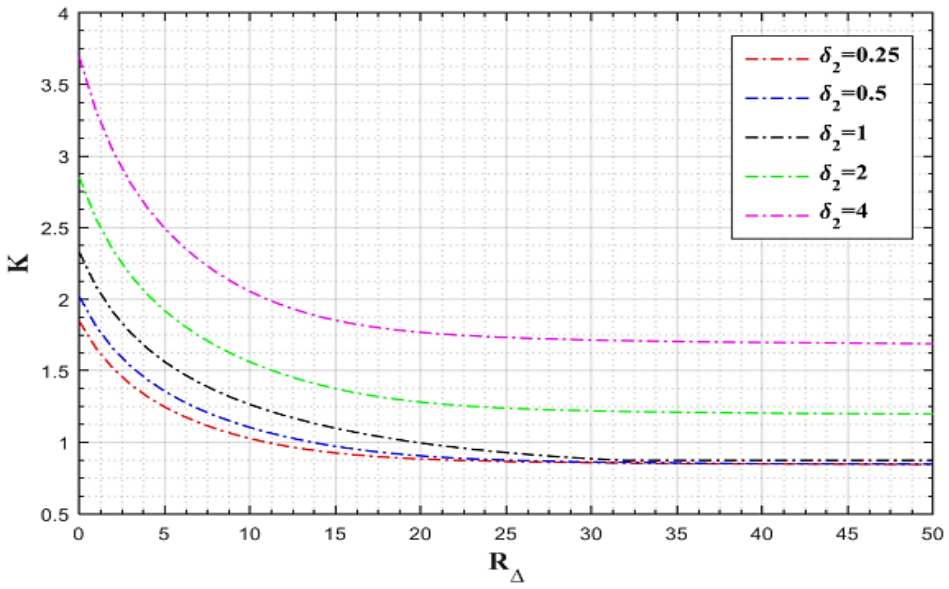
Nota. Tomado de Martins y Barbosa, (2018, p. 17).

Las condiciones de frontera en los soportes de una columna determinan de forma crítica su comportamiento frente al pandeo. El factor *K* (longitud efectiva relativa, $Le=K \cdot L$) depende del tipo de empotramiento o articulación en los extremos. Manoli et al. (Manoli et

al., 2022) explican que, para articulaciones simples en ambos extremos (*hinged-hinged*), *K*=1.0; para extremos fijos-fijos *K=0.5*; para combinación fijo–pivote *K≈0.7*; y para una columna con un extremo libre y otro empotrado *K=2.0*. Estas variaciones influyen directamente en la carga crítica según la fórmula de Euler (Fórmula 2.2), por lo que una transición de *K=0.5* a *K=2* reduce la resistencia al pandeo por un factor de cuatro.

En la Figura 2.3 se presenta la variación del factor de longitud efectiva *K* en función del parámetro *RΔ* para distintos valores de δ_2. Se observa que, a medida que aumenta *RΔ*, el valor de *K* tiende a estabilizarse, reduciendo su sensibilidad frente a variaciones geométricas iniciales. Sin embargo, para valores bajos de *RΔ*, el factor de longitud efectiva se incrementa significativamente, lo que implica una mayor propensión al pandeo. Este comportamiento confirma la influencia directa de los parámetros de rigidez relativa en la estimación de la carga crítica de columnas esbeltas, lo que resalta la necesidad de aplicar fórmulas actualizadas en el diseño estructural.

Figura 2.3 Variación del factor de longitud efectiva *K* en función del parámetro *RΔ* para distintos valores de δ_2



Nota. Tomado de Slimani et al. (2023, p. 16).

Bajo dicho contexto, diversos estudios técnicos confirman la influencia de la rigidez del apoyo en *K*. Saffari et al. (Saffari et al., 2008) demostraron, por ejemplo, en análisis de montajes estructurales de acero con secciones variables, se han desarrollado métodos

analíticos que ajustan *K* considerando la rigidez trasversal y las condiciones parciales dentro de marcos estructurales. En estos casos, *K* puede superar el valor tradicional de 1.0 cuando los apoyos presentan restricción rotacional negativa o asimetría estructural.

Además, investigaciones recientes proponen fórmulas actualizadas para estimar *K* en modelos reales de edificios y estructuras con rigidez semi-rígida. Slimani et al. (Slimani et al., 2023) presentaron un método validado experimentalmente para estimar *K* en marcos altos con empotramientos intermedios, proporcionando valores precisos dentro de conjuntos asimétricos o parcialmente arriostrados. Este enfoque es relevante para el diseño de módulos de ensayo, en los cuales las condiciones de apoyo (por ejemplo, rótulas, guiado, hardware real) deben ser replicadas y calibradas para simular distintos valores de *K*.

Ibrahim (Ibrahim, 2017) evidenció en ensayos con barras esbeltas diseñadas con capacidad de hasta 2500 *N*, la longitud efectiva afecta directamente los resultados de pandeo. Estudios sobre columnas no prístinas o de sección variable muestran que incluso una leve disminución en la longitud efectiva puede incrementar la carga crítica en más del 3 %. Estas investigaciones respaldan la necesidad de definir con precisión los apoyos y simular correctamente las condiciones reales en módulos de prueba, asegurando la validez de los datos experimentales o didácticos.

2.2.12. Pandeo de Euler

La teoría de pandeo propuesta por Leonhard Euler constituye la base del análisis de estabilidad para columnas esbeltas sometidas a carga axial de compresión. Tomás y Tovar (Tomás & Tovar, 2012) explican que este modelo teórico permite determinar la carga crítica a partir de la cual un elemento estructural pierde su equilibrio estable y se deforma lateralmente, incluso sin alcanzar el límite elástico del material. La formulación de Euler parte de un análisis matemático que considera un comportamiento lineal-elástico, sin imperfecciones iniciales ni efectos plásticos, lo cual la hace especialmente útil en contextos académicos y de laboratorio donde se buscan condiciones ideales para el análisis.

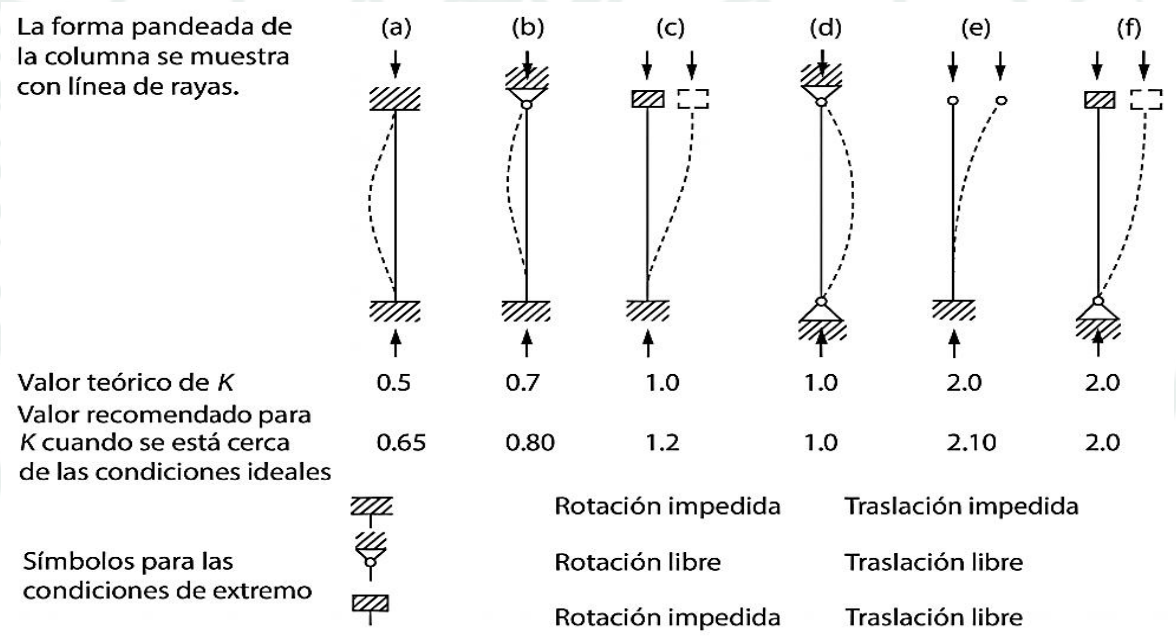
Cuando se considera una barra con apoyos fijos en ambos extremos, la longitud efectiva corresponde a la longitud real del elemento, y el coeficiente de longitud efectiva *K* toma el valor de 1,0. En ese contexto, la fórmula de Euler para carga crítica conserva su forma acorde a lo evidenciado en la fórmula 2.2.

Donde P_{cr} es la carga crítica de pandeo, *E* el módulo de elasticidad del material, *I* el momento de inercia de la sección transversal y *L* la longitud total de la barra. Esta ecuación

será aplicada en el módulo educativo a diseñarse, permitiendo contrastar los valores teóricos con los resultados experimentales obtenidos en laboratorio.

En la Figura 2.4 se ilustra el comportamiento de una barra con diferentes condiciones de extremo sometida a carga crítica de pandeo. Se aprecia cómo la restricción o liberación de la rotación y la traslación en los apoyos modifica directamente el valor del factor *K*, el cual varía entre 0.5 y 2.0 según el tipo de condición de frontera. Asimismo, se incluyen valores recomendados de *K* que consideran desviaciones prácticas respecto a los teóricos, lo que permite un diseño más realista de elementos estructurales. Esta representación resulta fundamental para comprender cómo las condiciones de apoyo influyen en la capacidad resistente y en la estabilidad global de las columnas esbeltas.

Figura 2.4 Comportamiento de una barra con apoyos fijos sometida a carga crítica de pandeo



Nota. Tomado de Briceño (2025, p. 1).

Rajib y Chen (Rajib & Chen, 2024) señalan que este modelo ha sido validado y complementado por investigaciones recientes que, si bien reconocen sus limitaciones frente a comportamientos no lineales o materiales compuestos, destacan su utilidad en entornos educativos y experimentales. La posibilidad de reproducir el pandeo en condiciones idealizadas facilita el aprendizaje del concepto y permite una comparación directa entre la

teoría y los resultados observados, aspecto fundamental en procesos de formación en ingeniería estructural.

2.3. NORMATIVA TÉCNICA APLICADA

2.3.1. Norma ASTM E9-19: fundamentos y alcance

La norma ASTM E9-19 (ASTM International, 2019) establece los procedimientos estándar para ensayos de compresión axial en materiales metálicos a temperatura ambiente. La sección *Scope (1.1)* especifica claramente que cubre el aparato de ensayo, las probetas, la preparación y el procedimiento operacional, lo que asegura uniformidad y reproducibilidad en los resultados entre distintos laboratorios e instituciones.

En su sección *Significance and Use (5.1)*, ASTM E9-19 (ASTM International, 2019) indica que los ensayos permiten la determinación de propiedades fundamentales como la resistencia a la fluencia (*yield strength*), resistencia a compresión máxima, módulo de Young y la curva tensión-deformación. Asimismo, advierte sobre la necesidad de controlar efectos como el pandeo o *barreling*, que pueden distorsionar los resultados si no se mitigan adecuadamente.

La norma también hace referencia a estándares complementarios claves integrados en el sistema normativo: ASTM E4 para la verificación de máquinas de ensayo, ASTM E6 para la terminología, ASTM E83 para extensómetros y ASTM E111 para la determinación del módulo de elasticidad. Esta interrelación normativa garantiza trazabilidad técnica y precisión en los procedimientos descritos por ASTM E9-19 (ASTM International, 2018, 2019).

2.3.2. Complementariedad con la norma AISC 360

La norma ASTM E9-19 (ASTM International, 2019) define los parámetros y procedimientos técnicos para ensayos de compresión axial en materiales metálicos a temperatura ambiente, estableciendo cómo preparar probetas, ejecutar el ensayo y registrar datos como resistencia a compresión, módulo de elasticidad y curva tensión–deformación. Esta información experimental es esencial para obtener propiedades mecánicas fundamentales que luego se usan en el diseño estructural, motivo por el cual existe una conexión técnica necesaria con los criterios de diseño del acero estructural.

En contraste, la especificación ANSI/AISC 360-16 (American Institute of Steel Construction, 2016) se centra en los principios de diseño estructural de construcciones de

acero, abarcando estrategias de diseño según carga permisible (ASD) o factores de carga y resistencia (LRFD), incluyendo diseño ante pandeo, pandeo por flexión, y resistencia límite según la geometría de elementos y condiciones de carga. Los valores de resistencia a la compresión obtenidos según ASTM E9-19, como esfuerzo de fluencia o máxima compresión, alimentan directamente los análisis usados en AISC 360, especialmente para determinar la capacidad axial de columnas.

De esta manera, la complementariedad entre ASTM E9-19 y AISC 360 se manifiesta en la relación entre datos experimentales y aplicabilidad práctica: ASTM E9-19 proporciona métodos estandarizados para obtener propiedades mecánicas reales, mientras que AISC 360 traduce dichas propiedades en criterios de diseño estructural (como coeficientes de pandeo, esbeltez, longitud efectiva y curvas de carga) (American Institute of Steel Construction, 2016). Esta integración normativa permite que los resultados de laboratorio validen modelos estructurales y aseguren la seguridad y eficiencia en la práctica de ingeniería civil.

Así mismo, la estabilidad de los elementos comprimidos depende de manera directa de las condiciones de apoyo en sus extremos y de la longitud efectiva sobre la cual pueden desarrollar la inestabilidad elástica, cada tipo de apoyo ya sea de empotramiento, articulación o una combinación de ambos, genera un patrón de deformado distinto que modifica la rigidez global del sistema y, por tanto, la capacidad de carga crítica. Estos efectos se recogen mediante el factor de longitud efectiva (k), que permite ajustar la longitud real del elemento a una longitud equivalente capaz de reproducir el mismo modo de pandeo bajo condiciones ideales.

Bajo supuestos estrictamente teóricos, el valor de k se obtiene directamente del modo de deformada, siendo de 0.5 para una configuración de apoyo empotrado–empotrado, 0.7 para empotrado–articulado y 1.0 para articulado–articulado. Sin embargo, estas condiciones son infrecuentes en sistemas estructurales reales, donde la rigidez rotacional de las uniones, la continuidad de los elementos y la presencia de imperfecciones geométricas introducen grados intermedios de restricción. Por este motivo, la norma AISC 360-22 (American Institute of Steel Construction, 2022)establece valores recomendados de k, derivados del análisis de rigidez relativa entre elementos conectados y de la interacción entre flexiones en los planos principales de pandeo.

Según dicha especificación, para columnas o barras esbeltas sometidas a compresión con apoyos no perfectamente rígidos, se recomienda adoptar valores de k de 0.65 para configuración de apoyos del tipo empotrado–empotramiento, 0.80 para empotrado–

articulado y 1.00 para articulado–articulado. Estos valores representan configuraciones más cercanas al comportamiento real y permiten obtener estimaciones teóricas de carga crítica con menor discrepancia respecto a resultados experimentales. Por esta razón, en los análisis de pandeo de elementos delgados, como los empleados en módulos educativos o dispositivos experimentales, se acostumbra comparar los resultados obtenidos con el valor teórico ideal y con el valor recomendado por la AISC, a fin de evaluar la influencia de las imperfecciones y de los grados reales de restricción.

2.3.3. Norma ISO/IEC 17025:2017

La norma ISO/IEC 17025:2017 (International Organization for Standarization, 2017), publicada por ISO e IEC, establece los requisitos generales para la competencia técnica, imparcialidad y operación consistente de laboratorios de ensayo y calibración, con el objetivo de asegurar la validez y confiabilidad de los resultados generados por esos laboratorios. Esta edición, vigente desde 2017 y confirmada en 2023, incorpora un enfoque basado en la evaluación de riesgos, mayor integración de tecnologías de información, así como mayor flexibilidad respecto a modelos anteriores más prescriptivos.

La estructura de la norma se organiza en ocho secciones principales: alcance, referencias normativas, definiciones, requisitos generales (imparcialidad y confidencialidad), requisitos estructurales, de recursos, de procesos y de sistema de gestión (opciones A y B). Esta organización garantiza que un laboratorio no solo implemente un sistema de gestión de calidad comparable a ISO 9001, sino también cumpla rigurosamente con criterios técnicos como competencia del personal, trazabilidad metrológica, control de incertidumbre y manejo de datos (International Organization for Standarization, 2017).

Adoptar los principios de ISO/IEC 17025 aporta beneficios importantes: incrementa la confianza de clientes y entidades reguladoras, permite reconocimiento internacional de resultados y reduce la necesidad de pruebas repetidas, optimizando costos y tiempos operativos. Aunque en este proyecto no se busca la acreditación formal, aplicar sus conceptos tales como trazabilidad de instrumentos, control de medidas y procedimiento de incertidumbre, la cual contribuye a fortalecer la validez experimental y la calidad metodológica del módulo educativo diseñado (International Organization for Standarization, 2017).

2.3.4. ASTM Manual 7 – MNL7-E13

El tratamiento estadístico de los datos experimentales requiere normas especializadas distintas de las normas de ensayo mecánico. Para evaluar la repetibilidad, la dispersión de los resultados y la confiabilidad de las mediciones obtenidas en repeticiones sucesivas, se emplean los lineamientos del ASTM Manual 7 – MNL7-E13 (ASTM International, 2016b), el cual constituye la referencia estándar para el análisis estadístico y la representación de resultados en ensayos mecánicos.

Este manual establece las bases conceptuales y prácticas para el uso de parámetros como la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV), permitiendo cuantificar la variabilidad relativa de una serie de mediciones respecto a su promedio. A partir del CV, el documento define criterios objetivos de aceptación que permiten determinar si una serie de valores presenta una dispersión estadísticamente aceptable bajo condiciones controladas:

- CV < 10 %: se considera dispersión baja y plenamente aceptable, indicando que el método de ensayo y el sistema de medición presentan una repetibilidad adecuada.
- CV entre 10 % y 15 %: se clasifica como variabilidad moderada o marginalmente aceptable, atribuible generalmente a factores geométricos, pequeñas desalineaciones o condiciones de montaje que pueden introducir ligeras diferencias entre repeticiones.
- CV > 15 %: se interpreta como variabilidad elevada y no aceptable, sugiriendo la necesidad de revisar el montaje, el alineamiento, las condiciones de carga o la calibración del equipo, ya que compromete la confiabilidad del ensayo.

La incorporación de estos criterios es fundamental para validar la consistencia de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de pandeo, asegurando que las diferencias observadas entre mediciones sucesivas se mantengan dentro de los márgenes estadísticos aceptados internacionalmente.

2.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL TORNILLO DE AVANCE

2.4.1. Geometría de roscas ISO y parámetros

La rosca métrica ISO de 60° es un estándar ampliamente utilizado en mecanismos de transmisión de potencia y movimiento. Su geometría está definida por el diámetro nominal d, el paso p y el ángulo de flanco $2\alpha = 60°$. A partir de estos parámetros se determinan dimensiones derivadas críticas: el diámetro medio d_my el diámetro de núcleo d_3, obtenidos mediante expresiones geométricas normalizadas:

$$d_m \approx d - 0.9382\,p \quad \text{y} \quad d_3 \approx d - 1.2269 \tag{2.19}$$

Donde:

- d = diámetro nominal del tornillo (mm)
- p = paso de la rosca (mm)
- d_m = diámetro medio de la rosca (mm)
- d_3 = diámetro de núcleo o diámetro menor del tornillo (mm)

El diámetro medio resulta especialmente relevante en el análisis de fricción y transmisión de par, ya que sobre esta superficie se concentra el contacto entre los flancos de la rosca, mientras que el diámetro de núcleo gobierna la resistencia del tornillo frente a esfuerzos combinados de tracción y torsión, siendo por tanto determinante en la evaluación de esfuerzos equivalentes.

Asimismo, el ángulo de hélice de la rosca constituye un parámetro fundamental para el análisis del comportamiento del tornillo como mecanismo de conversión de movimiento rotacional en desplazamiento axial. Este ángulo se define a partir de la relación entre el paso y el diámetro medio de la rosca, mediante:

$$\tan \lambda = \frac{p}{\pi d_m} \tag{2.20}$$

Donde:

- λ = ángulo de hélice de la rosca (rad o°)
- p = paso de la rosca (mm)
- d_m = diámetro medio de la rosca (mm)

El ángulo de hélice influye directamente en el rendimiento mecánico del tornillo, en el par requerido para aplicar la carga axial y en la condición de autobloqueo del sistema, siendo un factor determinante para garantizar que el mecanismo no experimente deslizamiento espontáneo bajo carga.

Estas relaciones acorde a Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) permiten caracterizar de forma precisa la geometría efectiva de la rosca para su posterior empleo en el análisis de transmisión de carga, cálculo de par de accionamiento y evaluación de esfuerzos en el núcleo del tornillo, asegurando coherencia entre el diseño geométrico y el comportamiento mecánico del sistema de ensayo de pandeo.

2.4.2. Criterio de autobloqueo

El autobloqueo de un tornillo constituye una condición esencial para garantizar la estabilidad del sistema bajo carga estática, ya que impide que la carga axial aplicada genere un movimiento inverso no controlado del tornillo una vez que cesa el accionamiento externo. En sistemas de aplicación de carga, como los módulos de ensayo de pandeo, esta característica resulta fundamental para mantener la posición de la probeta durante el proceso de medición, evitando pérdidas de carga por retroceso del mecanismo.

Para roscas de perfil en V, como la rosca métrica ISO de 60°, la condición de autobloqueo se expresa mediante la relación entre el ángulo de hélice de la rosca y la fricción en los flancos, de acuerdo con:

$$\tan \lambda \leq \mu \sec \alpha \tag{2.21}$$

Donde:

- λ = ángulo de hélice de la rosca (rad o °)
- μ = coeficiente de fricción entre las superficies de la rosca (adimensional)
- α = semiángulo del perfil de la rosca (°), siendo $2\alpha=60^\circ$ para rosca métrica estándar
- sec α = inverso del coseno del ángulo α (adimensional)

Acorde a Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008), cuando se cumple esta condición el tornillo presenta comportamiento autoblocante, lo que significa que la carga axial no es capaz de inducir rotación inversa del tornillo en ausencia de torque externo. Este comportamiento es particularmente importante en dispositivos de ensayo, ya que contribuye a la estabilidad posicional del sistema, reduce la necesidad de mecanismos adicionales de bloqueo y mejora la repetibilidad de las mediciones de carga durante el ensayo de pandeo.

2.4.3. Par de accionamiento y fricción helicoidal

El par requerido para accionar un tornillo sometido a carga axial se determina a partir del equilibrio de momentos entre la fuerza aplicada, la geometría helicoidal de la rosca y las fuerzas de fricción que se desarrollan en los flancos del filete. Este análisis permite cuantificar el torque mínimo necesario para vencer simultáneamente el componente axial de la carga y la resistencia por fricción durante el avance del tornillo.

El par de accionamiento se expresa mediante:

$$T = P^* \frac{d_m}{2}(\tan\lambda + \mu \sec\ \alpha) \tag{2.22}$$

Donde:

- T = par (torque) requerido para accionar el tornillo (N.m)
- P* = carga axial aplicada (N)
- dm = diámetro medio de la rosca (mm)
- λ = ángulo de hélice (rad o °)
- μ = coeficiente de fricción en la rosca (adimensional)
- α = semiángulo del perfil de la rosca (°)

Esta ecuación acorde a Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) deriva del equilibrio de fuerzas y momentos en un elemento diferencial del filete de la rosca, integrando tanto la componente normal de la fuerza axial como los efectos de fricción sobre el plano inclinado equivalente que representa la hélice. En consecuencia, el valor del par requerido depende no solo de la magnitud de la carga aplicada, sino también de la geometría del tornillo y de las condiciones de contacto superficial.

En el diseño del módulo educativo de ensayo de pandeo, la estimación adecuada del par de accionamiento resulta esencial para garantizar que el sistema pueda ser operado manualmente sin esfuerzo excesivo, manteniendo al mismo tiempo la capacidad de aplicar de forma progresiva y controlada la carga axial sobre la probeta. Asimismo, este análisis permite dimensionar correctamente la longitud de la palanca de accionamiento y verificar que el operador pueda alcanzar la carga máxima de ensayo dentro de condiciones ergonómicas aceptables.

2.4.4. Esfuerzo cortante por torsión

El esfuerzo cortante máximo que se desarrolla en el núcleo del tornillo debido a la aplicación de un torque se determina mediante la teoría clásica de torsión para ejes circulares macizos. Este esfuerzo es particularmente relevante en tornillos de potencia, ya que el núcleo del tornillo es la sección más crítica desde el punto de vista resistente, al concentrar los mayores esfuerzos cuando se transmite par.

El esfuerzo cortante máximo se expresa como:

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_3^3} \tag{2.23}$$

Donde:

- τ = esfuerzo cortante máximo por torsión en el núcleo del tornillo (MPa)
- T = par torsor aplicado al tornillo (N·m)
- d_3 = diámetro de núcleo (diámetro menor) del tornillo (mm)

Según Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) esta relación se deriva directamente de la teoría de torsión elástica para ejes circulares macizos, donde el esfuerzo cortante varía linealmente con el radio y alcanza su máximo en la superficie externa del núcleo. En el caso de tornillos roscados, el uso del diámetro de núcleo resulta apropiado debido a que los filetes no contribuyen significativamente a la resistencia torsional y, además, actúan como concentradores de esfuerzo.

En el diseño del módulo educativo de ensayo de pandeo, la evaluación del esfuerzo cortante por torsión es necesaria para verificar que el tornillo de avance pueda transmitir el par requerido para aplicar la carga axial sin riesgo de falla por corte, especialmente considerando que el tornillo trabaja simultáneamente bajo carga axial y torque. Este análisis constituye un paso previo indispensable para la evaluación posterior del esfuerzo equivalente mediante el criterio de Von Mises.

2.4.5. Esfuerzo equivalente de Von Mises

Para evaluar la resistencia del tornillo frente a estados de tensiones combinadas producidas por la acción simultánea de carga axial y torque, se aplica el criterio de Von Mises, también conocido como criterio de energía de distorsión. Este criterio permite transformar un estado tensional multiaxial en una tensión equivalente uniaxial, que puede ser comparada directamente con el límite de fluencia del material.

El esfuerzo equivalente de Von Mises se expresa como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_c^2 + 3\tau^2} \tag{2.24}$$

Donde:

- σ_{VM} = esfuerzo equivalente de Von Mises (MPa)

- σ_c = esfuerzo normal (por carga axial) en el núcleo del tornillo (MPa)
- τ = esfuerzo cortante máximo por torsión en el núcleo del tornillo (MPa)

Este criterio de energía de distorsión, acorde a Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) permite comparar el estado tensional combinado (axial y cortante) con el límite de fluencia del material. Es ampliamente utilizado en elementos estructurales sometidos a esfuerzos multiaxiales, garantizando que la solicitación se mantenga en el rango elástico seguro.

En el contexto del módulo educativo de ensayo de pandeo, esta verificación resulta esencial para asegurar que el tornillo de avance no experimente deformación plástica durante la aplicación de la carga máxima de ensayo, garantizando la integridad del mecanismo, la repetibilidad de las pruebas y la seguridad del operador. Asimismo, este análisis permite confirmar que el dimensionamiento del tornillo es adecuado frente a solicitaciones combinadas, condición que no podría evaluarse correctamente considerando únicamente esfuerzos axiales o torsionales de manera independiente.

2.4.6. Área resistente de la rosca

La resistencia axial efectiva de un tornillo se evalúa considerando el área mínima de la sección transversal que realmente transmite la carga, la cual corresponde al núcleo del tornillo en la zona de la rosca. Esta sección es crítica debido a que el perfil roscado reduce el área resistente respecto al diámetro nominal, concentrando mayores esfuerzos en el diámetro menor.

El área resistente de la rosca se expresa como:

$$A_s = \frac{\pi}{4}(d_3)^2 \tag{2.25}$$

Donde:

- A_s = área resistente de la rosca (área tensil) (mm^2)
- d = diámetro nominal del tornillo (mm)
- p = paso de la rosca (mm)

Este valor acorde a Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) corresponde al área mínima efectiva que transmite la carga axial y sirve de base para la verificación de esfuerzos

axiales y de servicio. Su uso es estándar en diseño de uniones roscadas y dispositivos de transmisión de carga.

En el diseño del módulo educativo de ensayo de pandeo, el uso del área resistente basada en el diámetro de núcleo permite evaluar con mayor seguridad el comportamiento del tornillo de avance bajo la carga máxima de ensayo, evitando la subestimación de los esfuerzos y garantizando que el componente no alcance el régimen plástico durante la operación normal del equipo.

2.4.7. Palanca de operación y torque manual

El torque aplicado manualmente al tornillo de avance se genera mediante una palanca de operación, a través de la cual el operador transmite una fuerza al sistema. El valor del torque disponible depende directamente de la magnitud de la fuerza ejercida y de la longitud efectiva de la palanca, de acuerdo con la relación fundamental del momento:

$$T = F_h \times L \tag{2.26}$$

Donde:

- T = torque (par) aplicado manualmente mediante palanca (N·m)
- F_h = fuerza manual aplicada en el extremo de la palanca (N)
- L = longitud efectiva de la palanca (m)

Este principio acorde a Gere y Goodno (Gere & Goodno, 2009) permite adaptar el diseño de los mecanismos a las capacidades ergonómicas humanas, incrementando el brazo de momento disponible y reduciendo la fuerza requerida para generar un determinado torque. En aplicaciones de operación manual, el dimensionamiento adecuado de la palanca resulta esencial para asegurar condiciones seguras y repetibles de operación, evitando la fatiga del operador y reduciendo el riesgo de movimientos bruscos durante el proceso de aplicación de carga.

En el caso del módulo educativo de ensayo de pandeo, este análisis permite seleccionar una longitud de palanca que garantice la posibilidad de alcanzar la carga de ensayo prevista, manteniendo un control progresivo del incremento de carga, lo cual es fundamental para observar el comportamiento de inestabilidad de la probeta sin introducir efectos dinámicos indeseados.

2.4.8. Reparto de carga entre hilos

El número de filetes de rosca que participan efectivamente en la transmisión de la carga axial depende de la longitud de acople entre el tornillo y la tuerca, así como del paso de la rosca. Una estimación inicial del número de hilos en contacto se obtiene mediante:

$$n = \frac{L_e}{p} \tag{2.27}$$

Donde:

- n = número de filetes (hilos) de rosca en contacto
- L_e = longitud efectiva de acople entre tornillo y tuerca (mm)
- p = paso de la rosca (mm)

Sin embargo, según Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) la distribución real de la carga axial entre los hilos no es uniforme, concentrándose una fracción significativa de la carga en los primeros filetes próximos a la cabeza del tornillo o a la cara de la tuerca. Esta concentración se debe a la deformación elástica diferencial entre el tornillo y la tuerca, lo que provoca que los primeros hilos soporten mayores esfuerzos que los filetes posteriores.

Por esta razón, aunque el valor de n representa el número total de hilos en contacto, el diseño debe asegurar que la longitud de acople sea suficiente para que la carga se distribuya adecuadamente y no se produzcan fallas por aplastamiento de rosca o por corte de filetes. En aplicaciones de transmisión de carga, como el tornillo de avance del módulo educativo de ensayo de pandeo, una longitud de acople adecuada contribuye a reducir concentraciones de esfuerzo, incrementar la vida útil del mecanismo y mejorar la confiabilidad del sistema durante ensayos repetidos.

2.5. ELEMENTOS CRÍTICOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL

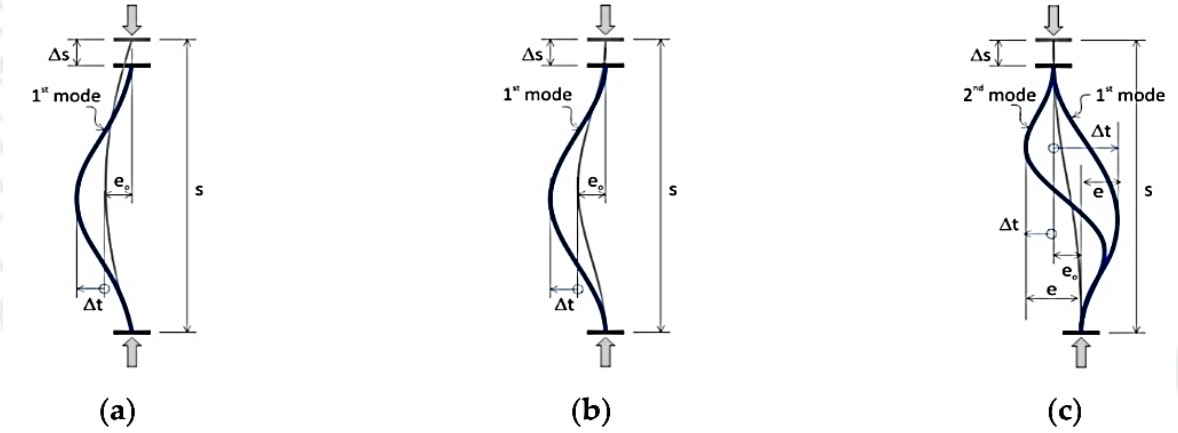
2.5.1. Probetas: características geométricas y normativas

El diseño geométrico y las condiciones normativas de las probetas son fundamentales para garantizar la validez técnica y pedagógica de los ensayos de pandeo. De acuerdo con la norma ASTM E9-19 (ASTM International, 2019), en los ensayos de compresión de materiales metálicos se exige que las superficies de carga sean perfectamente planas y paralelas, asegurando una distribución uniforme de esfuerzo axial y evitando fallas locales o inestabilidades inducidas por errores geométricos.

Además, la influencia de imperfecciones geométricas iniciales en la capacidad de pandeo de elementos es una cuestión crítica. El estudio de Korentz (Korentz, 2020) en *Materials* expone cómo la forma, la amplitud y la esbeltez de las imperfecciones reducen significativamente la resistencia al pandeo, especialmente cuando la relación supera ciertos valores críticos. Esto evidencia la necesidad de fabricar probetas con tolerancias mínimas y control estricto de la esbeltez para evitar resultados experimentales erráticos.

En la Figura 2.5 se representan los tres modos principales de pandeo en columnas delgadas: (a) deformación por flexión (modo clásico), (b) deformación por compresión axial concentrada, y (c) modo mixto con deformación por corte. Estos comportamientos dependen de la geometría de la probeta, las condiciones de carga y las imperfecciones iniciales, factores que deben controlarse rigurosamente en ensayos normados.

Figura 2.5 Modos de pandeo en probetas según el tipo de deformación predominante



Nota. Tomado de Korentz (2020, p. 11).

Por otro lado, investigaciones sobre estructuras metálicas delgadas destacan que la dirección, magnitud y combinación de imperfecciones afectan directamente la carga crítica de pandeo. Un análisis en *Thin-Walled Structures* desarrollado por Quan et al. (Quan et al., 2024) resaltan que las curvas de pandeo *(buckling curves)* integran tanto las imperfecciones geométricas como las tensiones residuales, subrayando la importancia de diseñar probetas alineadas con estos parámetros para lograr altos niveles de fiabilidad experimental y comparabilidad con modelos numéricos normativos.

2.5.2. Dinamómetro: función y selección

El dinamómetro, en el contexto de los ensayos estructurales, actúa como sensor de fuerza que cuantifica la carga aplicada durante experimentaciones físicas con probetas. Su función principal es registrar la magnitud de la carga de compresión axial, lo cual es esencial para determinar el comportamiento del material frente al pandeo y establecer con precisión la carga crítica de inestabilidad.

Para asegurar resultados válidos y trazables, los dinamómetros deben calibrarse y verificarse conforme a la norma ASTM E4, que establece los requisitos para la verificación estática de equipos de ensayo de fuerza, incluidas las celdas de carga (ASTM International, 2016a). Asimismo, cuando las pruebas involucran cargas variables, la norma ASTM E467-21 exige que el sistema se someta a verificación dinámica, ya que errores como histéresis o vibraciones pueden comprometer la precisión de la medición en ensayos cíclicos o graduales.

En la selección técnica, es esencial elegir dinamómetros acordes al rango de fuerza estimado y con resolución adecuada (usualmente un error $\leq \pm 1\,\%$). Además, se debe considerar la frecuencia natural del sensor y su compatibilidad con el sistema de adquisición de datos. Estudios sobre instrumentación reportan que los sensores pueden alcanzar frecuencias operativas de hasta 100 *Hz* sin degradación de señal, lo cual es suficiente para ensayos lentos de compresión utilizados en pandeo (ASTM International, 2010). Además, tecnologías más avanzadas como sistemas de celda de carga con sensores de galgas extensiométricas han demostrado ser eficaces al integrar fácilmente registro digital, interfaces Arduino o SCADA, lo que favorece tanto el control experimental como el aprendizaje práctico en entornos académicos.

2.5.3. Registro de datos: carga y modo de falla

El registro de la curva carga-desplazamiento en los ensayos de pandeo resulta esencial para determinar la carga crítica que induce la inestabilidad estructural. Meza et al. ((Meza et al., 2020) desarrollaron un estudio experimental sobre columnas frías ensambladas, capturando lecturas precisas de carga y desplazamiento mediante sensores calibrados. Los autores observaron que la discrepancia entre los resultados empíricos y los modelos analíticos fue inferior al 10 %.

Asimismo, en dicho estudio se identificaron diversos modos de falla estructural, tales como el pandeo local, distorsional o global, en función del espaciamiento de los conectores

y de las imperfecciones geométricas iniciales. Las observaciones visuales y los sensores permitieron correlacionar cada patrón de deformación con su respectiva resistencia a la carga, proporcionando evidencia sobre la interacción entre elementos y su influencia en el comportamiento ante el pandeo.

Por su parte, los sistemas de adquisición de datos en tiempo real, como las celdas de carga digitales y los extensómetros, han sido ampliamente valorados por su precisión al registrar la evolución estructural durante el ensayo. Franklin et al. ((Franklin et al., 2022) sostienen que estas herramientas permiten analizar fenómenos como la plastificación progresiva, la pérdida de rigidez y la aparición de modos de falla no lineales, lo que incrementa la fiabilidad del análisis experimental y facilita su comparación con simulaciones numéricas.

2.6. ESTADO DEL ARTE DE MÓDULOS EDUCATIVOS DE PANDEO

El desarrollo de módulos educativos físicos ha cobrado relevancia en la enseñanza de la ingeniería estructural, particularmente en el estudio de fenómenos como el pandeo en barras esbeltas. Esta tendencia responde a la necesidad de incorporar herramientas pedagógicas que faciliten la comprensión de conceptos estructurales complejos mediante experiencias experimentales manipulativas. El fundamento teórico de estos módulos se sustenta en los principios del aprendizaje experiencial, que integran la acción práctica con la reflexión guiada, permitiendo a los estudiantes observar e interpretar fenómenos estructurales de manera tangible. En este sentido, Tembrevilla et al. (Tembrevilla et al., 2024) plantean que un módulo educativo eficaz articula tres elementos esenciales: la experiencia concreta, la observación reflexiva y la conceptualización teórica. Esta integración permite que el alumno no solo visualice comportamientos estructurales, como el pandeo, sino que desarrolle la capacidad de interpretarlos con base en modelos mecánicos formales.

El enfoque experimental ha demostrado ser especialmente útil en la enseñanza de temas como la resistencia de materiales. Huan et al. (Huan et al., 2020) evidenciaron que los métodos activos basados en la experimentación mejoran significativamente la comprensión de la deformación y la estabilidad estructural. A su vez, Gutiérrez-Gómez (Gutiérrez-Gómez, 2023) observó que la participación en laboratorios experimentales potencia el desarrollo de habilidades transversales y genera un incremento del 25 % en el rendimiento académico en comparación con métodos exclusivamente teóricos. Rivera (Rivera, 2023), por

su parte, destacó que los entornos prácticos aumentan la motivación intrínseca y favorecen la construcción de modelos mentales precisos, fundamentales en el aprendizaje de fenómenos físicos complejos como el pandeo.

Sin embargo, pese a sus ventajas pedagógicas, los módulos educativos enfrentan limitaciones estructurales y económicas. Achuthan y Murali (Achuthan & Murali, 2015) señalaron que los laboratorios físicos, si bien son efectivos, suelen requerir infraestructura costosa, restringiendo su adopción en instituciones con recursos limitados. Piven (Piven, 2019) advirtió además que muchos diseños carecen de escalabilidad y replicabilidad, lo que dificulta su implementación en contextos más amplios. Incluso cuando se reconocen los beneficios del aprendizaje activo, como advierte Tembrevilla et al. (Tembrevilla et al., 2024), su integración curricular resulta escasa debido a la falta de protocolos estandarizados y documentación didáctica formalizada.

Para superar estas barreras, diversos estudios han propuesto alternativas de bajo costo y alta accesibilidad. Wong et al. (Wong et al., 2024) demostraron que los Low-Cost Desktop Learning Modules (LCDLMs) incrementan la participación y el rendimiento estudiantil. De manera similar, Rouble et al. (Rouble et al., 2024) desarrollaron WinterLab, un sistema portátil que permite trasladar la experiencia experimental fuera del laboratorio tradicional, promoviendo la autonomía del estudiante. Desde una perspectiva más global, Masters (Masters, 2024) propuso el enfoque de "Frugal Education", que promueve el diseño de módulos físicos robustos y replicables con materiales económicos, permitiendo democratizar el acceso a la enseñanza práctica. Estos enfoques convergen en la importancia de diseñar módulos educativos que combinen interactividad física, portabilidad, bajo costo y validez pedagógica.

En paralelo, el estado del arte en el estudio del pandeo ha evolucionado hacia el análisis experimental de nuevas configuraciones, materiales y condiciones de borde. Aboufika y Moustafa (Aboukifa & Moustafa, 2022) realizaron ensayos a escala real en columnas de concreto de ultra alta resistencia (UHPC), concluyendo que los métodos de diseño tradicionales sobreestiman la capacidad axial, lo que sugiere ajustes normativos. Li et al. (Li et al., 2022) mostraron cómo el refuerzo externo con CFRP puede retrasar el pandeo y modificar los modos de falla en columnas compuestas. En tanto, Hamoda et al. (Hamoda et al., 2023) estudiaron la resistencia residual de barras dañadas, mientras que (Syed & Goldack, 2023) evidenciaron que la esbeltez incide más drásticamente en columnas reforzadas con FRP que en aquellas con refuerzo de acero. Vy y Mahendran (Vy &

Mahendran, 2020) confirmaron que condiciones deficientes de apoyo reducen significativamente la carga crítica, lo que refuerza la necesidad de cumplir los criterios de la norma ASTM E9-19.

La Figura 2.6 muestra una máquina de ensayos universales de tipo *dual-column floor-standing*, empleada en estudios experimentales de columnas esbeltas de UHPC. Este equipo permite aplicar cargas de gran magnitud de manera controlada, garantizando la precisión en la medición de la respuesta estructural y facilitando la validación de los modelos de pandeo a escala real.

Figura 2.6 Máquina de ensayos universales de tipo dual-column-floor-standing

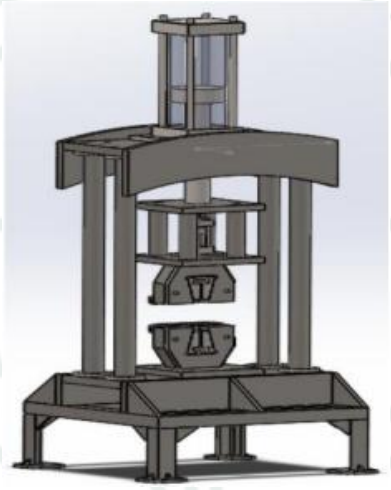


Nota. Tomado de Aboukifa y Moustafa (2022, p. 4).

Diversas iniciativas latinoamericanas también han contribuido a la mejora de la enseñanza experimental del pandeo. Cóndor y Quispe (Cóndor & Quispe, 2021) desarrollaron en Perú una máquina de ensayo universal adaptada a prácticas estudiantiles conforme a ASTM E8, mientras que Arguello (Arguello, 2023) en Ecuador modernizó una máquina de compresión didáctica con sistemas de carga ajustados a la norma ASTM E9. En contraste, en Alemania, Selvaggio et al. (Selvaggio et al., 2020) diseñaron un laboratorio remoto para ensayos de compresión con adquisición de datos en tiempo real, y Rivero et al. (Rivero et al., 2020) demostraron la viabilidad de fabricar máquinas accesibles para el estudio de biomateriales, extrapolables a otros contextos estructurales.

La Figura 2.7 presenta la máquina de ensayo diseñada por Cóndor y Quispe (Cóndor & Quispe, 2021), desarrollada bajo la norma ASTM E8. Este equipo constituye un aporte académico importante, ya que permite realizar ensayos de tracción estandarizados en probetas metálicas, garantizando condiciones controladas y comparables con lineamientos internacionales.

Figura 2.7 Máquina de ensayo diseñada por Cóndor y Quispe



Nota: Tomado de Cóndor y Quispe (2021, p. 64).

En todos los casos, la norma ASTM E9-19 ha servido como pilar técnico para estandarizar los procedimientos de ensayo en materiales metálicos. Investigaciones como las de Nasution et al. (Nasution et al., 2024), Vy y Mahendran (Vy & Mahendran, 2020), Dos Santos et al. (dos Santos et al., 2012), Zhang y Young (Zhang & Young, 2018), Roy et al. (Roy et al., 2019) y Zhong et al. (Zhong et al., 2021) utilizaron esta normativa para asegurar la alineación, la preparación de muestras y el control de carga en condiciones reproducibles. La adopción creciente de ASTM E9-19 en América Latina; ante la ausencia de normativas propias; ha sido clave para validar experimentalmente módulos de compresión, incluso en universidades con recursos limitados como la Pontificia Universidad Católica del Perú, que incorporó sensores de carga y desplazamiento en módulos experimentales de hasta 500 N.

No obstante, se identifican vacíos significativos en los equipos disponibles. Equipos comerciales como los de TecQuipment o Edibon, si bien cumplen con ASTM E9-19, resultan inaccesibles para muchas instituciones. Además, un análisis comparativo de veinte estudios reveló que más del 60 % no especifica la norma empleada, el 45 % no cuenta con

instrumentación digital adecuada y solo el 25 % permite ajustes en las condiciones de frontera. Estas brechas evidencian la necesidad de diseñar un módulo educativo accesible, replicable y alineado a la normativa vigente, que permita realizar ensayos de pandeo bajo condiciones técnicas controladas en entornos universitarios latinoamericanos.

2.7. METODOLOGÍA DE DISEÑO

El diseño del módulo educativo para la realización de ensayos de pandeo en barras esbeltas se fundamentará en una metodología estructurada que guíe de forma lógica y técnica cada una de las decisiones de ingeniería necesarias para su desarrollo. Esta metodología está basada en los principios propuestos por Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008), Mott (Mott, 2006), Norton (Norton, 2009) y Hibbeler (Hibbeler, 2011), autores clásicos en el campo del diseño mecánico. Su aplicación permite garantizar que el producto final no solo cumpla con su propósito funcional, sino que sea seguro, fabricable y didácticamente efectivo. A continuación, se detallan las nueve directrices que orientarán el proceso de diseño.

1) Definición del problema: ¿Qué necesita hacer la máquina?

   La primera etapa consiste en identificar con precisión el problema técnico y pedagógico que el diseño busca resolver. En este caso, se trata de desarrollar un dispositivo experimental que permita a los estudiantes observar y analizar el fenómeno de pandeo elástico en barras esbeltas, bajo condiciones técnicas normadas y con posibilidad de control sobre variables clave como la longitud efectiva, el tipo de apoyo y el material de la probeta. Esta necesidad responde a una brecha detectada en el laboratorio actual, que carece de equipos adecuados para esta práctica. Definir el problema en términos funcionales y operativos permitirá establecer objetivos claros para el diseño, priorizar criterios de desempeño y delimitar el alcance del proyecto, tal como lo establece Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) en su enfoque de ingeniería centrada en la necesidad.

2) Síntesis de mecanismos: ¿Qué mecanismo de movimiento se necesita?

   La segunda fase se centrará en establecer los principios de funcionamiento mecánico que permitirán cumplir la función definida. En este caso, se proyecta utilizar un mecanismo de carga vertical basado en un husillo roscado con accionamiento manual, capaz de generar una compresión axial gradual y

alineada sobre las probetas. La selección de este mecanismo responde a su simplicidad, bajo costo y facilidad de control por parte del usuario. Además, el diseño incluirá sistemas de sujeción y guías verticales que permitan variar la longitud efectiva de las probetas sin comprometer la alineación. También se considerarán adaptadores que posibiliten cambios rápidos entre condiciones de frontera (empotramiento o articulación). Esta etapa de síntesis mecánica; según Norton (Norton, 2009) implica combinar elementos estructurales, cinemáticos y funcionales para dar lugar a un sistema cohesivo, seguro y operable.

3) Análisis de fuerzas: ¿Qué fuerzas actuarán sobre los componentes?

En esta etapa se realizará un análisis predictivo de las cargas internas y externas que soportarán los componentes del módulo durante su uso. Se contempla una carga axial máxima de 2500 N aplicada sobre las probetas, lo cual generará reacciones en los puntos de apoyo, esfuerzos de compresión en el husillo y posibles flexiones en la estructura de soporte. Adicionalmente, se analizarán las solicitaciones por momentos flectores inducidos por pequeñas excentricidades, los efectos de la rigidez de la base y la transmisión de carga a través de los adaptadores. El análisis estructural, basado en los principios de equilibrio de fuerzas y momentos descritos por Hibbeler (Hibbeler, 2011), permitirá dimensionar cada componente considerando no solo la resistencia, sino también la rigidez necesaria para evitar deformaciones que alteren la validez del ensayo.

4) Selección de materiales: ¿Qué materiales se requieren?

Una vez estimadas las solicitaciones, se procederá a seleccionar los materiales más adecuados para cada componente del sistema, considerando tanto criterios mecánicos como de fabricación y disponibilidad. Para la estructura principal del módulo se contempla el uso de acero estructural A36, por su alta rigidez ($E \approx 200$ GPa), buena soldabilidad y resistencia al desgaste por uso repetido. Las probetas experimentales serán fabricadas en acero, aluminio y bronce, lo cual permitirá analizar la variación del comportamiento frente al pandeo en función del módulo de elasticidad del material. Asimismo, se evaluará el uso de polímeros técnicos o cauchos para elementos no estructurales, como topes o bases antideslizantes. Este proceso de selección material, siguiendo las recomendaciones de Mott (Mott, 2006), garantiza que el equipo responda

adecuadamente a las exigencias mecánicas y a las condiciones reales de laboratorio.

5) Análisis de fallas: ¿Cómo evitar que la máquina se dañe?

El diseño buscará prevenir todo tipo de falla funcional o estructural mediante un enfoque proactivo. Se identificarán los modos potenciales de falla; como plastificación local, aplastamiento de adaptadores, desalineación axial, pandeo no intencional de componentes o sobrecarga del husillo; y se propondrán soluciones para cada uno. Se establecerán factores de seguridad adecuados (FS ≥ 2.0) para los elementos estructurales y se diseñarán los apoyos con geometrías que reduzcan el riesgo de concentraciones de tensión. También se considerará la aplicación precisa de carga para evitar solicitaciones no previstas por excentricidad o fricción. Este enfoque preventivo, ampliamente desarrollado por Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008), asegura que el dispositivo sea seguro, duradero y confiable incluso en condiciones de uso académico intensivo.

6) Dimensionamiento de componentes: ¿Qué dimensiones mínimas deben tener las piezas?

A partir del análisis de fuerzas y de los materiales seleccionados, se procederá al dimensionamiento de cada componente del módulo. Esto incluye determinar el diámetro del husillo, las secciones de las columnas guía, el espesor de las bases estructurales, las dimensiones de los adaptadores de sujeción y el tamaño de las platinas de fijación. El diseño buscará no solo garantizar la resistencia estructural, sino también mantener una rigidez mínima que evite deformaciones apreciables que afecten la medición experimental. Se utilizarán ecuaciones de esfuerzo y deformación para cada componente, considerando los casos de carga axial, flexión y contacto, según corresponda. Este proceso, según Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008) y Mott (Mott, 2006), es esencial para que la máquina cumpla sus funciones sin sobredimensionar innecesariamente, lo que podría encarecer o dificultar su fabricación.

7) Consideraciones de fabricación: ¿Cómo se construirá la máquina?

Durante la etapa de diseño se tendrá en cuenta la factibilidad de fabricación del módulo dentro del entorno universitario, utilizando tecnologías disponibles como corte por sierra o plasma, doblado, fresado, torneado y soldadura. Se

priorizarán geometrías simples y componentes estandarizados que faciliten el ensamblaje y minimicen la necesidad de mecanizados complejos. También se considerará la posibilidad de desmontaje para mantenimiento o mejora futura. La máquina será diseñada para ser manufacturable con recursos locales, sin necesidad de recurrir a procesos costosos o de alta especialización. Esta perspectiva de "diseño para manufactura" es fundamental para garantizar la viabilidad práctica del proyecto, según lo propuesto por Mott (Mott, 2006) y la normativa técnica aplicada en el diseño de equipos didácticos.

8) Tolerancias y ajustes: ¿Cómo garantizar que las piezas encajen correctamente?

El diseño contemplará desde el inicio las tolerancias geométricas y dimensionales necesarias para asegurar un ensamblaje preciso. Se proyectarán ajustes tipo H7/g6 u otros equivalentes para garantizar el encaje correcto entre husillo, placas, adaptadores y guías. Además, se definirán las tolerancias de perpendicularidad y planitud en las superficies de carga, lo cual es esencial para asegurar que la fuerza aplicada sea axial pura y evitar errores sistemáticos en los ensayos. Estos controles dimensionales permitirán también minimizar juegos indeseados, holguras que afecten la alineación o fricciones que alteren la curva carga-desplazamiento. El control adecuado de ajustes y tolerancias mecánicas es, como indica Mott (Mott, 2006), una parte esencial del diseño funcional de máquinas.

9) Prototipos y pruebas: ¿Cómo se validará el diseño final?

Como etapa final del proceso de diseño, se considera la elaboración de un prototipo funcional del módulo educativo, el cual será utilizado para validar el desempeño del sistema bajo condiciones experimentales representativas. Este prototipo permitirá verificar si los componentes funcionan correctamente, si la carga se aplica de forma axial y si los resultados obtenidos son consistentes con los modelos teóricos de pandeo, como el de Euler. Para ello, se realizarán ensayos con distintas longitudes efectivas y condiciones de apoyo, evaluando la repetibilidad y precisión del equipo. Esta etapa responde al principio de verificación del diseño mediante prueba experimental, el cual, según Mott (Mott, 2006), es fundamental para confirmar que el producto cumple con los requisitos operativos establecidos antes de su implementación definitiva.

CAPÍTULO III

DISEÑO CONCEPTUAL

3. DISEÑO CONCEPTUAL

El desarrollo del módulo educativo para ensayos de pandeo se realizó siguiendo una metodología de diseño de ingeniería estructurada en etapas secuenciales, orientadas a garantizar que el equipo cumpla con los requisitos funcionales, de seguridad y de operatividad establecidos. Esta metodología se basa en el proceso clásico de diseño mecánico, que comprende las fases de identificación de necesidades, definición de requerimientos, generación de alternativas conceptuales, selección de soluciones, diseño preliminar y verificación mediante análisis técnico.

En este enfoque, la primera etapa corresponde a la identificación de las funciones que debe cumplir el equipo y de las condiciones de operación, lo cual permite establecer los requerimientos técnicos y de seguridad que orientan el diseño. Posteriormente, se desarrolla la conceptualización del sistema, donde se analizan distintas configuraciones de aplicación de carga, medición de fuerza, sujeción de probetas y soporte estructural, evaluando alternativas viables para cada subsistema. A partir de esta evaluación, se seleccionan las soluciones más adecuadas que conforman el concepto general del módulo.

Posterior a ello, se elabora un diseño preliminar que integra los subsistemas seleccionados y permite definir la configuración global del equipo, sirviendo como base para los análisis estructurales, la selección de materiales y el dimensionamiento definitivo que se desarrollan en el Capítulo IV, incluyendo la verificación mediante análisis analítico y simulación por elementos finitos (FEA). De este modo, el presente capítulo aborda las etapas de diseño conceptual y preliminar, mientras que la verificación estructural, el análisis de esfuerzos y el diseño de detalle se tratan de manera específica en el capítulo siguiente.

Esta metodología garantiza coherencia entre los requerimientos iniciales del sistema y las soluciones técnicas implementadas, asegurando que el diseño final responda adecuadamente a los objetivos funcionales del módulo educativo y a las condiciones reales de ensayo.

3.1. FUNCIONES Y REQUERIMIENTOS DE LA MÁQUINA

El módulo educativo deberá cumplir un conjunto de funciones que, en el nivel conceptual, se plantean como requerimientos operativos y técnicos. Estos buscan garantizar la fidelidad del fenómeno de pandeo, la validez de las prácticas y la seguridad de los usuarios.

3.1.1. Sujeción y configuración de apoyos

El diseño deberá contemplar sistemas que permitan reproducir diferentes condiciones de apoyo en los extremos de la probeta, ya sean empotradas, articuladas o combinadas, con el propósito de representar distintos escenarios de ensayo, por lo que, estos sistemas deberán garantizar la sujeción adecuada y la correcta transmisión de esfuerzos, evitando alteraciones que desvirtúen el fenómeno a estudiar. De esta manera, se busca que el módulo refleje con fidelidad la influencia de las condiciones de apoyo en la estabilidad de la barra.

3.1.2. Ajuste de la longitud útil

El módulo deberá permitir modificar la distancia entre apoyos de manera sencilla y segura, estableciendo y manteniendo la posición seleccionada durante el ensayo sin introducir inestabilidades. Este ajuste será esencial para analizar el efecto de la longitud en el comportamiento de pandeo bajo diferentes configuraciones de apoyo.

3.1.3. Admisión y preparación de probetas

El equipo deberá estar preparado para admitir probetas con secciones geométricas compatibles con el estudio del pandeo elástico, el sistema de fijación deberá garantizar que la muestra quede correctamente centrada y alineada, evitando desviaciones o torsiones iniciales que alteren los resultados del ensayo, de esta manera se asegurará que cada probeta esté lista para ser cargada bajo condiciones uniformes.

3.1.4. Aplicación de carga axial controlada

La máquina deberá aplicar una carga axial de manera gradual y estable hasta que la probeta alcance su estado crítico; el sistema de aplicación de carga axial deberá asegurar que la fuerza se transmita de forma uniforme, preservando la condición de compresión pura. Con ello se busca que el proceso de carga sea confiable y representativo del fenómeno de pandeo.

3.1.5. Medición de carga

El diseño deberá contemplar un sistema de medición capaz de registrar en tiempo real la carga aplicada, ofreciendo lecturas claras y confiables que sirvan como referencia válida para la verificación experimental de la teoría. Con ello se facilita la identificación del punto crítico del ensayo y el análisis del fenómeno de pandeo.

3.1.6. Alineación y centrado de la carga

El módulo deberá garantizar que la carga se aplique de manera axial y alineada, evitando desviaciones que alteren el comportamiento de la probeta, de esta forma se busca que la inestabilidad observada corresponda únicamente al pandeo global y no a efectos derivados de una aplicación incorrecta de la carga.

3.1.7. Seguridad operativa

El módulo deberá garantizar condiciones de seguridad durante el desarrollo de los ensayos, de modo que tanto el usuario como los componentes involucrados se encuentren protegidos en todo momento; el diseño conceptual deberá prever que la operación del equipo sea confiable y adecuada para su uso en un entorno educativo, reduciendo posibles riesgos durante la práctica.

3.1.8. Reconfiguración rápida

El diseño deberá prever la posibilidad de cambiar de una configuración de ensayo a otra de manera ágil y sin procedimientos complejos, de este modo, el equipo podrá adaptarse con facilidad a distintas prácticas educativas, garantizando la continuidad de los ensayos y la comparación inmediata entre diferentes condiciones de trabajo.

3.2. CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO

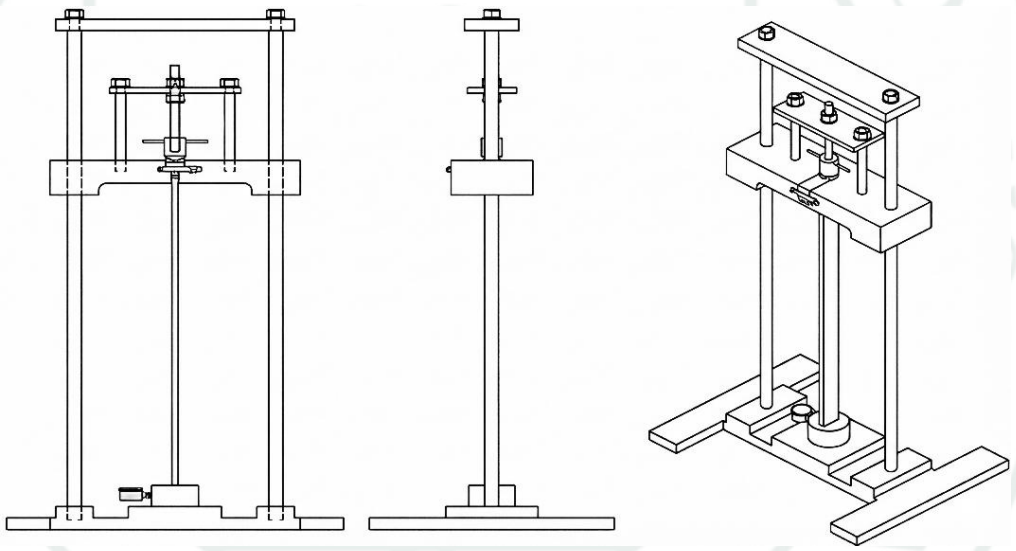
El sistema deberá concebirse como un conjunto de subsistemas con funciones específicas, cuya integración habrá de posibilitar la configuración del ensayo de pandeo conforme a los objetivos formativos planteados. En esta etapa se proyecta la identificación general de dichos subsistemas y la consideración de alternativas de funcionamiento, con la finalidad de esbozar lineamientos preliminares que orientarán el proceso de diseño. De este modo, se prevé el establecimiento de criterios conceptuales que servirán de referencia en el desarrollo posterior del módulo educativo.

3.2.1. Alternativas de diseño conceptual del módulo educativo de pandeo

a) **Alternativa mecánica:** En esta alternativa de diseño la aplicación de la carga axial se realiza mediante un sistema mecánico de tornillo de avance accionado manualmente, integrado a un bastidor estructural rígido. Esta configuración permite analizar la transmisión progresiva de la carga desde el mecanismo de accionamiento hasta la probeta, así como la interacción funcional entre los

elementos de sujeción y la estructura portante. Desde el punto de vista operativo, el sistema transforma el movimiento rotacional en un desplazamiento axial controlado, favoreciendo la aplicación gradual de la carga, la cual se podrá observar a través de un dinamómetro o celda de carga y la observación del fenómeno de pandeo en probetas esbeltas. Asimismo, el modelo puede incorporar elementos mecánicos ajustables que permiten representar distintas condiciones de apoyo, contribuyendo al análisis de la estabilidad, alineación y funcionalidad general del equipo en un entorno de laboratorio educativo, dicha alternativa se puede apreciar en la Figura 3.1.

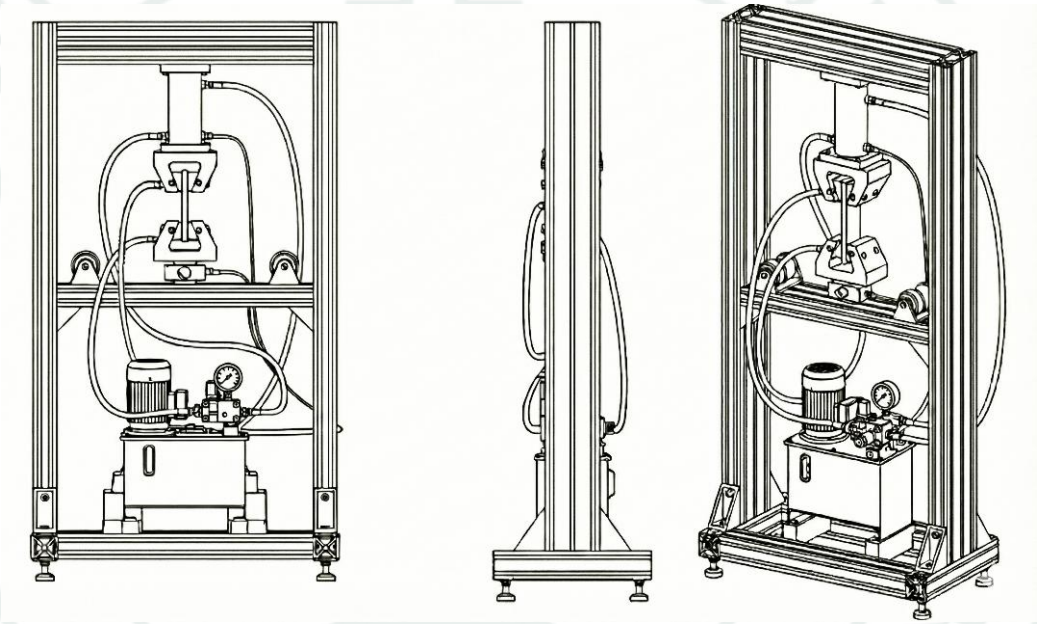
Figura 3.1 Modelo conceptual de la alternativa mecánica del módulo educativo para ensayos de pandeo



b) Alternativa hidráulica: En esta alternativa de diseño la aplicación de la carga axial se realiza mediante un sistema hidráulico compuesto por una bomba, un cilindro hidráulico y un circuito de conducción de fluido, integrados a un bastidor estructural rígido. En esta configuración, tanto el actuador principal como las mordazas de sujeción de la probeta son accionados hidráulicamente, permitiendo analizar la transformación de la presión del fluido en fuerza axial aplicada sobre el elemento ensayado, cuya carga aplicada se puede visualizar a través de un dinamómetro o celda de carga, además de permitir visualizar el fenómeno de pandeo en la probeta ensayada. Desde el punto de vista operativo, el

desplazamiento lineal del vástago del cilindro posibilita la aplicación progresiva de la carga, mientras que el accionamiento hidráulico de las mordazas asegura una sujeción controlada de la probeta. Esta propuesta del módulo educativo permite la alineación del eje de carga y la funcionalidad general del equipo en un entorno de laboratorio educativo, la representación de esta alternativa se puede apreciar en la Figura 3.2.

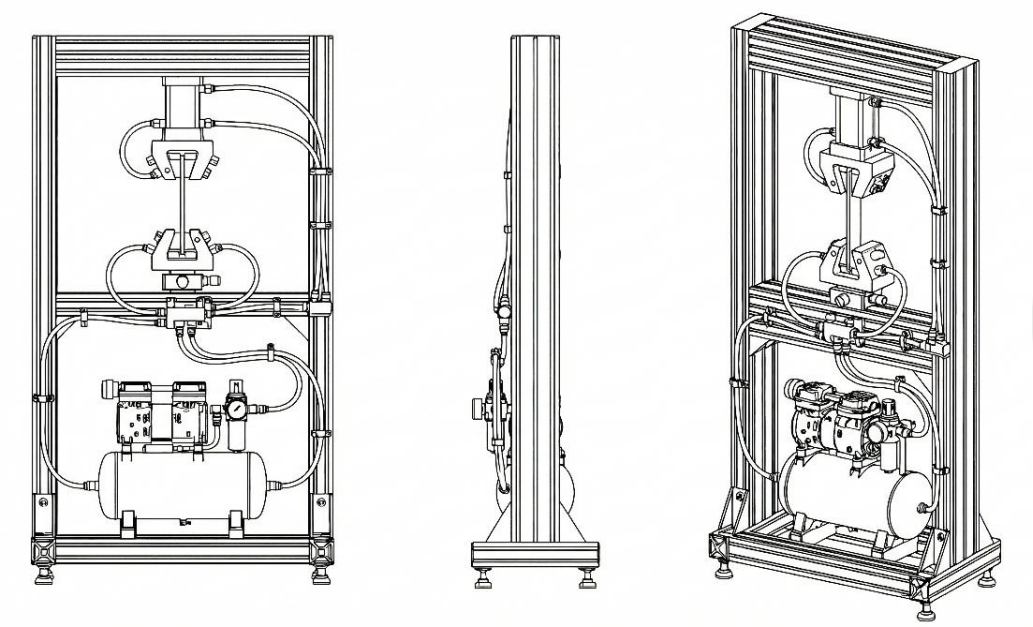
Figura 3.2 Modelo conceptual de la alternativa hidráulica del módulo educativo para ensayos de pandeo



c) **Alternativa neumática:** En esta alternativa de diseño la aplicación de la carga axial se realiza mediante un sistema neumático compuesto por un compresor, actuadores neumáticos y elementos de control y conducción de aire comprimido, integrados a un bastidor estructural rígido. En esta configuración, tanto el actuador principal como las mordazas de sujeción de la probeta son accionados neumáticamente, transformando la presión del aire en fuerza axial aplicada sobre el elemento ensayado. Desde el punto de vista operativo, el desplazamiento lineal del vástago del actuador posibilita la aplicación progresiva de la carga la cual se puede medir a través de un dinamómetro o celda de carga, además de posibilitar la visualización del fenómeno de pande en la probeta ensayada, mientras que el accionamiento neumático de las mordazas asegura una sujeción controlada de la

probeta, asimismo, el modelo permite la alineación del eje de carga y la funcionalidad general del equipo en un entorno de laboratorio educativo, cuya representación se puede apreciar en la Figura 3.3.

Figura 3.3 Modelo conceptual de la alternativa neumática del módulo educativo para ensayos de pandeo



3.2.2. Aplicación de carga axial

Este subsistema será responsable de generar y transmitir la fuerza de compresión necesaria para inducir el pandeo en la probeta. Deberá concebirse de manera que permita aplicar la carga de forma gradual y controlada, manteniendo la alineación con el eje longitudinal. Asimismo, habrá de adaptarse a probetas de distintas longitudes y condiciones de apoyo, con el fin de reducir posibles desviaciones y asegurar la reproducibilidad de los ensayos. Para la selección de la alternativa más adecuada, se establecieron criterios técnicos y se efectuó una ponderación comparativa, tal como se detalla en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Ponderación de alternativas para aplicación de carga axial

Criterio	Ponderación	Alternativa Mecánica	Alternativa Hidráulica	Alternativa Neumática
Funcionalidad	3	3	2	2
Seguridad	5	5	4	3
Costo	2	2	1	1
Eficiencia	3	3	3	3
Eficacia	3	3	2	2
Mantenibilidad	4	4	2	1
Total	20	**20**	**7**	**6**

Nota. En esta tabla, la ponderación asignada a cada criterio varía del 1 al 5, donde 1 indica menor importancia y 5 la máxima relevancia dentro de la evaluación. Los puntajes muestran el desempeño de cada alternativa en función de esos criterios, siendo los valores más altos los que reflejan mejores resultados.

Los resultados de la ponderación de la Tabla 3.1 muestran que la alternativa mecánica con husillo manual alcanza 20 puntos de 20 posibles, evidenciando un desempeño sobresaliente frente a la hidráulica (14 puntos) y la neumática (12 puntos). Este puntaje máximo confirma que la mecánica es la alternativa óptima, al combinar precisión en la aplicación de carga, alta seguridad y un costo reducido. La opción hidráulica, si bien cumple con el criterio de seguridad, se ve penalizada por un mayor costo relativo y menor eficiencia. La neumática obtiene la menor puntuación por sus limitaciones en seguridad y costo, lo que la hace poco recomendable para un módulo educativo.

3.2.3. Medición de fuerza

Este subsistema tendrá la función de registrar la carga aplicada sobre la probeta durante el ensayo, proporcionando lecturas claras y comprensibles para el usuario. Deberá concebirse de manera que facilite la observación de los valores de fuerza y contribuya a la fiabilidad de los resultados obtenidos. Con ello se garantizará que la información generada sea adecuada para el análisis y la verificación experimental del fenómeno de pandeo. Para este fin, se establecieron criterios de evaluación técnica y se realizó una ponderación comparativa, como se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Ponderación de alternativas para medición de fuerza

Criterio	Ponderación	Dinamómetro Analógico	Dinamómetro Digital	Celda de Carga
Precisión	4	3	4	4
Fiabilidad	3	3	2	2
Costo	3	3	2	2
Eficiencia	3	3	3	3
Eficacia	3	3	2	2
Mantenibilidad	4	4	2	2
Total	20	**19**	**15**	**15**

Nota. En esta tabla, la ponderación asignada a cada criterio varía del 1 al 5, donde 1 indica menor importancia y 5 la máxima relevancia dentro de la evaluación.

En este caso, la alternativa analógica (dinamómetro analógico) obtiene 18 puntos de 20 posibles, superando a la opción digital (16 puntos) y a la celda de carga (14 puntos). Aunque la digital destaca en precisión, la analógica logra un mejor equilibrio global al ofrecer buena exactitud, alta fiabilidad, menor costo y gran mantenibilidad. En un contexto educativo, donde la robustez y la sencillez son fundamentales, esta opción garantiza lecturas estables y económicas. La celda de carga, pese a su tecnología avanzada, requiere mayor inversión y mantenimiento especializado, reduciendo su conveniencia.

3.2.4. Configuración y fijación de probetas

Este subsistema deberá concebirse para permitir la fijación de las probetas de acuerdo con las diferentes condiciones de apoyo requeridas en el ensayo, como configuraciones empotradas o articuladas. Su función será asegurar que las probetas se mantengan en la posición adecuada, garantizando que las condiciones de frontera correspondan a las previstas en el diseño experimental. Por lo tanto, para la elección de la alternativa más adecuada, se establecieron criterios de evaluación técnica y se realizó una ponderación comparativa, tal como se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Ponderación de alternativas para configuración y fijación de probetas

Criterio	Ponderación	Alternativa Mecánica	Alternativa Hidráulica	Alternativa Neumática
Ajustabilidad	4	4	3	3
Seguridad	3	3	3	2
Costo	3	3	1	1
Eficiencia	3	3	3	3
Eficacia	3	3	2	2

Mantenibilidad	4	4	2	2
Total	20	**20**	**14**	**13**

Nota. En esta tabla, la ponderación asignada a cada criterio varía del 1 al 5, donde 1 indica menor importancia y 5 la máxima relevancia dentro de la evaluación. Los puntajes muestran el desempeño de cada alternativa en función de esos criterios, siendo los valores más altos los que reflejan mejores resultados.

La alternativa mecánica de mordazas adaptables alcanza 20 puntos de 20 posibles, superando ampliamente a la hidráulica (15 puntos) y a la neumática (13 puntos). Este resultado refleja que el sistema mecánico es la mejor opción para garantizar ajustabilidad, seguridad y bajo costo en la fijación de probetas, además de ofrecer una mantenibilidad sencilla. La hidráulica, aunque segura y ajustable, incrementa significativamente los costos de implementación y mantenimiento. La neumática, por su parte, ofrece rapidez en el montaje, pero a costa de menor seguridad y mayor costo relativo, lo que la convierte en la alternativa menos recomendable.

3.2.5. Base estructural y guías

Este subsistema deberá concebirse como el soporte principal del módulo, encargado de aportar estabilidad y rigidez al conjunto. Su diseño habrá de permitir la disposición adecuada de los demás componentes y facilitar la adaptación del equipo a los diferentes modos de ensayo previstos. Asimismo, se proyecta que la estructura asegure la correcta integración de los sistemas de aplicación y medición de carga, sin generar interferencias que comprometan el desarrollo de la práctica.

3.2.6. Criterios de modelado estructural y simplificaciones adoptadas

En el diseño del módulo educativo para ensayos de pandeo se priorizará el análisis de los componentes directamente involucrados en la transmisión de la carga axial hacia la probeta, considerando que el objetivo principal del equipo será reproducir el fenómeno de inestabilidad elástica en barras esbeltas bajo compresión. En este contexto, el tornillo de avance, los cubos de apoyo y las columnas principales serán modelados principalmente bajo solicitaciones axiales, dado que el sistema de guiado mantendrá la alineación del eje de carga durante la mayor parte del ensayo.

Si bien durante el instante de pandeo se producirá una deflexión lateral súbita de la probeta, dicha deformación no se transmitirá de manera significativa al tornillo de avance ni al sistema de guiado, debido a que la inestabilidad ocurrirá predominantemente en el elemento

ensayado y no en la estructura portante del módulo. Además, la masa y rigidez del conjunto del puente guía y de las columnas limitarán la amplificación de esfuerzos secundarios asociados a la flexión transitoria generada por el colapso elástico de la probeta.

Por tal motivo, el análisis estructural se centrará en garantizar la resistencia a compresión de los elementos principales del sistema de carga, adoptando un enfoque conservador y coherente con el carácter educativo del equipo. Esta simplificación será consistente con prácticas habituales en el diseño de dispositivos de laboratorio de bajo rango de carga, donde la estabilidad global del bastidor dominará el comportamiento estructural frente a efectos dinámicos locales de corta duración.

En consecuencia, no se realizará un análisis específico de flexión secundaria en la guía roscada, al considerarse que su influencia en la integridad estructural del módulo y en la medición de la carga crítica será despreciable frente al fenómeno principal de pandeo de la probeta, el cual constituirá el objeto de estudio del presente trabajo.

3.2.7. Alcances del análisis estructural del sistema de carga

En el presente trabajo, el análisis estructural mediante simulación por elementos finitos se orientará principalmente a evaluar la capacidad resistente de los componentes del sistema de carga frente a solicitaciones axiales, considerando que el objetivo funcional del módulo educativo será reproducir el fenómeno de pandeo en la probeta y no el comportamiento estructural detallado del bastidor ante cargas dinámicas transitorias. Durante el proceso de aplicación de la carga, el tornillo de avance, el puente porta tornillo y las columnas principales trabajarán predominantemente bajo compresión, manteniéndose alineados gracias al sistema de guías verticales y al puente guía superior.

Si bien durante el instante de pandeo se producirá una deflexión lateral súbita de la probeta, dicho evento se concentrará en el elemento ensayado y no generará una redistribución significativa de esfuerzos en el sistema de transmisión de carga, debido a la elevada rigidez del bastidor y a la restricción geométrica impuesta por el sistema de guiado. En consecuencia, no se considerará dominante el efecto de flexión secundaria sobre la guía roscada ni sobre la placa portadora del tornillo, dado que estos efectos serán de corta duración y no gobernarán el diseño estructural del equipo.

Esta simplificación resultará coherente con el propósito educativo del módulo, donde se priorizará la estabilidad global del sistema, la seguridad operativa y la correcta medición de la

carga crítica de pandeo, adoptándose criterios conservadores en el dimensionamiento de los componentes estructurales principales.

3.2.8. Alternativas seleccionadas en los subsistemas del diseño

La síntesis de resultados obtenida mediante el análisis de ponderación permite identificar la alternativa más adecuada para cada subsistema del módulo educativo de pandeo, estas elecciones se fundamentan en criterios técnicos como funcionalidad, seguridad, costo, eficacia, eficiencia y mantenibilidad, garantizando que el diseño conceptual no solo sea viable en términos constructivos, sino también seguro, económico y funcional en un entorno académico. La selección final de cada subsistema se resume de manera ordenada en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Alternativas seleccionadas por subsistema

Subsistema	**Alternativa ganadora**
Aplicación de carga axial	Sistema mecánico con husillo manual
Medición de fuerza	Sistema de medición analógica (dinamómetro analógico)
Configuración y fijación de probetas	Sistema mecánico de mordazas adaptables
Marco estructural y ajuste de orientación	Estructura mecánica con bastidor y columnas guía

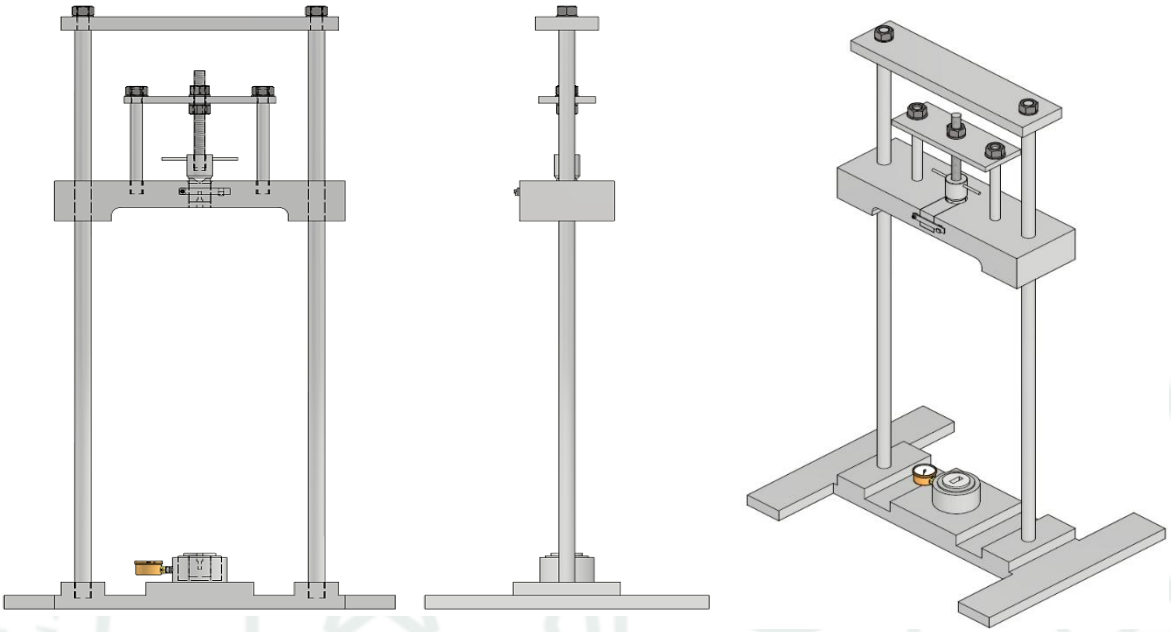
La tabla 3.4 muestra que las soluciones de tipo mecánico predominan en tres de los cuatro subsistemas evaluados, debido a su sencillez constructiva, bajo costo relativo y alta mantenibilidad. El único caso en el que se selecciona una opción distinta es en la medición de fuerza, donde el dinamómetro analógico supera a la digital por su fiabilidad, menor costo y facilidad de uso. En conjunto, esta síntesis confirma que la estrategia de diseño debe orientarse principalmente hacia mecanismos de operación manual y estructuras robustas, complementadas con sistemas analógicos de medición, garantizando así un equipo accesible, durable y coherente con los fines educativos del proyecto.

3.3. BOSQUEJO PRELIMINAR DEL MÓDULO EDUCATIVO PARA ENSAYOS DE PANDEO

En esta etapa se proyectará un bosquejo preliminar del módulo educativo, concebido únicamente como una representación inicial de su posible configuración. Dicho bosquejo, mostrado en la Figura 3.4, tiene el propósito de visualizar de manera general la disposición de los principales subsistemas y orientar las decisiones posteriores de diseño. De esta forma, se

dispone de una referencia conceptual que servirá como punto de partida para el desarrollo detallado del equipo.

Figura 3.4 Modelo conceptual preliminar del módulo educativo para ensayos de pandeo



CAPÍTULO IV

DISEÑO

4. DISEÑO

El presente capítulo desarrolla la ingeniería básica del módulo educativo de ensayo de pandeo, en el cual se definen los lineamientos normativos, los alcances del diseño preliminar y los criterios de seguridad aplicados. Esta etapa proyectiva tiene como finalidad verificar que los componentes principales del módulo trabajen bajo condiciones estructuralmente seguras y con un margen de sobre resistencia adecuado, antes de proceder a la fase de ingeniería de detalle y fabricación.

4.1. CONSIDERACIONES INICIALES DE DISEÑO

4.1.1. Marco normativo aplicable

El diseño básico del módulo educativo de ensayo de pandeo requiere sustentarse en un marco normativo que asegure la validez técnica de los procedimientos, la confiabilidad de los resultados y la pertinencia académica de las prácticas que se realicen. Por ello, se han considerado tres referencias esenciales que guían tanto la concepción estructural del módulo como su aplicación en el laboratorio:

- **ASTM E9-19 –** ***Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*****:** Esta norma establece los procedimientos estandarizados para los ensayos de compresión en materiales metálicos, su aplicación al módulo educativo es directa, ya que define los criterios de carga axial, la forma en que deben apoyarse las probetas y las condiciones de alineación que deben garantizarse durante el ensayo. De esta manera, se asegura que las prácticas realizadas con el módulo reproduzcan un método reconocido internacionalmente y que los resultados puedan ser interpretados con rigurosidad técnica.
- **AISC 360 –** ***Specification for Structural Steel Buildings*****:** Este documento regula el diseño de elementos en acero sometidos a cargas críticas, considerando resistencia, esbeltez y estabilidad global. En el módulo educativo, su pertinencia radica en la verificación de las columnas principales que transmiten la carga de ensayo. La aplicación de los criterios de esbeltez y factores de seguridad definidos por la AISC permite asegurar que el módulo sea capaz de sostener la carga proyectada sin presentar fallas estructurales, concentrando la inestabilidad únicamente en las probetas sometidas a pandeo.

- **ISO/IEC 17025 – Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración:** Aunque su alcance principal es la acreditación de laboratorios, esta norma resulta aplicable en el contexto educativo del módulo, ya que enfatiza la necesidad de trazabilidad, control de condiciones y aseguramiento de la calidad en los ensayos. Su integración garantiza que las prácticas realizadas con el equipo mantengan estándares compatibles con la metrología internacional, fortaleciendo la validez académica de los resultados y acercando el entorno de enseñanza a las exigencias de laboratorios profesionales acreditados.

En conjunto, estas normas aseguran que el módulo educativo no solo cumpla con criterios estructurales y de resistencia, sino que también proporcione un entorno de práctica confiable, alineado con estándares internacionales de diseño, ensayo y calidad. Gracias a esta integración normativa, los estudiantes pueden replicar de manera didáctica un procedimiento técnico riguroso y cercano a la práctica profesional.

4.1.2. Alcances y limitaciones del diseño básico

El diseño básico del módulo educativo de ensayo de pandeo constituye una etapa preliminar y proyectiva, en la que se definen los materiales tentativos, las dimensiones aproximadas de los componentes principales y los criterios normativos que orientan la verificación estructural. En esta fase no se contempla aún la fabricación definitiva del prototipo, sino que se busca establecer las bases técnicas necesarias para validar la factibilidad del diseño y garantizar que el equipo cumpla con su función didáctica en condiciones de seguridad.

El principal alcance de esta etapa es la verificación estructural de los elementos que conforman el módulo, con especial énfasis en las columnas principales, el soporte base, los puentes y el tornillo de avance. A partir de los cálculos analíticos y las simulaciones por elementos finitos, se busca comprobar que los esfuerzos y deformaciones se mantengan dentro de márgenes seguros y que la inestabilidad estructural ocurra únicamente en las probetas ensayadas, conforme al criterio planteado de esfuerzos cercanos a la décima parte de la resistencia del material con el cual estarán construidos los componentes de la máquina. Asimismo, se establecen las dimensiones preliminares de los componentes, que servirán como referencia para la elaboración de los planos de detalle en etapas posteriores.

No obstante, este nivel de diseño presenta limitaciones propias de su carácter preliminar. En primer lugar, las dimensiones propuestas deben entenderse como tentativas, sujetas a ajustes durante la ingeniería de detalle y la fabricación del prototipo. Del mismo modo, no se incluyen

aún las tolerancias de manufactura, acabados superficiales, procesos de soldadura ni controles metrológicos, los cuales corresponden a fases avanzadas del desarrollo del equipo. Por último, aunque las simulaciones numéricas permiten identificar zonas críticas y validar el comportamiento general del módulo, la confirmación definitiva de su desempeño deberá realizarse en la etapa experimental, una vez se cuente con el prototipo físico.

En síntesis, el diseño básico proporciona una plataforma técnica inicial sobre la cual se construirá el desarrollo completo del módulo. Sus resultados permiten anticipar el comportamiento estructural esperado y orientar las decisiones de ingeniería de detalle, pero deben ser entendidos como parte de un proceso iterativo en el que el prototipado y la validación experimental constituirán los pasos siguientes para consolidar el proyecto.

4.1.3. Lineamientos generales de seguridad y sobre resistencia

El diseño del módulo educativo de ensayo de pandeo debe responder a criterios de seguridad que aseguren que la inestabilidad o la falla se manifiesten únicamente en las probetas sometidas a carga y no en la estructura del equipo. Para ello, se adopta como lineamiento fundamental que los esfuerzos de trabajo en los componentes principales de la máquina se mantengan muy alejados del límite de resistencia del material con el que estarán fabricados dichos componentes.

De manera específica, se establece que los esfuerzos últimos proyectados deberán encontrarse cercanos a la décima parte de la resistencia del material estructural. Este criterio no implica un valor exacto, sino un orden de magnitud que garantice un amplio margen de sobre resistencia. Bajo este enfoque, el módulo podrá transmitir las cargas necesarias para inducir el pandeo en las probetas, mientras que su propia estructura conservará un nivel de esfuerzo seguro y controlado.

Asimismo, se consideran las siguientes premisas de seguridad:

- El diseño de las columnas principales debe asegurar que su carga crítica de pandeo sea significativamente superior a la carga de ensayo aplicada, evitando que la inestabilidad ocurra en la estructura del equipo.
- Las deformaciones globales del módulo deben mantenerse dentro de límites mínimos respecto a la longitud de los elementos, garantizando la alineación del sistema y la correcta aplicación de la carga.

- El sistema de transmisión de carga, incluido el tornillo de avance y los apoyos, debe trabajar con esfuerzos reducidos, de modo que se garantice la repetitividad de los ensayos y la durabilidad del equipo en el tiempo.

Con la aplicación de estos lineamientos, el diseño proyectivo del módulo se orienta hacia la seguridad operativa y el carácter didáctico del equipo, asegurando que los estudiantes puedan reproducir de manera confiable el fenómeno de pandeo sin comprometer la integridad del sistema ni la seguridad del usuario.

4.2. DEFINICIÓN DE MATERIALES Y GEOMETRÍA

En esta etapa del diseño básico se definen los materiales tentativos de construcción y las dimensiones proyectadas de los principales componentes que conforman el módulo educativo de ensayo de pandeo. La selección se realiza con el propósito de garantizar la resistencia estructural, la facilidad de fabricación y la coherencia con los criterios de sobre resistencia establecidos en el punto anterior.

4.2.1. Selección del material estructural

La definición del material estructural constituye uno de los aspectos más críticos en la etapa de ingeniería básica, ya que condiciona la resistencia, la durabilidad, la manufacturabilidad y la viabilidad económica del módulo educativo de ensayo de pandeo. Dado que este equipo está diseñado con fines académicos para reproducir el fenómeno de inestabilidad en probetas metálicas, resulta imprescindible que la máquina en sí misma presente un comportamiento estructural rígido y seguro, de modo que las fallas se concentren en las muestras ensayadas y no en sus componentes principales. Para ello, antes de seleccionar el material más adecuado, se establecieron criterios mínimos de desempeño que deben cumplirse en relación con las propiedades mecánicas, la facilidad de fabricación, la compatibilidad en uniones y la viabilidad práctica de construcción.

En primer lugar, se definió como requisito que el material presente un límite de fluencia mínimo de 200 MPa, valor que asegura que los componentes estructurales trabajen dentro del rango elástico bajo las cargas de ensayo sin riesgo de deformaciones plásticas prematuras. Este umbral es consistente con lo señalado en la literatura de diseño mecánico acorde a Callister y Rethwisch (Callister & Rethwisch, 2018) y Budynas y Nisbett (Budynas & Nisbett, 2008), que indica que los aceros estructurales comunes poseen límites de fluencia a partir de dicho rango.

En segundo lugar, se estableció una resistencia a la tracción mínima de 350 MPa, lo cual garantiza que los elementos del módulo puedan soportar solicitaciones globales adicionales, tales como tensiones combinadas o flexiones accidentales, sin riesgo de rotura frágil. Normas internacionales como la ASTM A36 y la ASTM A572 confirman que los aceros estructurales se encuentran en este rango o lo superan, lo que convierte a este criterio en una referencia técnica válida.

Adicionalmente, se establecieron criterios complementarios que refuerzan la selección:

- Ductilidad media–alta, para evitar fallas frágiles en caso de sobrecargas accidentales.
- Facilidad de maquinado y soldadura, que permita manufacturar el módulo en un taller universitario sin procesos especiales ni costosos.
- Compatibilidad con pernería normalizada y con otros materiales, indispensable para garantizar la integridad de uniones atornilladas y soldadas.
- Costo accesible y amplia disponibilidad local, que asegure la viabilidad económica y logística de la fabricación.

De esta manera, los requisitos mínimos aquí definidos no constituyen un estándar normativo estricto, sino un criterio proyectivo de diseño derivado de la literatura técnica y de las necesidades específicas del módulo educativo. A partir de ellos, se procede a la elaboración de un cuadro comparativo de materiales estructurales en el que se evalúan distintas alternativas tales como el acero ASTM A36, acero ASTM A572 Grado 50, aluminio 6061-T6 y fundición gris, con el fin de determinar cuál de ellas se ajusta mejor a los requerimientos técnicos, económicos y de manufactura del equipo propuesto. Dicha comparación se presenta de forma detallada en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Comparación de materiales estructurales propuestos

Criterio de evaluación	**Requisito mínimo para el módulo**	**Acero ASTM A36**	**Acero ASTM A572 Gr.50**	**Aluminio 6061-T6**	**Fundición gris**
Límite de fluencia (MPa)	≥ 200 MPa	248	345	240	130–200
		Cumple	**Cumple**	**Cumple**	**Presenta limitaciones**
Resistencia a tracción (MPa)	≥ 350 MPa	400–550	450–630	290–310	150–300
		Cumple	**Cumple**	**Presenta limitaciones**	**Presenta limitaciones**
	≈ 200 GPa	200	200	69	100–130

Módulo de elasticidad (GPa)		**Cumple**	**Cumple**	**Presenta Limitaciones**	**Presenta limitaciones**
Tenacidad / ductilidad	Media–alta (evitar falla frágil)	Alta	Media	Media	Baja
		Cumple	**Cumple**	**Cumple**	**Presenta Limitaciones**
Facilidad de maquinado	Media–alta	Alta	Media	Alta	Media
		Cumple	**Cumple**	**Cumple**	**Cumple**
Soldabilidad y compatibilidad de unión	Buena soldabilidad consigo mismo y con otros materiales	Excelente: se suelda fácilmente y es compatible con la mayoría de los aceros estructurales	Requiere mayor control y precalentamiento, menos compatible con aceros de baja aleación	Soldabilidad posible, pero limitada en compatibilidad con aceros (necesita aporte especial)	Soldabilidad deficiente y muy baja compatibilidad con otros metales
		Cumple	**Presenta limitaciones**	**Presenta limitaciones**	**Presenta limitaciones**
Compatibilidad con pernos y uniones normalizadas	Alta	Total (compatibilidad con pernería estándar)	Alta	Alta	Limitada (fragilidad en roscas)
		Cumple	**Cumple**	**Cumple**	**Presenta limitaciones**
Costo relativo	Bajo–medio	Bajo	Medio–alto	Alto	Bajo
		Cumple	**Presenta limitaciones**	**Presenta limitaciones**	**Cumple**
Disponibilidad local	Necesaria	Alta	Media	Limitada	Media
		Cumple	**Cumple**	**Presenta limitaciones**	**Cumple**

Como se observa en la Tabla 4.1 la comparación de materiales estructurales evidencia que el acero ASTM A36 se presenta como la alternativa más adecuada para la construcción del módulo educativo de ensayo de pandeo. Este material cumple de manera equilibrada con todos los criterios técnicos y prácticos previamente establecidos, al ofrecer un límite de fluencia superior a 200 MPa, una resistencia a la tracción en el rango de 400 a 550 MPa y un módulo de elasticidad cercano a 200 GPa, lo que asegura rigidez estructural y un desempeño confiable frente a cargas de compresión. Además, presenta una elevada ductilidad, lo que reduce el riesgo de fallas frágiles, y se caracteriza por su excelente soldabilidad y compatibilidad con otros aceros estructurales y elementos normalizados, garantizando uniones seguras y confiables.

En contraste, aunque el acero ASTM A572 Grado 50 ofrece valores superiores de resistencia mecánica, su costo más elevado y las mayores exigencias en los procesos de

soldadura limitan su conveniencia en un contexto académico, donde la sobre resistencia no compensa la complejidad añadida en fabricación. El aluminio 6061-T6, por su parte, destaca por su bajo peso y facilidad de maquinado, pero su módulo de elasticidad reducido, cercano a 70 GPa, lo hace inadecuado para un equipo en el que la rigidez es fundamental, además de implicar un costo considerablemente más alto. Finalmente, la fundición gris, a pesar de su bajo costo, muestra serias limitaciones, ya que no alcanza los niveles mínimos requeridos de resistencia y ductilidad, además de presentar una soldabilidad deficiente y escasa compatibilidad con otros metales, lo que comprometería la integridad del módulo.

De esta manera, el análisis comparativo permite concluir que el acero estructural ASTM A36 no solo satisface los requisitos mínimos planteados en términos de resistencia, rigidez y seguridad, sino que también garantiza viabilidad económica, facilidad de manufactura y amplia disponibilidad local, estas características lo convierten en la opción más recomendable y equilibrada para ser empleada en la construcción de los componentes principales del módulo educativo propuesto.

4.2.2. Geometría propuesta de los componentes principales

En el diseño básico del módulo educativo se establecen dimensiones tentativas para los principales componentes estructurales, con el fin de garantizar tanto la rigidez del conjunto como la versatilidad para la realización de distintos ensayos. Estas dimensiones cumplen un doble propósito: asegurar que el equipo soporte las cargas de ensayo sin comprometer su integridad y permitir que los estudiantes puedan experimentar con probetas de diferentes longitudes y configuraciones.

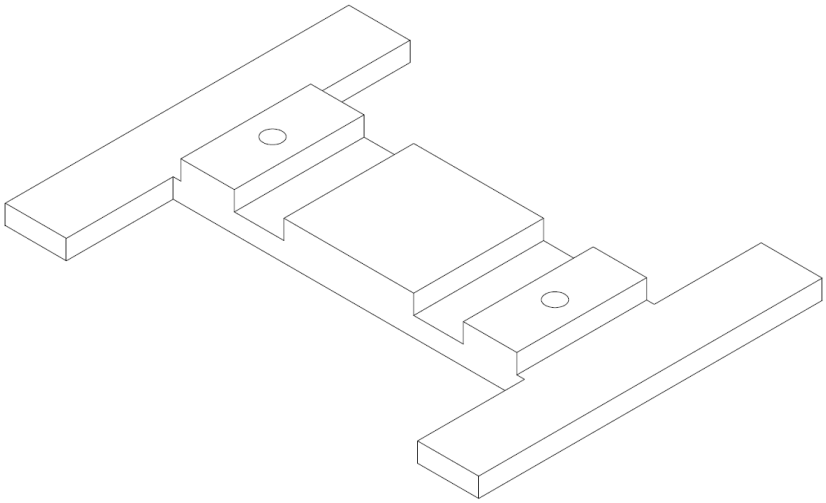
a) **Columnas principales:** constituyen elementos esenciales del módulo, ya que sostienen y guían el sistema de carga, manteniendo la alineación entre el tornillo de avance, los puentes y las probetas. Aunque no están destinadas a sufrir pandeo como las muestras ensayadas, deben poseer suficiente rigidez para evitar deformaciones indeseadas que alteren los resultados. Su longitud se proyecta en aproximadamente 1000 mm, lo que no solo contribuye a la estabilidad del conjunto, sino que también permite la colocación de probetas de distintas longitudes, haciendo que el módulo sea más versátil para fines didácticos, además se plantea un diámetro de 1 ¾ “. Este valor se plantea como tentativa y podrá ajustarse según los rangos de montaje y el tipo de probetas a emplear en el laboratorio, tal como se aprecia de manera esquemática en la Figura 4.1.

Figura 4.1 Bosquejo de columna principal



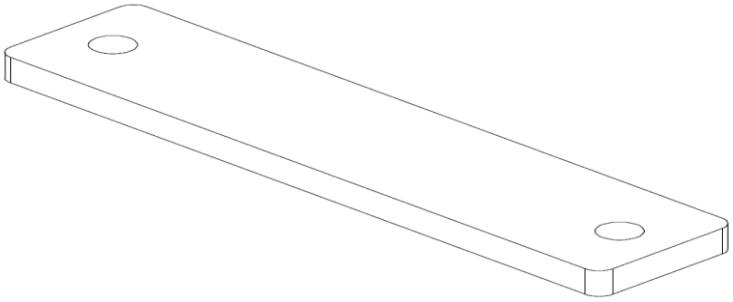
b) **Soporte base:** se concibe como una placa robusta destinada a transmitir de manera uniforme las cargas hacia el piso o bancada del laboratorio, evitando concentraciones de esfuerzo que puedan afectar la estabilidad del módulo, su geometría debe garantizar un apoyo firme y seguro, lo cual es fundamental en un entorno académico donde el equipo será utilizado de forma repetitiva por diferentes estudiantes, planteándose unas medidas de largo = 600 mm, ancho = 400 mm y un espesor = 25 mm. Además, su diseño debe facilitar el montaje y desmontaje de los componentes, contribuyendo a la comprensión práctica de los principios estructurales, tal como se ilustra de forma esquemática en la Figura 4.2.

Figura 4.2 Bosquejo de soporte base



c) **Puente de columnas principales:** se proyecta como el elemento que une la parte superior de las columnas, otorgando rigidez al conjunto y evitando desplazamientos laterales. Se plantean dimensiones de largo = 400 mm, ancho = 100 mm y espesor = 25 mm. Su sección y espesor están diseñados para resistir los esfuerzos de conexión y mantener la alineación vertical del sistema de carga, condición indispensable para que los estudiantes puedan observar el pandeo de la probeta en condiciones controladas, tal como se representa esquemáticamente en la Figura 4.3.

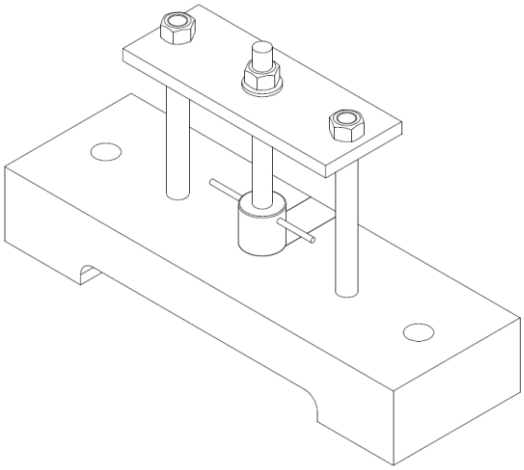
Figura 4.3 Bosquejo del puente de columnas principales



d) **Puente porta tornillo y guía para cubo superior:** tiene la función de alojar y sostener el tornillo de avance, de modo que la carga axial se transmita de manera simétrica y precisa hacia la probeta, cumple además el rol de mantener la correcta alineación entre el tornillo de avance y las probetas, minimizando desviaciones y excentricidades en la aplicación de la carga. De este modo, contribuye a que el fenómeno de pandeo se produzca de forma reproducible y didácticamente clara, asegurando que los estudiantes puedan identificar visualmente el efecto de la inestabilidad estructural. Para ello, se proyecta con un espesor suficiente que le permita soportar los esfuerzos locales de contacto sin presentar deformaciones que afecten la trayectoria del tornillo. Se plantean medidas de largo de 500 mm, ancho de 120 mm, espesor del puente porta tornillo de 20 mm y espesor de la guía de cubo superior de 50 mm. Adicionalmente, se considera que durante el instante de pandeo de la probeta puede generarse una desviación lateral súbita que induce esfuerzos secundarios transitorios sobre el conjunto del puente porta tornillo, sin embargo, dichos efectos no gobiernan el diseño estructural del componente, debido a que la inestabilidad ocurre predominantemente en la probeta, el cual es un elemento intencionalmente más esbelto y no en la estructura portante del módulo. La elevada rigidez flexional proporcionada por su espesor de 20 mm en la placa porta tornillo, así como su vinculación directa con las columnas principales, limita la amplificación de deformaciones laterales y permite disipar los esfuerzos inducidos sin comprometer la integridad del sistema de carga. En consecuencia, el análisis estructural se concentra en la resistencia a compresión y estabilidad global del conjunto, considerándose que las solicitaciones de flexión transitoria asociadas al pandeo súbito de la probeta no resultan críticas para el desempeño mecánico ni para la seguridad del equipo en el rango de cargas de operación del módulo educativo. Su diseño, además de garantizar resistencia,

busca facilitar la comprensión de los principios de transmisión de carga en sistemas mecánicos, tal como se aprecia esquemáticamente en la Figura 4.4.

Figura 4.4 Bosquejo del puente porta tornillo



e) **Tornillo de avance:** El diseño del tornillo de avance constituye un aspecto fundamental en la ingeniería básica del módulo educativo, ya que de este elemento depende la correcta transmisión de la carga hacia las probetas. A diferencia de otros componentes, el tornillo no está destinado a fallar por compresión, sino a garantizar que la carga se aplique de forma progresiva, controlada y segura, sin riesgo de daños en la rosca o deformaciones excesivas en el vástago. Por ello la selección la selección del diámetro y la rosca no puede ser arbitraria, sino que debe responder a criterios técnicos que aseguren tanto la resistencia mecánica como la funcionalidad operativa del sistema, lo cual se determinará en los siguientes puntos.

- **Selección del diámetro del tornillo de avance**

La selección racional del diámetro del tornillo para transmitir la carga axial de ensayo en el módulo educativo se realizó considerando las propiedades mecánicas del acero ASTM A36 y el criterio de servicio de la "décima parte de la falla", con el objetivo de asegurar un diseño seguro y eficiente. El procedimiento seguido se detalla a continuación:

1) Definición de datos de diseño

Para el dimensionamiento inicial se establecieron las cargas, propiedades del material y condiciones de operación representativas. La Tabla 4.2 resume los valores

adoptados y su justificación técnica, sirviendo como base para los cálculos de verificación estructural y de roscas.

Tabla 4.2 Datos de diseño y propiedades del tornillo de avance

Parámetro	Símbolo	Valor adoptado	Justificación
Carga nominal	P_{nom}	2.5 kN	Carga máxima prevista en el módulo
Carga de diseño (2 veces la carga nominal)	P^*	5.0 kN	Carga con factor de seguridad
Límite de fluencia	σ_y	248 MPa	Acero ASTM A36
Criterio de servicio	σ_{adm}	$0.1\sigma_y$= 24.8 MPa	"Décima parte de la falla"
Coeficiente de fricción	μ	0.25	Condición seca o poco lubricada
Ángulo de rosca ISO	α	30°	Normas métricas ISO
Paso de rosca	p	$0.125\,d$	Relación típica para tornillos métricos estándar
Longitud libre	L	170 mm	Para verificación de pandeo

2) Geometría básica de la rosca en función del diámetro d

En un tornillo ISO:

$$p = 0.125\,d$$

Diámetro medio d_m:

$$d_m = d - 0.9382\,p = d - 0.9382(0.125\,d) = d(1 - 0.1173) = 0.8827\,d$$

Diámetro del núcleo (raíz) d_3:

$$d_3 = d - 1.2269\,p = d - 1.2269(0.125\,d) = d(1 - 0.1534) = 0.8466\,d$$

Área resistente de la rosca A_s (Área de tensión de tracción):

$$A_s = \frac{\pi}{4}\,(d_m)^2 = \frac{\pi}{4}(0.8827\,d)^2$$

$$A_s = 0.7854 \times 0.7792 \times d^2 \approx 0.612\,d^2$$

Lo cual significa que el área resistente es aproximadamente 61.2 % del área de una sección maciza de diámetro d.

3) Par de accionamiento y fricción helicoidal

Antes de calcular esfuerzos, se necesita determinar el par que aparece al aplicar la carga axial a través de la rosca, el cual está dado por la siguiente fórmula:

$$T = P^* \frac{d_m}{2}(\tan\ \lambda + \mu \sec\ \alpha)$$

El ángulo de hélice de la rosca se calcula de la siguiente forma:

$$\tan\ \lambda = \frac{p}{\pi d_m} = \frac{0.125\ d}{\pi(0.8827\ d)} = \frac{0.125}{\pi \times 0.8827} \approx 0.0451$$

El término de fricción-hélice está dado por:

$$\tan\ \lambda + \mu \sec\ \alpha = 0.0451 + 0.25 \times 1.155 \approx 0.3338$$

El par requerido:

$$T = P^* \frac{d_m}{2}(\tan\ \lambda + \mu \sec\ \alpha)$$

$$T = 5000 \times \frac{0.8827\ d}{2} \times 0.3338$$

$$T = 5000 \times 0.1472\ d \Rightarrow T = 736\ d\ (N/m)$$

4) Cálculo de esfuerzos en el tornillo

Esfuerzo axial (compresión)

$$\sigma_c = \frac{P^*}{A_s} = \frac{5000}{0.612\ d^2}\ \text{(Pa)}$$

$$\sigma_c = \frac{0.005}{0.612\ d^2}\ \text{(MPa}$$

$$\sigma_c = \frac{0.00817}{d^2}\ \text{(MPa)}$$

Esfuerzo cortante por torsión

$$\tau = \frac{16\ T}{\pi d_3^3}$$

$$\tau = \frac{16\ (736\ d)}{\pi\ (0.8466\ d)^3}$$

$$\tau = \frac{11776\ d}{1.906\ d^3} = \frac{6179.5}{d^2}\ \text{(Pa)}$$

$$\tau = \frac{0.00618}{d^2} \text{ (MPa)}$$

Esfuerzo equivalente de Von Mises

$$\sigma_{\text{VM}} = \sqrt{\sigma_c^2 + 3\tau^2} = \frac{1}{d^2}\sqrt{(0.00817)^2 + 3(0.00618)^2}$$

$$\sigma_{\text{VM}} = \frac{0.01346}{d^2} \text{ (MPa)}$$

5) Aplicación del criterio de diseño

Se exige:

$$\sigma_{\text{VM}} \leq 0.1\,\sigma_y = 24.8 \text{ MPa}$$

$$\frac{0.01346}{d^2} \leq 24.8 \Rightarrow d^2 \geq \frac{0.01346}{24.8} \Rightarrow d^2 \geq 0.000543$$

$$d \geq \sqrt{0.000543} \approx 0.0233 \text{ m} = 23.3 \text{ mm}$$

Lo cual significa que el diámetro mínimo calculado para que el tornillo soporte 5 kN sin superar el 10 % de la fluencia es de 23.3 mm.

6) Selección normalizada

- Diámetro mínimo calculado: 23.3 mm
- Medida estándar más cercana: $d = 24$ mm = rosca M24
- Verificación con Von Mises para M24:

$$\sigma_{\text{VM}} = \frac{0.01346}{d^2} = \frac{0.01346}{0.024^2} \approx 24.6 \text{ MPa}$$

Por lo que el diámetro del tornillo de avance de diámetro de 24 mm cumple el criterio de servicio y además evita sobredimensionamientos innecesarios.

- **Selección de paso entre hilos del tornillo de avance**

Se evalúan tres pasos habituales en rosca M24 de 2, 3 y 5 mm bajo el mismo diámetro nominal $d = 24$ mm, con una carga de diseño $P^* = 5\,000$ N (2 veces el valor de carga nominal de 2 500 N), fabricado en acero ASTM A36 y con un coeficiente de fricción $\mu = 0.25$.

1) Geometría y parámetros por paso (M24)

Para rosca ISO de 60° (semiángulo $\alpha = 30°$):

$$d_m \approx d - 0.9382\,p,$$

$$d_3 \approx d - 1.2269\,p$$

$$\tan\,\lambda = \frac{p}{\pi d_m}$$

Con un $d = 24$ mm, se procede al reemplazo correspondiente en las fórmulas, como se muestra en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Geometría y parámetros de la rosca M24 para distintos pasos

Paso p	**d_m(mm)**	**d_3(mm)**	**$\tan\lambda$**
2 mm	22.12	21.55	0.0288
3 mm	21.19	20.32	0.0451
5 mm	19.31	17.87	0.0825

2) Autobloqueo

Para una rosca en V, el criterio de autobloqueo es:

$$\tan\lambda \leq \mu\,\sec\alpha$$

Con:

$$\mu = 0.25\;y\;\alpha = 30°$$

Entonces:

$$\mu\,\sec\alpha = 0.2887$$

Teniendo en cuenta que $\tan\lambda \leq \mu\,\sec\alpha$, entonces todos los pasos cumplen ya que son menores a 0.2887. Por lo que el autobloqueo no discrimina a ninguno, los tres pasos son seguros frente a retroceso.

3) Par de operación (ergonomía)

Teniendo en cuenta que el par requerido se calcula a través de la siguiente fórmula se procede a calcular el torque requerido para cada uno de los pasos entre hilos propuestos:

$$T \approx P^*\,\frac{d_m}{2}\,(\tan\,\lambda + \mu\sec\,\alpha).$$

Con $\mu\sec\ \alpha \approx 0.2887$y $P^* = 5{,}000$ N se tiene en la Tabla 4.4, los valores de torque estimados para cada paso analizado, información clave para evaluar el esfuerzo físico requerido durante la operación manual del sistema.

Tabla 4.4 Par de operación estimado para distintos pasos de rosca M24

p	T(N·m)
2 mm	≈ **17.5**
3 mm	≈ **17.7**
5 mm	≈ **17.9**

Considerando que la palanca a emplearse es de 0.20 de longitud y que va a quedar centrada en la base superior del tornillo, quedando 0.10 m por lado y se emplearán dos manos para la ejecución de la fuerza. Se tendría entonces que cada mano aplica una fuerza tangencial F_ha 0.10 m del eje, el momento total es la suma de los dos momentos:

$$T \ = \ F_h(0.10) + F_h(0.10) \ = \ 0.20\, F_h$$

$$\Rightarrow F_h = \frac{T}{0.20}$$

Sustituyendo en la fórmula el par de operación *T* calculado para cada paso entre hilos, se obtiene el esfuerzo manual requerido para accionar el tornillo de avance, tal como se presenta en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Par de operación y esfuerzo manual estimado para distintos pasos de rosca M24

p	T(N·m)	F_h (N)	F_h (kgf)
2 mm	≈ 17.5	87.5	≈ 9
3 mm	≈ 17.7	88.5	≈ 9
5 mm	≈ 17.9	89.5	≈ 9

La tabla 4.5 muestra que, para una palanca total de 0,20 m (0,10 m por lado) y una carga de 5 kN (2 veces el valor de la carga nominal), el par requerido y la fuerza

manual por mano se mantienen prácticamente insensibles al paso entre hilos de 2, 3 y 5 mm: el par varía apenas de ≈ 17,5 a ≈ 17,9 N·m y la fuerza por mano de ≈ 87,5 a ≈ 89,5 N equivalente a ≈ 9 kgf. En términos ergonómicos, esas diferencias son no significativas, por lo que la selección del paso no debe basarse en la fuerza de operación.

4) Resistencia del vástago

En esta parte se evalúa la resistencia del vástago tanto a esfuerzos de compresión y torsión, para lo cual se emplearán las siguientes fórmulas:

Área resistente (aprox.): $A_s = \frac{\pi}{4} d_m^2$

Esfuerzo axial: $\sigma_c = P^*/A_s$

Esfuerzo cortante por torsión: $\tau = 16T/(\pi d_3^3)$

Von Mises: $\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_c^2 + 3\tau^2}$

Criterio de servicio: $\sigma_{VM} \leq 0.1\,\sigma_y \approx 24.8$ MPa

Se procede al desarrollo de los cálculos en base a estas fórmulas para cada uno de los pasos entre hilo propuestos, cuyos resultados se detallan en la Tabla 4.6 Resistencia del vástago:

Tabla 4.6 Resistencia del vástago

p	A_s(mm²)	σ_c(MPa)	τ(MPa)	σ_{VM}(MPa)	Cumple criterio de servicio de 24.8 MPa
2 mm	384	13.0	8.9	20.2	Sí
3 mm	353	14.2	10.7	23.4	Sí
5 mm	293	17.1	16.0	32.6	No

De la tabla 4.6 se puede observar que en un paso $p = 5$mm el núcleo se adelgaza teniéndose un menor d_3 y la torsión sube mucho por lo que no cumple el criterio de servicio de 24.8 MPa, para el caso de un paso $p = 2$ y $p = 3$ estos sí cumplen el criterio de servicio ya que sus valores se encuentran por debajo de 24.8 MPA; en el paso del paso $p = 3$ a pesar de que queda cerca del límite este se encuentra dentro, lo que es aceptable en servicio considerando que el caso de cálculo es conservador ya que se está considerando dos veces el valor de la carga nominal.

5) Reparto de carga entre hilos (longitud de engrane)

Con una longitud de acople típica $L_e \approx d = 24$ mm, el número de hilos en contacto está dada por $n = L_e/p$. La Tabla 4.7 presenta los valores obtenidos para cada paso de rosca considerado, lo que permite visualizar directamente cómo el incremento del paso reduce el número de hilos efectivos en contacto y, por tanto, influye en la distribución de la carga en la rosca.

Tabla 4.7 Número de hilos en contacto para distintos pasos de rosca M24

p	$n = L_e/p$ (N° hilos)
2 mm	12
3 mm	8
5 mm	4

A mayor cantidad de hilos se tiene una mejor distribución de carga y menores presiones locales en los primeros filetes ya que estos son los que más trabajan. El paso $p = 2$ posee la mayor cantidad de hilos con un número de 12 presentando la mejor distribución de carga, el paso $p = 3$ ofrece un reparto de carga muy bueno ya que tiene 8 hilos, mientas que el paso $p = 5$ presenta solo 4 hilos lo que eleva las concentraciones de esfuerzo en los primeros filetes, lo cual no es deseable. Es por ello que las opciones de paso de 2 y 3 mm son las mejores opciones a considerar para tener una mejor distribución de carga entre hilos.

6) Resolución del desplazamiento (control didáctico)

El desplazamiento lineal generado por cada vuelta del tornillo es igual al paso p. Este parámetro influye directamente en la precisión con la que se posiciona la probeta y en la velocidad de ejecución de los ensayos. En función de ello, se comparan tres alternativas:

- **2 mm/vuelta**: Permite un ajuste extremadamente fino y un control muy preciso de la posición, lo que favorece lecturas detalladas y ensayos de alta sensibilidad. Sin embargo, implica un mayor número de vueltas para alcanzar el desplazamiento requerido, haciendo que los ensayos sean más lentos y prolongados.
- **3 mm/vuelta**: Representa un punto de equilibrio entre precisión y rapidez. Ofrece un desplazamiento suficientemente fino (aprox. 1 mm cada 120° de giro),

permitiendo un ajuste controlado sin generar demoras operativas. Es adecuado para ensayos didácticos donde se busca precisión sin sacrificar fluidez.

- **5 mm/vuelta**: Acelera el posicionamiento, pero compromete la finesa en la lectura de deformaciones, especialmente en los tramos iniciales de carga. El menor control puede dificultar el registro preciso de datos en ensayos de pandeo de laboratorio.

Por lo que el paso entre hilos más adecuado para el tornillo de avance es el de $p = 3$, ya que este presenta el mejor equilibrio entre precisión y rapidez al momento de llevar a cabo los ensayos en el módulo educativo de pandeo.

- **Cálculo de pandeo del tornillo de avance**

1) Hipótesis y justificación del coeficiente K

El tornillo transmite carga girando libremente y está guiado axialmente por la tuerca y los apoyos, sin desarrollar momento en los extremos. Esta condición corresponde a extremos articulados–articulados, por lo que el coeficiente de longitud efectiva se toma $K = 1.0$.

2) Datos del tornillo de avance

- Material tentativo: acero ASTM A36, $E = 200$ GPa, $\sigma_y = 248$ MPa.
- Tornillo: M24×3 (rosca ISO, paso 3 mm).
- Para pandeo se utiliza el diámetro de núcleo (raíz del filete):

$$d_3 \approx 20.32 \text{ mm} = 0.02032 \text{ m}$$

- Longitud libre conservadora en servicio:

$$L = 170 \text{ mm} = 0.17 \text{ m}$$

- Carga de diseño (2 veces el valor de la carga nominal): $P^* = 5{,}000$ N.
- Coeficiente de longitud efectiva: $K = 1.0$.

3) Propiedades geométricas (sección circular maciza de d_3)

$$A = \frac{\pi d_3^2}{4} = \frac{\pi (0.02032)^2}{4} = 3.245 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I = \frac{\pi d_3^4}{64} = \frac{\pi (0.02032)^4}{64} = 8.37 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{d_3}{4} = 0.00508 \text{ m}$$

4) Esbeltez efectiva e identificación del régimen

$$\lambda = \frac{K\,L}{r} = \frac{1.0 \times 0.17}{0.00508} = 33.5$$

Umbral elástico–inelástico:

$$\lambda_c = \pi\sqrt{\frac{2E}{\sigma_y}} = \pi\sqrt{\frac{2 \times 200{,}000}{248}} \approx 126$$

Como $\lambda = 33.5 < \lambda_c$, el tornillo opera en régimen inelástico; por tanto, la capacidad gobernante se estima con Johnson.

5) Capacidad crítica por Johnson

$$\sigma_{cr} = \sigma_y \left[1 - \frac{\sigma_y}{4\pi^2 E}\,\lambda^2\right]$$

Resolvemos por partes:

$$\frac{\sigma_y}{4\pi^2 E} = \frac{248 \times 10^6}{4\pi^2 \times 200 \times 10^9} = 3.145 \times 10^{-5}$$

$$\lambda^2 = (33.5)^2 = 1122.3$$

Reemplazando en la formula:

$$\sigma_{cr} = 248\,[1 - (3.145 \times 10^{-5}) \times 1122.3] = 239 \text{ MPa}$$

Calculamos la carga crítica de Johnson:

$$P_{cr}^{\text{Johnson}} = \sigma_{cr}\,A = 239 \times 10^6 \text{ Pa} \times 3.245 \times 10^{-4}\text{m}^2 = 77.7 \text{ kN}$$

6) Verificación con la carga crítica de Euler

$$P_{cr}^{\text{Euler}} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 200 \times 10^9 \cdot 8.37 \times 10^{-9}}{(0.17)^2} = 0.57 \text{ MN}$$

Como $P_{cr}^{\text{Euler}} > P_{cr}^{\text{Johnson}}$ y $\lambda < \lambda_c$, Johnson gobierna.

7) Factor de seguridad frente a pandeo

$$FS_{pandeo} = \frac{P_{cr}}{P}$$

$$FS_{5\,\text{kN}} = \frac{77.7}{5.0} = 15.5$$

$$FS_{2.5\,\text{kN}} = \frac{77.7}{2.5} = 31.1$$

Tanto para una carga de 5 kN y de 2.5 kN se cuenta con muy buenos valores de factor de seguridad para el tornillo de avance.

8) Contraste con esfuerzos de servicio

- Esfuerzo axial en el núcleo:

$$\sigma_{ax} = \frac{P^*}{A} = \frac{5{,}000}{3.245 \times 10^{-4}} = 15.4\ \text{MPa}$$

- Verificación combinada por Von Mises para compresión y torsión:

$$\sigma_{\text{VM}} \approx 24.6\ \text{MPa} \leq 0.1\,\sigma_y$$

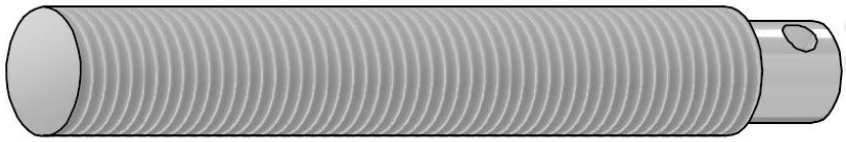
$$\sigma_{\text{VM}} \approx 24.6\ \text{MPa} \leq 24.8\ \text{MPa}$$

La verificación de esfuerzos de servicio evidencia que el nivel de solicitación que actúa sobre el tornillo M24×3 se encuentra holgadamente dentro de los márgenes admisibles definidos por el criterio de la décima parte de la falla. El esfuerzo axial obtenido de $\sigma_{ax} = 15.4$ MPa representa un valor claramente inferior al límite de fluencia del acero ASTM A36, lo que garantiza una respuesta estable y segura frente a la carga de trabajo prevista. Asimismo, la evaluación combinada por Von Mises ($\sigma_{\text{VM}} \approx 24.6$ MPa) confirma que el estado tensional total, considerando simultáneamente compresión y torsión, no supera el umbral establecido de $0.1\,\sigma_y = 24.8$ MPa, asegurando que el elemento trabaje en un rango estrictamente elástico. Esta condición es clave para preservar la precisión en la aplicación de la carga y evitar deformaciones plásticas prematuras, garantizando así la confiabilidad y repetibilidad de los ensayos de pandeo.

El dimensionamiento integral desarrollado demuestra que el tornillo de avance M24×3 fabricado en acero ASTM A36 presenta una configuración estructural óptima frente a las exigencias del módulo educativo de pandeo. El análisis de esfuerzos axiales, torsionales y de Von Mises confirma que la solicitación generada por la carga de diseño se mantiene dentro del rango elástico seguro, cumpliendo con el criterio de la décima parte de la fluencia y asegurando un comportamiento estable y repetible durante los ensayos. A su vez, el estudio de pandeo evidencia factores de seguridad ampliamente

favorables, lo que garantiza que este fenómeno no gobernará el fallo estructural del tornillo. La elección del paso de rosca de 3 mm permite lograr un equilibrio adecuado entre precisión operativa, control ergonómico y distribución de carga entre filetes, sin sobredimensionar el componente. Como resultado, se obtiene un elemento mecánico eficiente, seguro y didácticamente adecuado para la operación confiable y prolongada del equipo, cuyo bosquejo se puede apreciar en la Figura 4.5.

Figura 4.5 Bosquejo del tornillo de avance



En síntesis, la geometría preliminar de los componentes principales se ha proyectado con un enfoque doble: garantizar la resistencia y estabilidad del equipo, y proporcionar un recurso didáctico versátil que permita ensayar probetas de diferentes longitudes en condiciones seguras y reproducibles.

4.3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES

4.3.1. Criterio de Von Mises como parámetro de diseño

El análisis de esfuerzos en los componentes estructurales del módulo educativo de ensayo de pandeo debe considerar que, en condiciones reales de trabajo, estos elementos no están sometidos únicamente a un esfuerzo axial simple, sino a un estado multiaxial de tensiones generado por las cargas aplicadas y las condiciones geométricas de apoyo. Bajo estas circunstancias, resulta necesario adoptar un criterio que permita evaluar la seguridad de los materiales dúctiles cuando están expuestos a esfuerzos combinados.

El criterio seleccionado es el criterio de Von Mises, también conocido como criterio de la energía de distorsión, el cual establece que un material dúctil alcanza su límite de fluencia cuando el esfuerzo equivalente de Von Mises σ_{vm}alcanza el valor de la resistencia de fluencia del material σ_y.

En el marco del presente proyecto, el uso del criterio de Von Mises permite verificar que los componentes del módulo; como columnas principales, puentes y el tornillo de avance;

trabajen dentro de márgenes seguros, garantizando que los esfuerzos equivalentes se mantengan cercanos al orden de magnitud de la décima parte de la resistencia última del material. Este enfoque proyectivo asegura que el módulo se mantenga rígido y estable, permitiendo que la falla observada durante los ensayos se concentre exclusivamente en las probetas y no en la estructura del equipo.

Asimismo, este criterio resulta idóneo para su aplicación en el software Autodesk Inventor, que emplea el método de los elementos finitos (FEA) y presenta los resultados de simulación en términos de esfuerzos equivalentes de Von Mises. De esta forma, se asegura la consistencia entre los cálculos analíticos preliminares y los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones.

4.3.2. Esfuerzo axial en columnas principales

El análisis de las columnas principales resulta de suma importancia dentro del módulo educativo, ya que constituyen los elementos estructurales más expuestos a las solicitaciones críticas. A diferencia de los puentes y la base, que poseen geometrías robustas y poco susceptibles a inestabilidad, o del tornillo de avance, cuyo diseño se rige por criterios de torsión y resistencia en los filetes de la rosca, las columnas presentan una relación longitud–diámetro considerable (esbeltez) y están sometidas directamente a la transmisión de la carga axial aplicada en los ensayos. Esto las convierte en los componentes más sensibles a deformaciones indeseadas, y en el punto clave que asegura la rigidez global del sistema y la validez de los resultados experimentales. Cualquier insuficiencia en su dimensionamiento comprometería el desempeño del módulo, ya que podría alterar la alineación del conjunto y desviar el fenómeno de pandeo hacia la estructura en lugar de concentrarse en las probetas.

Se considera la carga máxima proyectada para el ensayo y la sección propuesta de la columna. El material tentativo para las columnas es acero ASTM A36 con un límite de fluencia típico $\sigma_y \approx 248$ MPa y una resistencia última $\sigma_u \approx 400$–550 MPa.

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

- Carga de diseño: $P = 2.5\,\text{kN} = 2500\,\text{N}$
- Sección tentativa: barra maciza de diámetro $d = 1\,3/4" = 44.45$ mm (tentativo)
- Área: $A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi(0.04445)^2}{4} = 1.55 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$

Sustituyendo:

$$\sigma = \frac{2500}{1.55 \times 10^{-3}} = 1.61 \text{ MPa}$$

Verificación frente al criterio de diseño:

- Respecto a fluencia del acero ASTM A36: $\frac{1.61\ MPa}{248\ MPa} = 0.0065$ = 0.65 % de σ_y
- Respecto a resistencia última del acero ASTM A36: $\frac{1.61\ MPa}{400–550} = 0.003–0.004$ = 0.3–0.4 % de σ_u

Estos resultados cumplen el lineamiento de que los esfuerzos de trabajo sean "cercanos a la décima parte de la falla": el valor obtenido se ubica alrededor muy por debajo del 10 % de la resistencia de referencia, siendo más conservador si se usa σ_u, y aún aceptable si se contrasta con σ_y. En términos funcionales, el nivel de 1.61 MPa asegura que las columnas trabajen muy alejadas de la fluencia, manteniendo la rigidez global y la alineación necesarias para que la inestabilidad se concentre en la probeta durante el ensayo.

Por lo que, para un $P = 2.5$ kN que es el que se plantea utilizar como carga máxima para el desarrollo de los ensayos de pandeo, $d = 44.45$ mm y material tentativo acero ASTM A36, el esfuerzo axial proyectado de 1.61 MPa verifica el criterio de ingeniería básica y respalda las dimensiones preliminares de las columnas, sirviendo de base para el análisis de pandeo y la simulación FEA por Von Mises.

4.3.3. Análisis de pandeo en columnas principales

Dado que las columnas principales son los elementos más esbeltos del módulo y los que garantizan la alineación del sistema, su evaluación frente a inestabilidad por pandeo es determinante para la seguridad global del equipo. Se analiza la capacidad crítica considerando que ambos extremos trabajan como empotramientos rígidos tanto en la base y en el puente de columnas principales, dicha configuración corresponde a una condición de apoyo del tipo empotrado–empotrado, lo que implica un coeficiente de longitud efectiva $K \approx 0.50$.

a) Datos de proyecto

- Material tentativo: acero estructural ASTM A36
  $E \approx 200$ GPa, $\sigma_y \approx 248$ MPa.
- Geometría propuesta para cada columna principal:
  Longitud $L = 1.0$ m; diámetro $d = 44.45$ mm $= 0.04445$ m
  Área $A = \frac{\pi d^2}{4} = 1.55 \times 10^{-3}$ m^2

Momento de inercia $I = \frac{\pi d^4}{64} = 1.92 \times 10^{-7}\ \text{m}^4$

Radio de giro $r = \sqrt{I/A} = 0.011\ \text{m}$

- Esbeltez efectiva:

$$\lambda = \frac{K\,L}{r} = \frac{0.50 \times 1.0}{0.011} = 45.45$$

Régimen de pandeo y fórmula aplicable.

El límite de esbeltez para pasar de pandeo elástico a inelástico es:

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{\sigma_y}}$$

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{2(200 * 10^9)}{248 * 10^6}} \approx 126$$

Como $\lambda = 45.45 < \lambda_c$, la columna opera en régimen inelástico; por tanto, el pandeo se evalúa con la fórmula de Johnson (parabólica).

b) Esfuerzo y carga crítica por Johnson

$$\sigma_{cr} = \sigma_y[1 - \tfrac{\sigma_y}{4\pi^2 E}\,\lambda^2] \Rightarrow \sigma_{cr} \approx 232\ MPa$$

$$P_{cr} = \sigma_{cr}\,A \Rightarrow P_{cr} \approx 139 \times 10^6\ Pa \times 1.55 \times 10^{-3}\ m^2 \approx 360\ kN$$

Al verificar en referencia con la fórmula de Euler elástico: $P_{cr}{}^{\text{Euler}} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \approx 1.52\ M\text{N}$. Se observa que el P_{cr}de Johnson hallado anteriormente es menor, al ser menor, Johnson gobierna, es decir, controla el diseño ya que Euler sobreestima la capacidad en este rango de esbeltez. Dado que la esbeltez efectiva ($\lambda \approx 45$) es menor al umbral $\lambda_c \approx 126$, la columna opera en régimen inelástico; por tanto, la capacidad de pandeo gobernante se evalúa con Johnson, resultando $P_{cr}^{\text{Johnson}} \approx 360$ kN, inferior a $P_{cr}^{\text{Johnson}} \approx 360$ kN, y por ello controla el diseño.

Contraste con la carga de ensayo y margen

- Carga máxima de proyecto: $P = 2.5$ kN.
- Capacidad crítica (Johnson): $P_{cr} \approx 360$ kN.
- Factor de seguridad frente a pandeo (por carga): $P_{cr}/P \approx 144$.

- Comparación con el esfuerzo axial del punto 4.3.2: $\sigma_{axial} = 1.61$ MPa; $\sigma_{cr}/\sigma_{axial} \approx 144$.

Con empotramiento superior e inferior ($K = 0.50$), material tentativo acero ASTM A36, $L = 1.0$ m y $d = 44.45$ mm, cada columna presenta una carga crítica de pandeo aproximada de 360 kN y un factor de seguridad ≈ 288 frente a la carga de servicio por columna de 1.25 kN. Esto se debe a que la carga total de ensayo planteada de 2.5 kN se distribuye entre las dos columnas que conforman la estructura del módulo educativo, reduciendo a la mitad la carga efectiva por elemento y, en consecuencia, duplicando el factor de seguridad respecto al cálculo inicial de 144. Este resultado confirma que las columnas trabajan muy alejadas de la inestabilidad y que el fenómeno de pandeo se manifestará en la probeta y no en la estructura del módulo, cumpliendo el lineamiento de esfuerzos del orden de una décima parte de la falla y habilitando el paso a la verificación numérica por FEA–Von Mises.

4.3.4. Comportamiento del puente porta tornillo y guía roscada ante el pandeo súbito de la probeta

Durante el ensayo de pandeo, la inestabilidad elástica de la probeta se manifiesta mediante una deflexión lateral súbita concentrada en el elemento ensayado, lo cual puede generar una perturbación momentánea en el sistema de transmisión de carga, particularmente en el conjunto formado por el tornillo de avance, el puente porta tornillo y el sistema de guías verticales. No obstante, esta perturbación no implica una redistribución permanente de cargas ni un incremento significativo de esfuerzos de flexión en dichos componentes, ya que la carga axial continúa siendo transmitida predominantemente en dirección vertical.

El diseño del puente porta tornillo, en conjunto con el puente guía superior y las columnas principales, restringe los desplazamientos laterales del tornillo y limita la aparición de excentricidades durante el evento de pandeo. Asimismo, la elevada rigidez del soporte base y la baja masa relativa de la probeta reducen la posibilidad de amplificación dinámica de esfuerzos sobre la guía roscada.

Por este motivo, el dimensionamiento del tornillo de avance y del puente porta tornillo se fundamenta en criterios de carga axial con factores de seguridad conservadores, considerándose que los efectos de flexión transitoria no gobiernan el comportamiento estructural del sistema ni comprometen la integridad del módulo educativo ni la confiabilidad de la medición de la carga crítica de pandeo.

4.4. PLAN DE MEJORA Y ETAPA DE INGENIERÍA DE DETALLE

La verificación de criterios de diseño constituye una etapa fundamental de la ingeniería básica, pues permite evaluar el comportamiento estructural de la propuesta inicial frente a iteraciones progresivas de mejora hasta alcanzar un diseño óptimo. Para este módulo educativo de ensayo de pandeo, se plantea realizar iteraciones sucesivas del modelo tridimensional en Autodesk Inventor, las cuales serán sometidas a análisis estructural mediante FEA bajo el criterio de Von Mises.

Además, se aplicó como criterio técnico que los esfuerzos no superen la décima parte de la resistencia a la fluencia del material (acero estructural ASTM A36, con una resistencia aproximada de 250 MPa), es decir, un límite de 25 MPa como referencia de diseño. Este umbral permite asegurar que la estructura no solo soporte la carga sin fallar, sino que trabaje dentro de un rango altamente elástico, garantizando la repetibilidad de los ensayos y prolongando su vida útil.

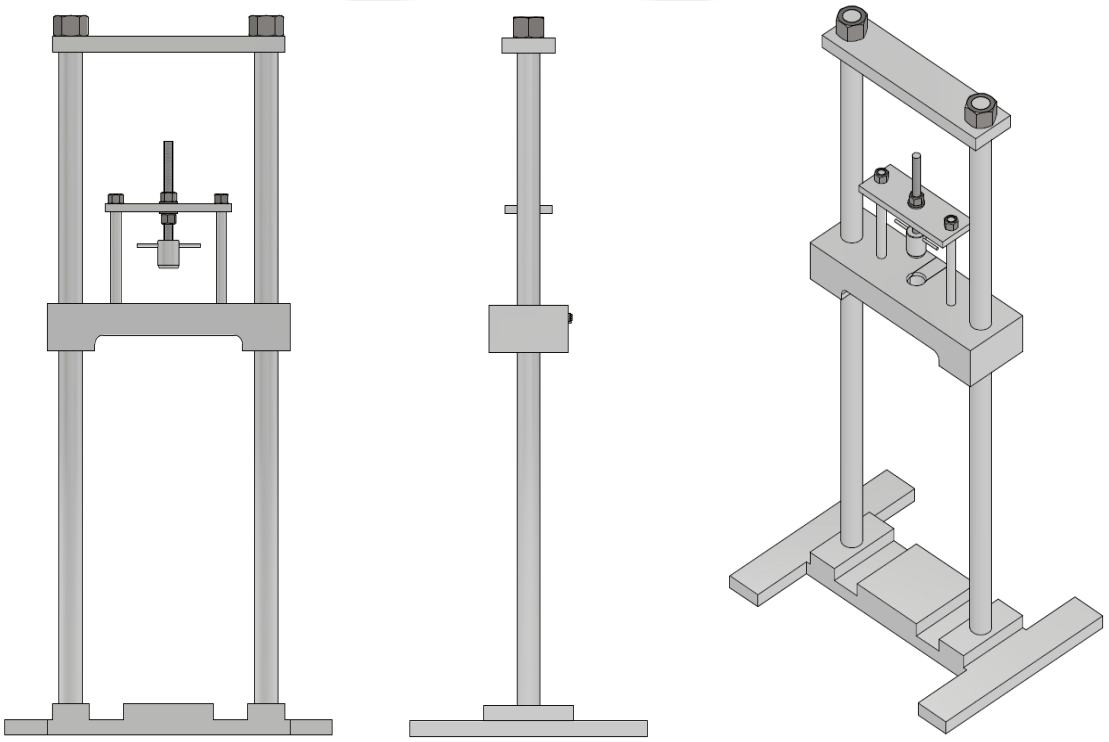
4.4.1. Iteraciones proyectivas de análisis FEA en Inventor

4.4.1.1. Iteración 01

- **Componentes:** El módulo educativo estará conformado por un soporte base al cual irán enroscados dos columnas principales de 1 ¾" de diámetro, que serán fijadas en la parte superior por un puente, siendo aseguradas en sus terminales por dos tuercas. Contará con una plataforma móvil, la cual tendrá dos perforaciones a sus extremos con el objeto de poder desplazarse por las columnas principales, sobre esta plataforma móvil se enroscarán dos columnas secundarias sobre las cuales irá un puente, que tendrá dos perforaciones por las que se introducirán los terminales superiores de las columnas secundarias y serán aseguradas al puente mediante tuercas. El puente de las columnas secundarías servirá además como soporte y guía del tornillo de avance, que será el encargado de transmitir de forma gradual la carga hacia la probeta durante el ensayo, el tornillo de avance pasará a través de una perforación ubicada en la parte central del puente de las columnas secundarias y contará con una tuerca ubicada en la parte superior de la perforación y otra en la cara inferior del puente, las cuales servirán para el desplazamiento del tornillo avance. El tornillo de avance contará con una base de apoyo inferior, que estará en contacto directo con el cubo de sujeción de la probeta, además esta base de apoyo contará con una perforación lateral por la cual se introducirá de lado a lado una palanca, la cual

servirá para facilitar la operación del giro del tornillo de avance por parte del operador durante el ensayo, tal como se aprecia esquemáticamente en la Figura 4.6.

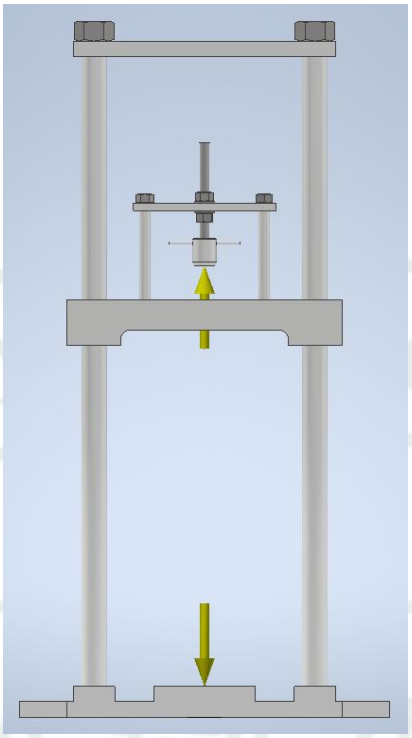
Figura 4.6 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la primera iteración



- Material tentativo global: Acero estructural A36.
- Geometría relevante: Columnas macizas Ø 1 ¾”.
- Carga estática aplicada en FEA: 2.5 kN.

En la Figura 4.7 se representa esquemáticamente la forma en que se aplica la carga axial sobre la probeta dentro del módulo, evidenciando la trayectoria de la fuerza y su transmisión a través de los componentes estructurales.

Figura 4.7 Aplicación de cargas en el módulo para la primera iteración



- Resultados FEA (criterio de Von Mises)

  Von Mises máx.: 62.91 MPa

  Desplazamiento máximo: 0.0865 mm

  Factor de seguridad mínimo: 3.97

  Masa: ≈ 111.1 kg.

En la Figura 4.8 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos para la primera iteración, mostrando los valores mínimos y máximos obtenidos para esfuerzo de Von Mises, esfuerzos principales, desplazamiento y factor de seguridad, parámetros fundamentales para evaluar el desempeño estructural del módulo.

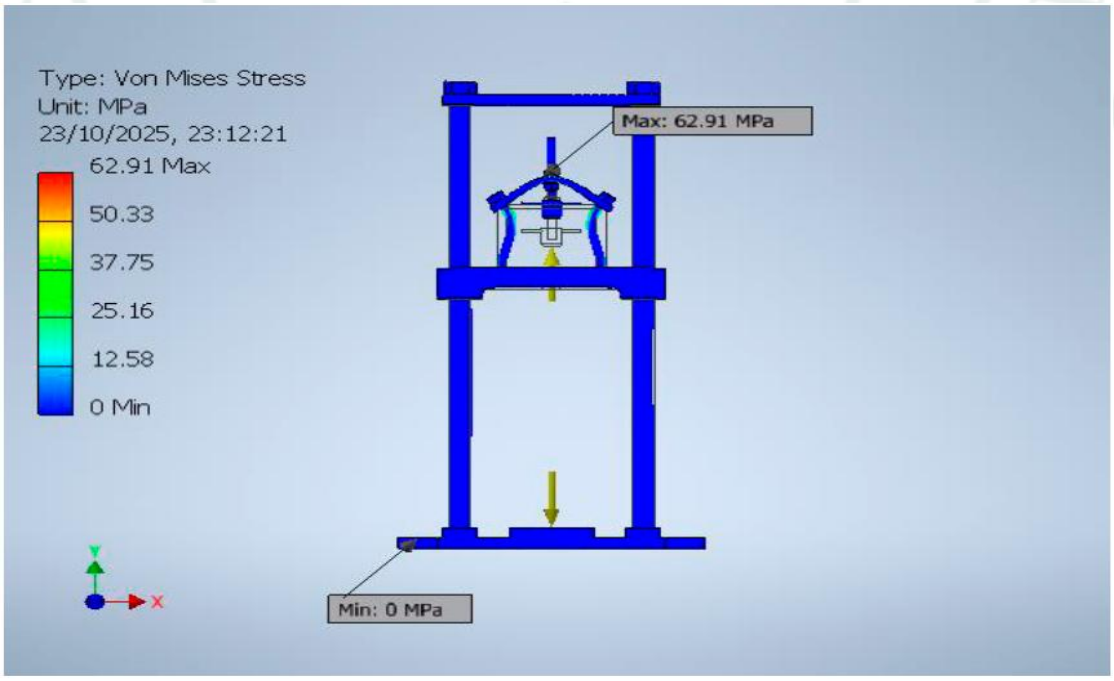
Figura 4.8 Resultado del análisis de esfuerzos para la primera iteración

Name	Minimum	Maximum
Volume	14155900 mm^3	
Mass	111.127 kg	
Von Mises Stress	0.000014504 MPa	62.9085 MPa
1st Principal Stress	-15.9851 MPa	84.3408 MPa
3rd Principal Stress	-79.9163 MPa	25.5197 MPa
Displacement	0 mm	0.0864773 mm
Safety Factor	3.97403 ul	15 ul

- **Identificación de fallas locales en el modelo**

Los picos de Von Mises exceden la referencia del 10 % de la fluencia (≈ 25 MPa), con concentraciones en la unión columna–base y en transiciones del puente porta tornillo. La menor rigidez de placas incrementa la flexibilidad global y reduce el margen del factor de seguridad, lo que eleva la sensibilidad a desalineaciones en uso repetitivo, tal como se observa en la Figura 4.9.

Figura 4.9 Resultado FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la primera iteración



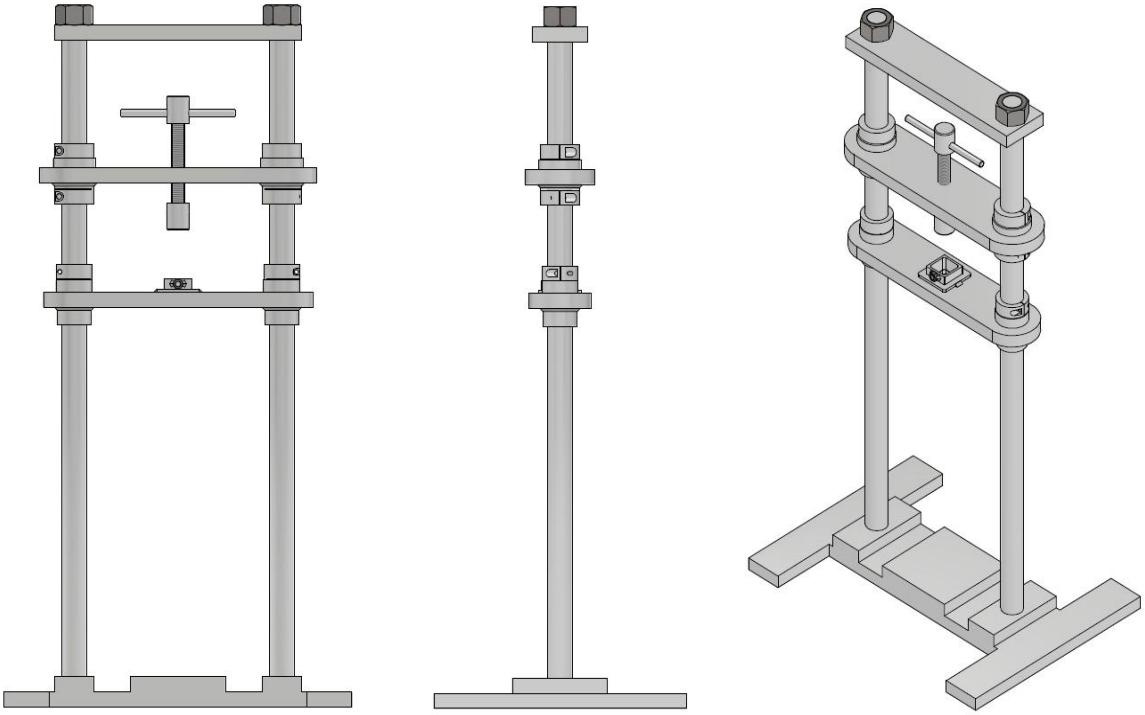
- **Estrategias de mejora proyectiva**

  Para la estabilidad estructural y el comportamiento mecánico del sistema, se plantea aumentar el espesor de las placas del puente porta tornillo y del puente guía, incorporando además rigidizadores locales que contribuyan a una mayor rigidez y capacidad portante. De igual manera, se propone ampliar las áreas de apoyo y contacto con el fin de reducir las presiones locales generadas durante la aplicación de cargas. Asimismo, se considera necesario mejorar la posición del tornillo de avance y su palanca, de modo que la operación de aplicación gradual de la carga sobre la probeta resulte más práctica y ergonómicamente cómoda para el operador, facilitando el control preciso mediante el giro del tornillo durante la ejecución de los ensayos.

4.4.1.2.Iteración 02

- **Componentes:** El módulo educativo en la segunda iteración estará conformado por un soporte base al cual irán enroscadas dos columnas principales de 1 ¾" de diámetro que serán fijadas en la parte superior por un puente, siendo aseguradas en sus terminales por dos tuercas. Contará con un puente porta tornillo de 25.4 mm de espesor el cual tendrá en sus extremos dos perforaciones en las cuales se colocará una bocina de sujeción por las que pasarán las columnas principales permitiendo desplazar el puente porta tornillo a la posición deseada y a su vez poder asegurar el puente de manera firme a las columnas principales, el puente tendrá en su centro una perforación roscada por la cual pasará el tornillo de avance que será el responsable de transmitir la carga hacia la probeta durante el ensayo. El tornillo contará con una base superior que irá enroscado a este, esta base contará con una perforación lateral a través de la cual pasará una palanca la cual servirá para facilitar la operación del giro del tornillo de avance por parte del operador durante el ensayo, a su vez el tornillo tendrá una base inferior la que será la encargada de transmitir la carga hacia la probeta. Se contará además con un puente guía para el cubo superior de 25.4 mm de espesor, el cual se situará por debajo de del puente porta tornillo, su función principal es la de guiar el cubo superior que sujetará a la probeta para evitar desplazamientos laterales durante la ejecución del ensayo, este puente tendrá en sus extremos dos perforaciones en las cuales se colocará una bocina de sujeción por las que pasarán las columnas principales permitiendo desplazar el puente guía para el cubo superior a la posición deseada y a su vez poder asegurar el puente de manera firme a la columnas principales , tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.10.

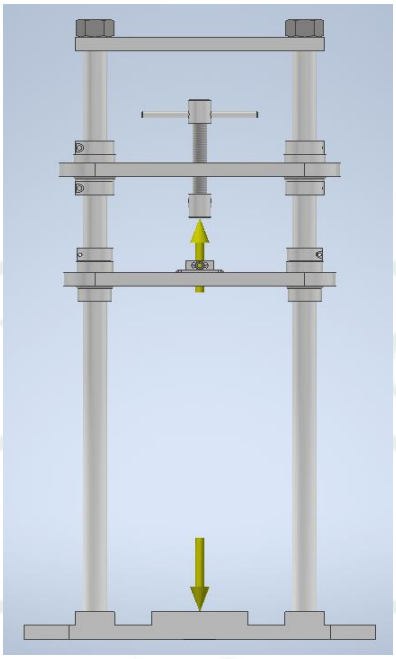
Figura 4.10 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la segunda iteración



- Material tentativo global: Acero estructural ASTM A36 – Grado A36.
- Se incorporan mejoras de guiado y una cinemática del tornillo más cómoda y controlada.
- Geometría relevante: Columnas macizas Ø 1 ¾” y espesor de puente porta tornillo y puente guía para el cubo superior de 25.4 mm.
- Carga estática en FEA: 2.5 kN.

Para visualizar el comportamiento estructural del sistema en la iteración 2, en la Figura 4.11 se presenta el esquema de aplicación de cargas, mostrando la trayectoria axial de la fuerza y su transmisión a través de los componentes principales del módulo.

Figura 4.11 Aplicación de cargas en el módulo para la segunda iteración



- **Resultados FEA (criterio de Von Mises)**

Von Mises máx.: 12.96 MPa

Desplazamiento máximo: 0.0238 mm

Factor de seguridad mínimo: 15.00

Masa: ≈ 103.0 kg.

En la Figura 4.12 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos correspondientes a la iteración 2, donde se muestran los valores mínimos y máximos de esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad, parámetros clave para evaluar la respuesta estructural del módulo.

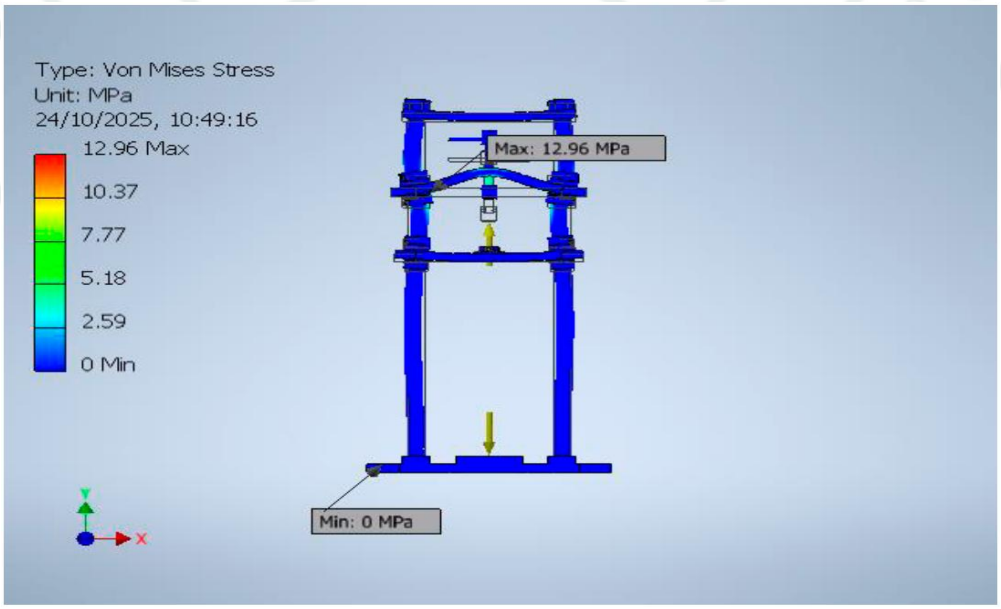
Figura 4.12 Resultado del análisis de esfuerzos para la segunda iteración

Name	Minimum	Maximum
Volume	13121300 mm^3	
Mass	103.002 kg	
Von Mises Stress	0.0000081858 MPa	12.9569 MPa
1st Principal Stress	-3.09157 MPa	18.4121 MPa
3rd Principal Stress	-12.3967 MPa	7.48748 MPa
Displacement	0 mm	0.0238107 mm
Safety Factor	15 ul	15 ul

- **Identificación de fallas locales en el modelo**

El incremento de espesor del puente porta tornillo y puente guía para el cubo superior a 25.4 mm rigidiza el conjunto, haciendo que los esfuerzos queden muy por debajo del 10 %, alcanzándose un valor de alrededor del 5 % de la fluencia y el desplazamiento se reduce notablemente. Se nota que persisten puntos de transición placa–columna con gradientes de esfuerzo, pero no gobiernan sobre toda la estructura del módulo educativo. El sobre margen estructural alcanzado en esta iteración implica una mayor masa y costo que podrían optimizarse, tal como se aprecia en la Figura 4.13.

Figura 4.13 Resultado del FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la segunda iteración



- **Estrategias de mejora proyectiva**

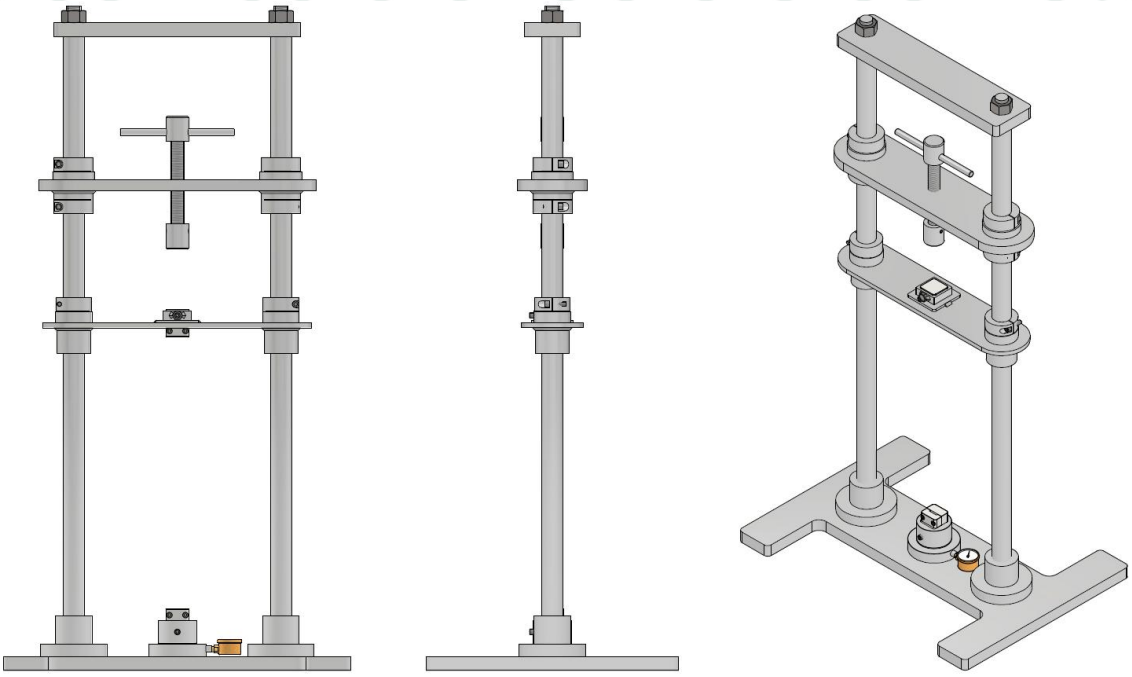
  Con el propósito de optimizar el diseño y reducir la masa del módulo educativo sin comprometer su comportamiento estructural, se propone realizar ajustes puntuales en sus componentes. En primer lugar, se plantea reducir ligeramente el diámetro de las columnas principales, buscando disminuir el peso total del conjunto manteniendo su rigidez global. Asimismo, se sugiere reducir el espesor de las placas de los puentes, garantizando que conserven su función estructural de aporte a la rigidez general. También se considera afinar los sistemas de guiado para asegurar una alineación adecuada en procesos de montaje y desmontaje frecuentes, mejorando así su precisión operativa. Finalmente, se recomienda rediseñar el soporte base con una superficie completamente plana, incorporando bocinas roscadas que aseguren la perpendicularidad y concentricidad de las columnas principales, con el fin de lograr un ensamblaje más preciso y estable.

4.4.1.3.Iteración 03

- **Componentes:** El módulo educativo en la tercera iteración estará conformado por un soporte base con una superficie completamente plana con un espesor aproximado de 25 mm, el cual tendrá dos perforaciones en sus extremos en los que se colocará una bocina con rosca en donde irán enroscadas dos columnas principales que para el caso de esta iteración se redujo su diámetro de 1 ¾" a 1 ½" con el objeto de reducir la masa del módulo educativo pero sin afectar a la rigidez estructural al módulo educativo de pandeo; las columnas principales serán fijadas en la parte superior por un puente, siendo aseguradas en sus terminales por dos tuercas. El soporte base tendrá una perforación en el centro en la que se colocará un inserto circular con una perforación cuadrada la cual servirá como guía para el adaptador del cubo inferior de sujeción de la probeta, dicho soporte permitirá alineada la probeta al no permitir que el cubo inferior de sujeción pueda desplazarse lateralmente o presente giros durante el ensayo. Entre el soporte base y el adaptador del cubo inferior se colocará un dinamómetro analógico, el cual servirá para medir y controlar la carga aplicada a la probeta durante el ensayo. Presentará un puente porta tornillo con un espesor aproximado de 20 mm, el cual tendrá en sus extremos dos perforaciones en las cuales se colocará una bocina de sujeción por las que pasarán las columnas principales permitiendo desplazar el puente porta tornillo a la posición deseada y a su vez poder asegurar el puente de manera firme a las columnas principales, el puente tendrá en su

centro una perforación roscada por la cual pasará el tornillo de avance que será el responsable de transmitir la carga hacia la probeta durante el ensayo. El tornillo contará con una base superior que irá enroscado a este, esta base contará con una perforación lateral a través de la cual pasará una palanca la cual servirá para facilitar la operación del giro del tornillo de avance por parte del operador durante el ensayo, a su vez el tornillo tendrá una base inferior la que será la encargada de transmitir la carga hacia la probeta. Se contará además con un puente guía para el cubo superior con un espesor aproximado de 10 mm, el cual se situará por debajo de del puente porta tornillo, su función principal es la de guiar el cubo superior que sujetará a la probeta para evitar desplazamientos laterales durante la ejecución del ensayo, este puente tendrá en sus extremos dos perforaciones en las cuales se colocará una bocina de sujeción por las que pasarán las columnas principales permitiendo desplazar el puente guía para el cubo superior a la posición deseada y a su vez poder asegurar el puente de manera firme a la columnas principales, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.14.

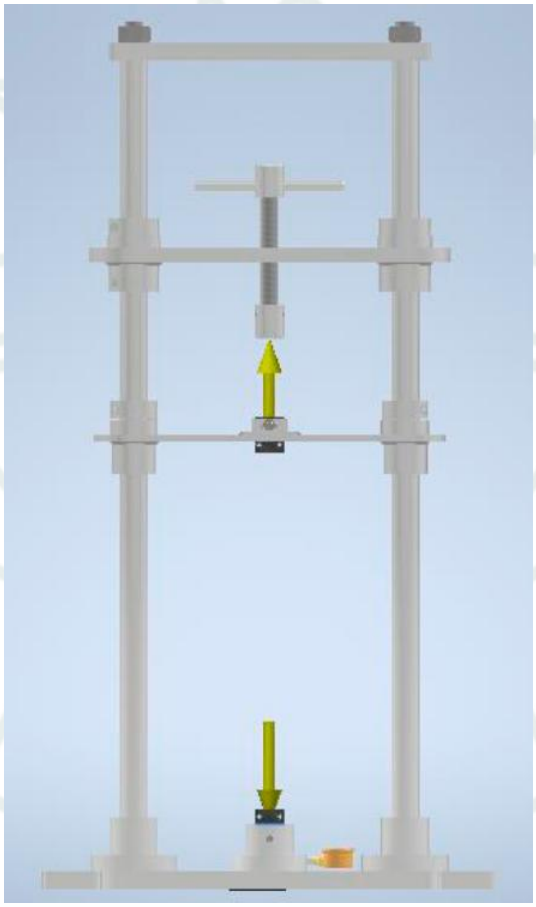
Figura 4.14 Vista frontal, lateral derecha e isométrica del módulo propuesto para la tercera iteración



- Material tentativo global: Acero estructural A36.
- Geometría relevante: Columnas macizas Ø 1 ½”.
- Soporte base plano de 25 mm de espesor con bocinas roscadas para fijación de columnas.
- Se reduce el espesor del puente porta tornillo a 20 mm y del puente guía para el cubo superior a 10 mm, manteniéndose las mejoras de guiado y ergonomía del tornillo introducidas en Iteración 2.
- Carga estática en FEA: 2.5 kN.

Para representar la trayectoria de la carga axial y su transmisión en el sistema durante la iteración 3, en la Figura 4.15 se muestra el esquema de aplicación de cargas correspondiente a esta etapa del análisis.

Figura 4.15 Aplicación de cargas en el módulo para la tercera iteración



- **Resultados FEA (criterio de Von Mises)**
  - Von Mises máximo: 20.08 MPa
  - Desplazamiento máximo: 0.0482 mm
  - Factor de seguridad mínimo: 10.31
  - Masa: ≈ 85.3 kg.

En la Figura 4.16 se presentan los resultados del análisis de esfuerzos correspondientes a la iteración 3, detallando los valores mínimos y máximos de esfuerzos, desplazamientos y factor de seguridad que permiten evaluar el desempeño estructural del módulo.

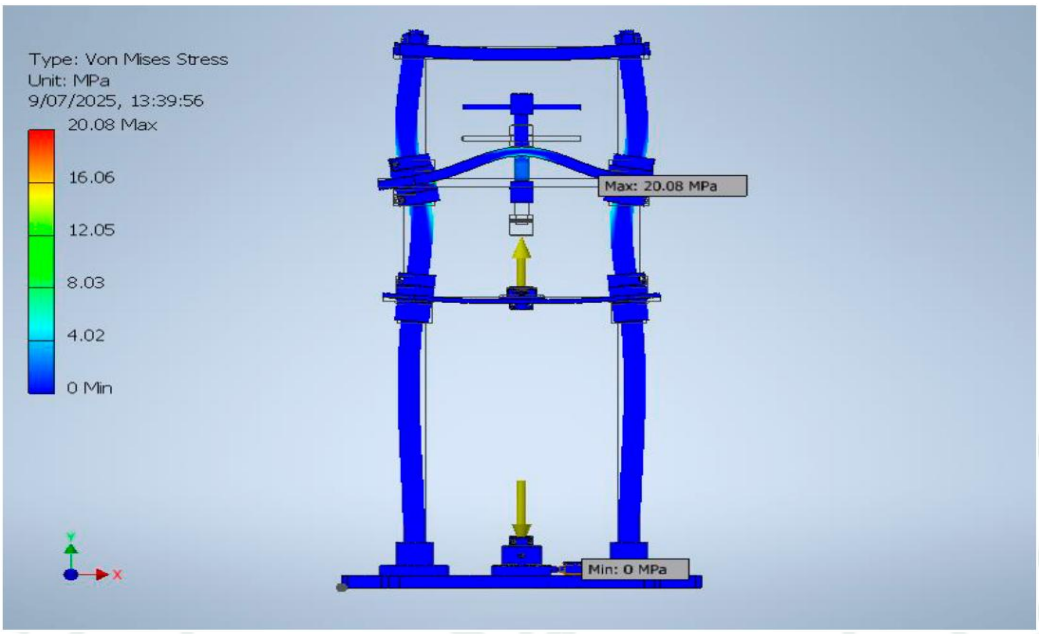
Figura 4.16 Resultado del análisis de esfuerzos para la tercera iteración

Name	Minimum	Maximum
Volume	11008900 mm^3	
Mass	85.2986 kg	
Von Mises Stress	0 MPa	20.0783 MPa
1st Principal Stress	-4.76065 MPa	22.5074 MPa
3rd Principal Stress	-17.4179 MPa	3.73416 MPa
Displacement	0 mm	0.0482193 mm
Safety Factor	10.3096 ul	15 ul

- **Identificación de fallas locales en el modelo**

El esfuerzo de Von Mises de alrededor de 20 MPa se sitúa por debajo de la referencia del 10 %, cumpliendo el criterio con margen suficiente teniéndose un factor de seguridad superior mayor a 10. Las zonas críticas se concentran en uniones columna–base y puente porta tornillo, pero no superan el umbral de diseño. La optimización de base plana con bocinas roscadas y el guiado reforzado mejoran la alineación y la repetibilidad del ensayo. La masa desciende a alrededor de 85 kg, favoreciendo a la fabricabilidad y reduciendo su costo respectivo, tal como se aprecia en la Figura 4.17.

Figura 4.17 Resultado FEA para el criterio de Von Mises para el módulo de la tercera iteración



- **Estrategias de mejora proyectiva**

  Esta versión del módulo educativo para la iteración 3 no solo cumple de forma adecuada con el criterio de la décima parte de la resistencia del material del cual se encuentra fabricada (Acero ASTM A36), alcanzando un factor de seguridad superior a 10, sino que además incorpora un sistema de guiado y una base optimizada que garantizan una excelente alineación y repetibilidad durante los ensayos. Al mismo tiempo, reduce significativamente la masa y los costos de fabricación sin comprometer la integridad estructural ni la seguridad operativa. En el contexto de un equipo docente, este equilibrio entre desempeño estructural, funcionalidad práctica y eficiencia constructiva resulta mucho más valioso que un sobredimensionamiento que, aunque más rígido, encarecería la fabricación y dificultaría su uso en actividades académicas.

4.4.2. Síntesis comparativa y decisión de diseño

Antes de la presentación del diseño final, es necesario realizar una evaluación comparativa integral de las tres iteraciones desarrolladas durante la etapa de ingeniería básica. Esta comparación no solo considera el desempeño estructural en términos de esfuerzos equivalentes de Von Mises, desplazamientos y factores de seguridad obtenidos mediante análisis FEA, sino también aspectos funcionales y operativos clave como la rigidez global, la

alineación de las probetas, la repetibilidad del ensayo y la ergonomía del sistema de aplicación de carga. De esta forma, la decisión no se basa únicamente en criterios de resistencia, sino en una visión equilibrada entre seguridad estructural y funcionalidad didáctica, asegurando que el módulo propuesto cumpla de manera eficiente su propósito pedagógico y operativo en condiciones reales de laboratorio.

a) Comparación cuantitativa de las iteraciones

La Tabla 4.8 presenta la comparación cuantitativa de las tres iteraciones del diseño del módulo educativo de pandeo, considerando los parámetros estructurales más relevantes obtenidos a partir del análisis FEA. Para este propósito, se han seleccionado cinco criterios técnicos tales como esfuerzo de Von Mises, desplazamiento, factor de seguridad, masa estructural y cumplimiento del criterio de la décima parte de la fluencia, todos ellos fundamentales para garantizar que la estructura opere dentro del rango elástico seguro y mantenga estabilidad bajo carga axial.

Tabla 4.8 Comparación cuantitativa de las iteraciones

Parámetro	**Iteración 1**	**Iteración 2**	**Iteración 3**
Volumen (mm³)	14 155 900	13 121 300	11 008 900
Masa (kg)	111.127	103.002	85.2986
Von Mises Stress (MPa) – Máx	62.9085	12.9569	20.0783
Desplazamiento (mm)	0.0864773	0.0238107	0.0482193
Factor de seguridad – Mín	3.97403	15	10.3096

La Tabla 4.8 evidencia una disminución progresiva del volumen y la masa entre iteraciones, pasando de 14 155 900 mm³ y 111.127 kg en la primera a 11 008 900 mm³ y 85.2986 kg en la tercera, lo que confirma un avance hacia un diseño más liviano y eficiente.

En esfuerzos, se observa que el Von Mises máximo desciende marcadamente en la segunda iteración (12.9569 MPa) y luego se mantiene en niveles bajos en la tercera (20.0783 MPa), ambos muy por debajo del límite elástico típico de aceros estructurales. El desplazamiento máximo también mejora en la segunda (0.0238107 mm) y permanece acotado en la tercera (0.0482193 mm). El factor de seguridad mínimo alcanza 15 en la

segunda y 10.3096 en la tercera, ambos con holgura respecto a condiciones operativas razonables.

Dado que la Iteración 2 combina mínima tensión, mínima deformación y FS = 15, su desempeño mecánico es superior; no obstante, tales márgenes indican sobredimensionamiento e implican masa innecesaria (103.002 kg). En contraste, la Iteración 3 reduce la masa ~17 % respecto de la segunda (85.2986 kg), mantiene tensiones bajas (20.0783 MPa) y un FS > 10, conservando un comportamiento estructural seguro.

En consecuencia, considerando el criterio de eficiencia global (resistencia suficiente con el menor peso posible), la Iteración 3 se valida como la alternativa preferible, mientras que la Iteración 2 queda identificada como sobredimensionada para los requisitos del componente.

b) Comparación cualitativa de las iteraciones:

La siguiente tabla presenta la ponderación cualitativa de las tres iteraciones del diseño del módulo educativo de pandeo, enfocándose en aspectos relacionados con la usabilidad, la eficiencia de fabricación y la seguridad en la operación. A diferencia de la ponderación cuantitativa, aquí se priorizan factores prácticos que inciden directamente en la funcionalidad real del equipo en un entorno educativo, donde la repetibilidad de los ensayos, la ergonomía y la facilidad de montaje son determinantes para su uso sostenido. Para ello, se consideraron cinco criterios: alineación y repetibilidad, fabricabilidad y costo, comodidad de operación, mantenibilidad y seguridad operativa, cada uno con un peso proporcional a su relevancia técnica y pedagógica. De esta manera, la Tabla 4.9 permite complementar la evaluación estructural con un análisis funcional, mostrando qué diseño no solo cumple con las exigencias mecánicas, sino que además ofrece mejores condiciones de operación, mantenimiento y seguridad, elementos claves para definir el modelo final que pasará a la etapa de ingeniería de detalle.

Tabla 4.9 Ponderación cualitativa (uso, fabricación y operación)

Criterio	Peso	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3
Alineación / repetibilidad	30%	3	4	**5**
Fabricabilidad / costo	25%	3	2	**4**
Comodidad de operación	20%	3	4	**5**
Mantenibilidad	15%	3	3	**5**
Seguridad operativa	10%	3	4	**5**
Puntaje ponderado (1–5)	**100%**	**3**	**3.35**	**4.75**

La ponderación cualitativa aplicada en la Tabla 4.9. Ponderación cualitativa (uso, fabricación y operación) busca evaluar de forma estructurada y objetiva aquellos factores que, aunque no se expresan directamente en valores numéricos de cálculo estructural, tienen un impacto determinante en la funcionalidad práctica y operativa del módulo educativo de pandeo. Cada uno de los criterios seleccionados; alineación y repetibilidad, fabricabilidad y costo, comodidad de operación, mantenibilidad y seguridad operativa; responde a aspectos clave que garantizan que el equipo no solo sea resistente, sino también seguro, ergonómico y eficiente en su uso cotidiano dentro de un entorno educativo.

Para reflejar su importancia relativa, se asignaron pesos porcentuales diferenciados a cada criterio. La alineación y repetibilidad recibió el mayor peso (30 %), debido a que influye directamente en la precisión de los ensayos y la confiabilidad de los resultados experimentales. Le siguen fabricabilidad y costo (25 %), esenciales para asegurar la viabilidad económica y técnica del proyecto, y comodidad de operación (20 %), factor que determina la facilidad de uso por parte de estudiantes y docentes. Por último, se ponderaron mantenibilidad (15 %) y seguridad operativa (10 %), ambos cruciales para prolongar la vida útil del equipo y garantizar que pueda operar de manera segura durante toda su implementación.

La escala de evaluación utilizada va del 1 al 5, donde 1 representa un desempeño básico, 2 un nivel aceptable pero limitado, 3 un desempeño adecuado, 4 un desempeño muy bueno y 5 un nivel excelente. Esta valoración se realizó tomando en cuenta las

características constructivas, la facilidad de uso, la calidad de las interfaces mecánicas, la accesibilidad para mantenimiento y la capacidad del diseño para garantizar la seguridad durante la operación. Así, las puntuaciones más altas se asignaron a las iteraciones con mayor grado de optimización funcional, mientras que las más bajas reflejan limitaciones operativas que, aunque no impiden el funcionamiento, sí reducen su eficiencia pedagógica y técnica.

En conjunto, esta ponderación cualitativa permite equilibrar la evaluación estructural realizada previamente con una visión práctica y de campo, asegurando que la selección final del diseño no solo se base en criterios de resistencia o rigidez, sino también en su eficiencia de uso, mantenibilidad y seguridad a largo plazo.

La Tabla 4.9. Ponderación cualitativa (uso, fabricación y operación) revela de manera clara cómo cada iteración responde a los factores cualitativos esenciales para el funcionamiento práctico y pedagógico del módulo educativo de pandeo.

La Iteración 1, con un puntaje ponderado de 3.00, representa una configuración básica que, si bien cumple con condiciones mínimas de operación, presenta limitaciones evidentes en alineación y ergonomía. Su diseño carece de sistemas de guiado optimizados y de elementos que faciliten la manipulación y el mantenimiento, lo que podría traducirse en errores de medición, pérdida de repetibilidad en los ensayos y mayores tiempos de ajuste. Si bien es una versión fabricable y funcional, no ofrece el nivel de confiabilidad ni la facilidad de uso requeridos para un entorno educativo exigente.

La Iteración 2, con un puntaje de 3.35, mejora en aspectos relacionados con la alineación, la seguridad operativa y la comodidad de operación, gracias a su mayor rigidez estructural. No obstante, estas mejoras vienen acompañadas de un aumento en la complejidad y el costo de fabricación, lo que reduce su puntuación en fabricabilidad y mantenimiento. Si bien es más robusta que la Iteración 1, no logra un equilibrio adecuado entre rendimiento y practicidad, lo que la hace menos eficiente para su implementación continua en actividades docentes.

La Iteración 3, con un puntaje ponderado de 4.75, sobresale en todos los criterios cualitativos evaluados. Su diseño incorpora guiados precisos y una base optimizada, lo que mejora significativamente la alineación y la repetibilidad de los ensayos. Además, al reducir la masa estructural y simplificar la geometría, mejora la fabricabilidad y

reduce costos, manteniendo al mismo tiempo una operación ergonómica y segura. Su facilidad de mantenimiento permite intervenciones rápidas y sencillas, algo fundamental para un equipo de uso frecuente en prácticas experimentales.

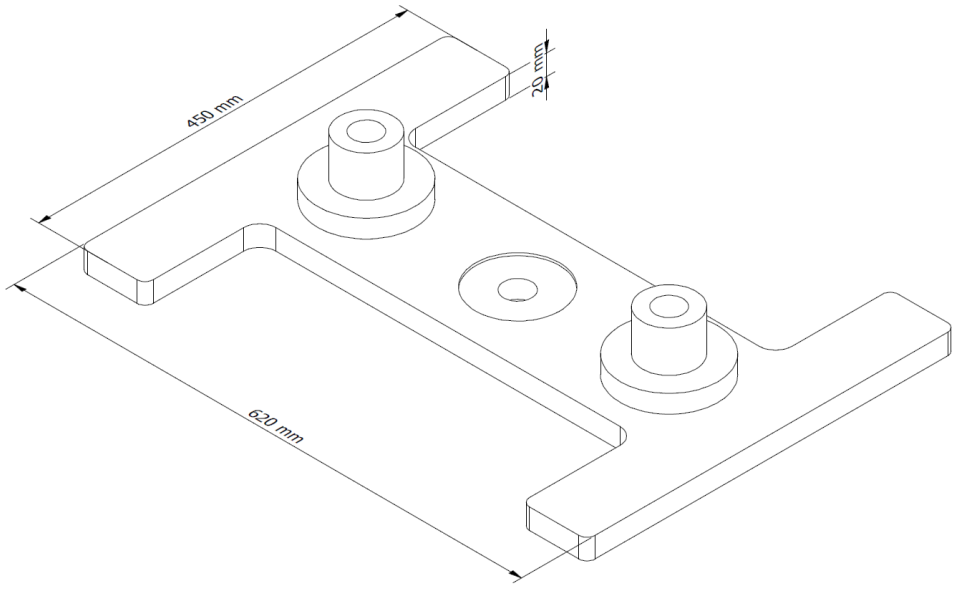
En conjunto, estos resultados confirman que la Iteración 3 no solo cumple con los criterios técnicos estructurales, sino que además ofrece la mejor experiencia operativa y pedagógica, combinando precisión, ergonomía, seguridad y eficiencia económica. Esto justifica su selección como diseño final para la etapa de ingeniería de detalle y su posterior fabricación.

4.5. DIMENSIONES PRINCIPALES PROPUESTAS

4.5.1. Resumen de dimensiones para elaboración de planos

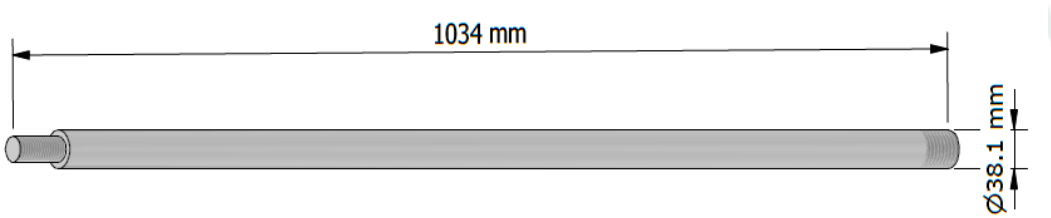
a) **Soporte base:** El soporte base constituye la plataforma estructural principal del módulo, proporcionando estabilidad global durante los ensayos de pandeo. Posee un largo total de 620 mm, un ancho de 460 mm y un espesor estructural robusto de 20 mm para resistir la carga axial transferida por las columnas principales. Incluye dos orificios mecanizados para el alojamiento de las columnas y puntos roscados 1 ½" para garantizar un anclaje firme. Su geometría permite mantener el aplome y la alineación vertical de los elementos de carga, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.18.

Figura 4.18 Esquema constructivo del soporte base propuesto



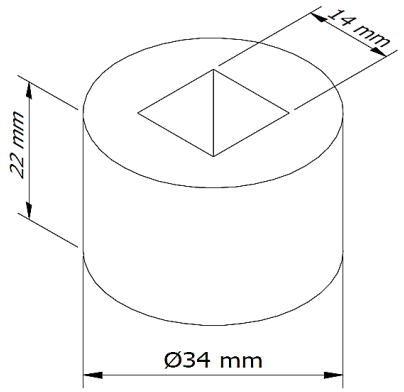
b) Columna principal: Las columnas principales son elementos de sección circular maciza de Ø38.1 mm y una longitud efectiva de 1034 mm, diseñadas para soportar cargas axiales críticas y servir como soporte directo de la probeta. Debe presentar una superficie mecanizada con acabado pulido, con roscas externas de 1 ½" en los extremos para acoplarse firmemente a la base y al puente de columnas principales, evitando desplazamientos laterales y asegurando condiciones empotradas-empotradas durante la ejecución de los ensayos. Estará fabricada en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.19.

Figura 4.19 Esquema constructivo de la columna principal propuesta



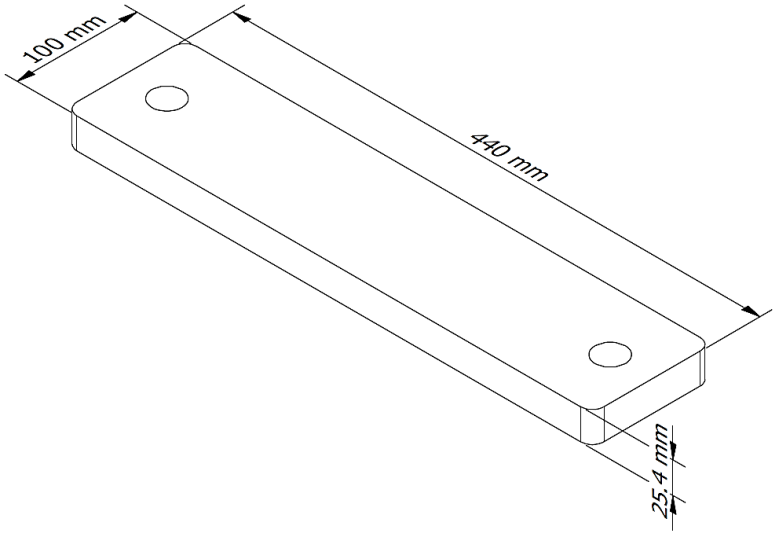
c) Inserto cilíndrico: Esta pieza actúa como elemento de conexión y centrado incorporado en la parte central del soporte base, asegurando que las probetas mantengan su alineación axial, posee un diámetro externo de alrededor de 34 mm, una altura de 22 mm y un orificio cuadrado mecanizado de 14 mm, que permitirá transmitir la carga axial sin generar concentraciones excesivas de esfuerzos. Su configuración garantiza la correcta ubicación de la probeta en el plano de ensayo, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.20.

Figura 4.20 Esquema constructivo del inserto cilíndrico propuesto



d) Puente de columnas principales: Une rígidamente las dos columnas y sirve como apoyo superior del sistema de carga, su geometría rectangular posee alrededor de 440 mm de longitud, 100 mm de ancho y espesor de 25.4 mm, con perforaciones alineadas para asegurar un acople exacto con las columnas principales. Su rigidez contribuye a mantener las condiciones de frontera estables durante el ensayo, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.21.

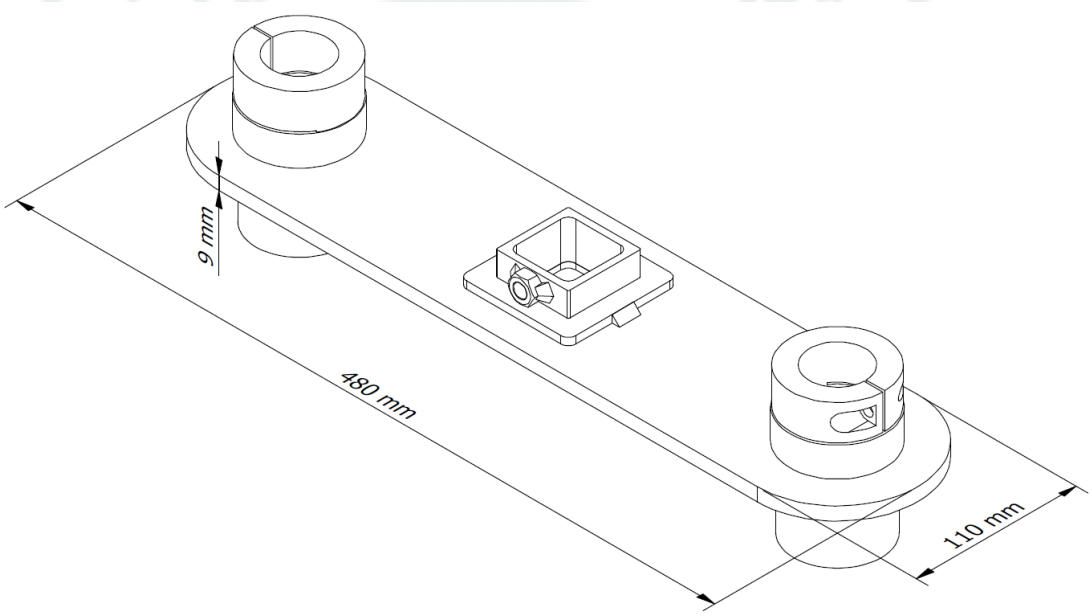
Figura 4.21 Esquema constructivo del puente de columnas principales propuesto



e) Puente guía para cubo superior: Este componente actúa como estructura intermedia de guiado, asegurando la alineación de la parte móvil que aplica la carga, contará con

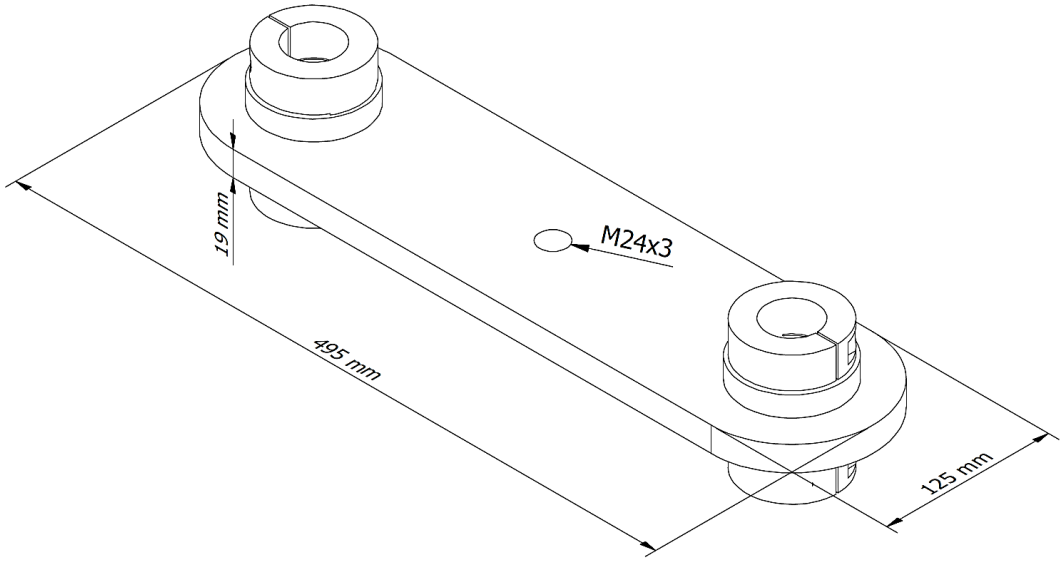
una longitud aproximada de 480 mm, 110 mm de ancho, 9 mm de espesor y perforaciones mecanizadas y bocinas con sistema de sujeción para su correcta fijación con las columnas principales, permite un guiado lineal preciso y minimiza desplazamientos angulares o excentricidades de la probeta. Estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.22.

Figura 4.22 Esquema constructivo del puente guía para cubo superior propuesto



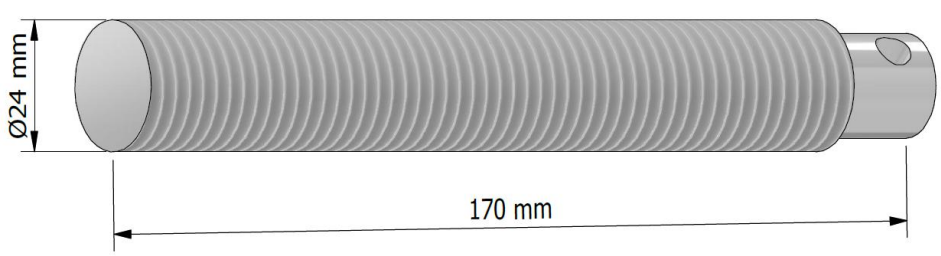
f) **Puente porta tornillo:** Constituye el soporte estructural del mecanismo de aplicación de carga, presentará una longitud aproximada de 495 mm, 125 mm de ancho, 19 mm de espesor y perforaciones mecanizadas 38.1 mm y bocinas de sujeción para la correcta fijación con las columnas principales alberga el sistema de roscado M24×3 que acciona el desplazamiento vertical del tornillo de avance que trasmitirá la carga hacia la probeta. Su rigidez es clave para garantizar que la fuerza se transmita de forma axial y uniforme hacia la probeta, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.23.

Figura 4.23 Esquema constructivo del puente porta tornillo propuesto



g) Tornillo de avance: Es el elemento principal de aplicación de carga axial controlada hacia la probeta, poseerá una rosca métrica M24×3, un diámetro nominal de 24 mm y una longitud total de 170 mm aproximadamente, con un tramo de rosca calibrado que permite desplazamientos suaves y precisos. Su diseño permitirá para resistir esfuerzos de compresión y torsión sin pérdida de alineación, asegurando la progresividad en la carga aplicada, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.24.

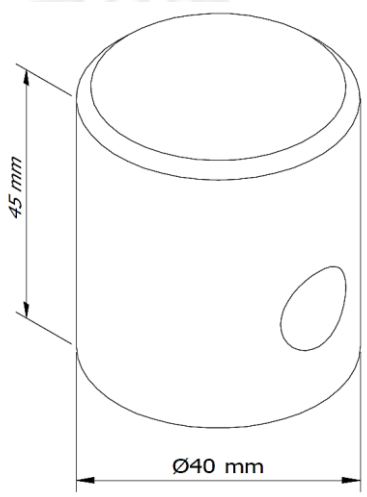
Figura 4.24 Esquema constructivo del tornillo de avance propuesto



h) Base superior de tornillo: Este componente sirve como asiento superior del tornillo de avance y transfiere directamente la carga hacia el tornillo de avance, su diseño circular con aproximadamente 40 mm de diámetro exterior, 45 mm de altura y mecanizado

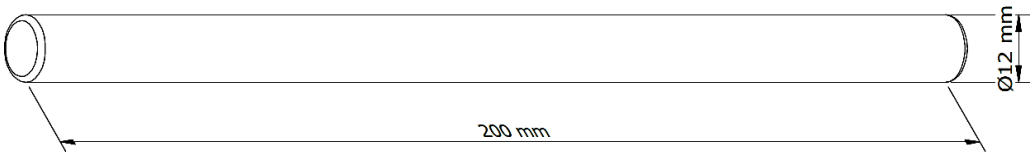
central M24×3 que permitirá un acople roscado preciso. Además, presentará un taladro transversal que facilita la inserción de la palanca de accionamiento del tornillo de avance, estará fabricada en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se aprecia en la Figura 4.25.

Figura 4.25 Esquema constructivo de la base superior del tornillo propuesto



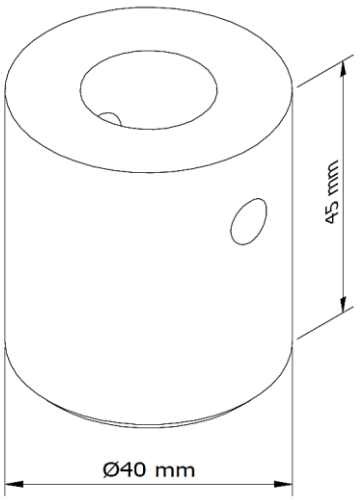
i) Palanca: Es el elemento ergonómico de accionamiento manual del tornillo de avance, tendrá una longitud aproximada de 200 mm, con geometría de sección cilíndrica de 12 mm de diámetro y extremos redondeados que facilitan la manipulación y reducen esfuerzos del operador. Su diseño permite aplicar la carga axial de manera gradual y controlada durante el ensayo, estará fabricada en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.26.

Figura 4.26 Esquema constructivo de la palanca propuesta



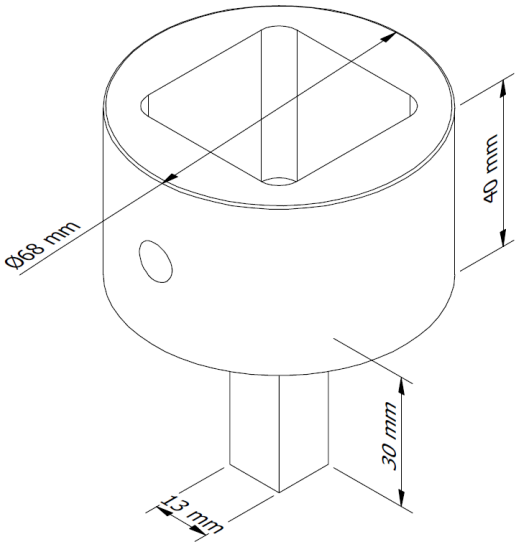
j) **Base inferior de tornillo:** Funciona como soporte estructural de contacto inferior para la transmisión de carga axial, presentará un diámetro nominal de 40 mm y una altura de 45 mm, con mecanizado central de aproximadamente 19 mm de diámetro para la inserción de la parte lisa del tornillo de avance y taladros radiales para su fijación, que permita asegurar la rigidez suficiente para evitar deformaciones bajo carga. Estará fabricada en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se aprecia en la Figura 4.27.

Figura 4.27 Esquema constructivo de la base inferior de tornillo propuesto



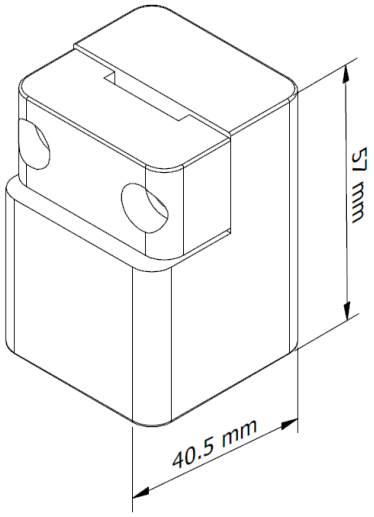
k) **Adaptador para cubo inferior:** El adaptador permitirá acoplar el cubo inferior con la base y las probetas, asegurando una correcta transmisión de la carga axial sin desalineamientos ya que contará con un extremo de sección cuadrada de 13 mm de lado y aproximadamente 30 mm de largo, el cual será introducido en el inserto circular ubicado en el soporte base. Poseerá un diámetro exterior aproximado de 68 mm, una altura total de 40 mm estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se muestra en la Figura 4.28.

Figura 4.28 Esquema constructivo del adaptador para cubo inferior propuesto



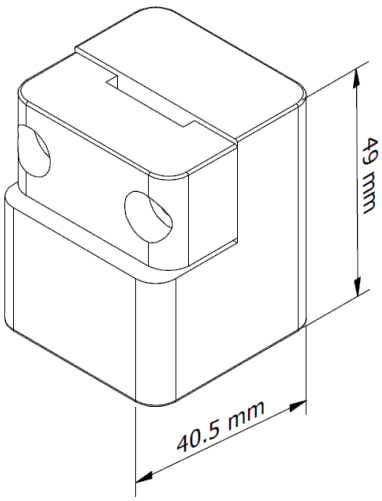
l) Cubo inferior de apoyo empotrado con mordaza: Servirá como elemento de apoyo para la probeta, generando una condición de frontera controlada que simula un empotramiento rígido, presentará una geometría cúbica de 40.5 mm de lado y una altura de 57 mm, con ranuras y perforaciones roscadas distribuidas simétricamente, su diseño asegura la correcta sujeción de la probeta durante el ensayo sin generar torsiones no deseadas, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, tal como se aprecia en la Figura 4.29.

Figura 4.29 Esquema constructivo del cubo inferior con mordaza propuesta



m) Cubo superior de apoyo empotrado con mordaza: Actuará como un elemento móvil transmisor de la carga axial hacia la probeta. Al igual que el cubo inferior, posee una sección cúbica de 40.5 mm de lado y una altura de 49 mm, con perforaciones roscadas y ranuras para alojar la probeta y asegurar su centrado axial, estará fabricado en acero estructural ASTM A36 – Grado A36, con lo cual se garantizará la repetibilidad en los ensayos, tal como se muestra en la Figura 4.30.

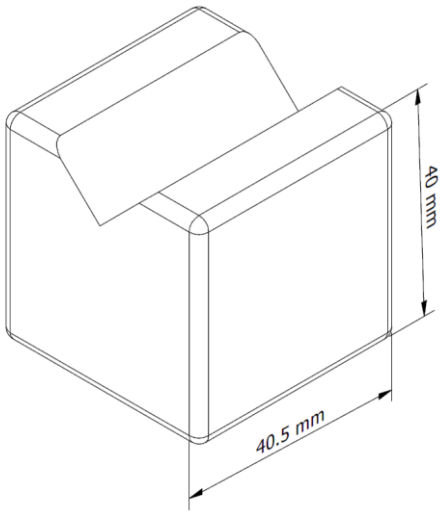
Figura 4.30 Esquema constructivo del cubo superior con mordaza propuesto



n) Cubo inferior y superior de apoyo articulado: Estos componentes permiten reproducir la condición de apoyo articulado en los extremos de la probeta, garantizando la libertad de giro necesaria para el desarrollo del modo fundamental de pandeo sin generar restricciones adicionales. Ambos cubos, fabricados en acero estructural ASTM A36 – Grado A36 mediante mecanizado convencional, presentan una sección cúbica de 40.5 mm de lado, una altura de 40 mm e incorporan en su superficie de contacto una ranura en "V" de 90° con una profundidad de 10 mm, diseñada para alojar el extremo de la probeta previamente desbastado con la misma geometría, asegurando un asiento centrado y sin excentricidades iniciales. El cubo inferior se instala sobre el adaptador correspondiente y se fija mediante un perno prisionero lateral que evita desplazamientos durante la aplicación de carga, mientras que el cubo superior se posiciona directamente sobre el extremo superior de la probeta, alineado con el puente guía para cubo superior, permitiendo la transmisión axial de la carga, la articulación requerida y evitando

desalineamientos o desplazamientos del cubo durante el ensayo. En conjunto, ambos cubos posibilitan la configuración de ensayos empotrado–articulado o articulado–articulado según el tipo de prueba, contribuyendo a la repetibilidad del procedimiento y a la correcta reproducción del comportamiento teórico del pandeo, tal como se muestra en la Figura 4.31.

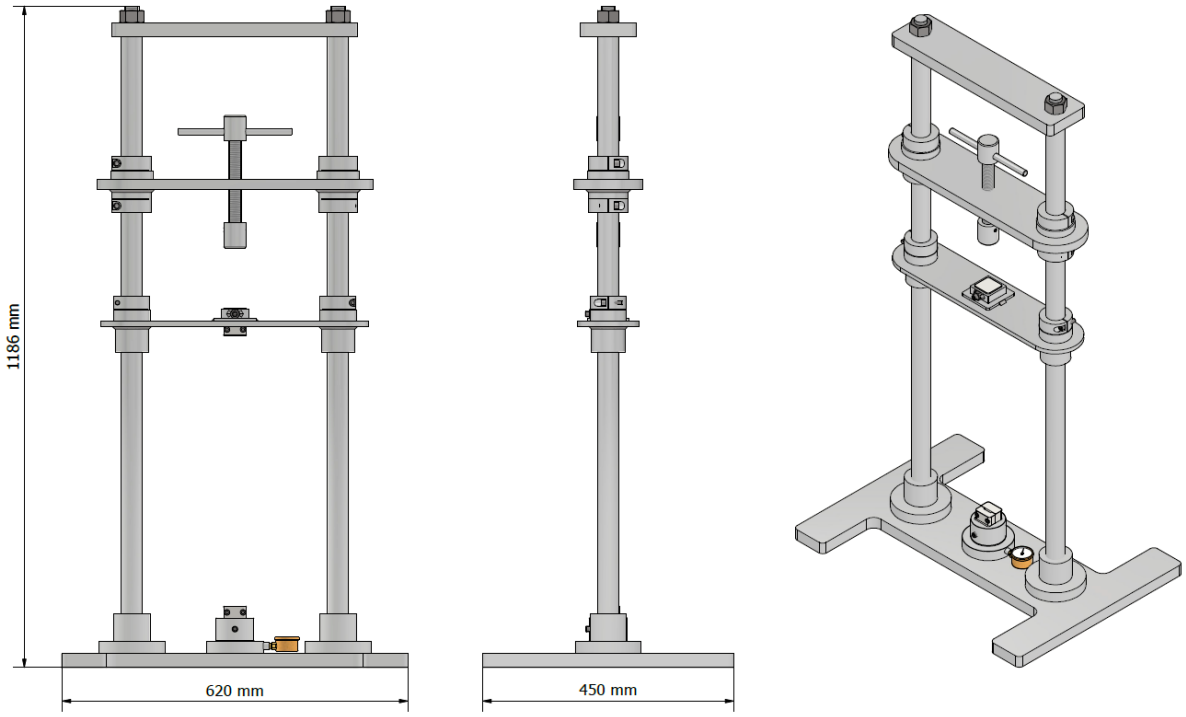
Figura 4.31 Esquema constructivo del cubo superior e inferior de apoyo articulado propuesto



4.5.2. Descripción técnica del módulo educativo de pandeo

El módulo educativo para ensayos de pandeo construido presenta una configuración estructural tipo bastidor vertical, con una altura de 1186 mm, un ancho total de 620 mm y una profundidad de 450 mm las cuales se pueden apreciar en la Figura 4.32, dimensiones que permiten su uso dentro de laboratorios académicos sin requerimientos especiales de espacio. El peso total del equipo es aproximadamente de 85.3 kg, valor estimado a partir del modelo tridimensional desarrollado en Autodesk Inventor y de la sumatoria de masas de los componentes estructurales fabricados en acero estructural ASTM A36.

Figura 4.32 Medidas generales del módulo educativo de pandeo



El sistema de aplicación de carga está diseñado para trabajar con un dinamómetro analógico de capacidad máxima de 2500 N, lo que define el rango operativo seguro del módulo durante los ensayos de pandeo.

Las probetas admitidas para ser ensayadas en el módulo educativo de pandeo, corresponden a barras planas metálicas con combinaciones de espesor de 3.00 mm (1/8”) a 4.78 mm (3/16”) y anchos de 12.64 mm (1/2") a 19.15 mm (3/4"), cuyas medidas son seleccionadas para asegurar relaciones de esbeltez adecuadas para la aplicación de la ecuación de Euler. Las longitudes libres de las probetas corresponden a medidas entre 500 mm hasta un máximo de 720 mm, con longitudes totales asociadas entre 544 mm y 764 mm, dependiendo de la configuración de apoyo empleada, tomando en cuenta que para el caso de apoyos del tipo empotrado la probeta debe ingresar 22 mm dentro de la mordaza del apoyo. Si bien el módulo educativo admite probetas con longitud libre máxima de 720 mm y longitud total de 764 mm, el proceso de montaje de probetas de esta longitud en el módulo educativo se torna significativamente más dificultoso, incrementando el riesgo de desalineación inicial y de deformaciones involuntarias de la probeta durante la instalación. Por tal motivo, se determinó la medida

de longitud máxima de las probetas a ensayarse es de 650 mm de longitud libre y 694 mm de longitud total, ya que, dichas longitudes proporcionan una condición operativa más adecuada para la ejecución de los ensayos de pandeo, permitiendo un montaje más controlado, reducen esfuerzos accidentales previos al ensayo y facilitan la correcta alineación axial dentro del módulo educativo, sin comprometer las condiciones de esbeltez requeridas para el estudio del fenómeno de pandeo elástico.

El equipo no cuenta con certificación comercial, debido a que se trata de un prototipo educativo desarrollado con fines académicos y de investigación, sin embargo, su diseño se fundamenta en normas técnicas reconocidas como AISC 360-22, ASTM Manual 7 (MNL7-E13) e ISO 16000-34, lo que permite asegurar condiciones de ensayo reproducibles y confiables dentro del contexto de prácticas de laboratorio universitarias.

La construcción del módulo, así como la definición de sus componentes principales, se orientó a garantizar rigidez estructural, alineamiento axial adecuado y estabilidad durante la aplicación de carga, factores indispensables para obtener mediciones consistentes de la carga crítica de pandeo.

4.5.3. Acabado superficial y protección de los componentes del módulo

En la versión final del módulo educativo de pandeo se establecieron criterios diferenciados de acabado superficial en función del comportamiento mecánico y operativo de cada componente. Considerando que la totalidad de las piezas fueron fabricadas en acero estructural ASTM A36, se adoptó como medida de protección anticorrosiva la aplicación de pintura en los elementos estructurales que no presentan movimiento relativo durante la operación del equipo, tales como el soporte base, puente guía para cubo superior, puente porta tornillo, puente de columnas principales, tornillo de avance, base superior e inferior del tornillo y los cubos de apoyo articulado. Este tratamiento contribuye a reducir la oxidación, facilita las labores de limpieza y mejora la presentación general del equipo para su uso en ambientes académicos.

No obstante, determinados componentes fueron diseñados deliberadamente sin recubrimiento de pintura y presentan un acabado semipulido, debido a que se encuentran sometidos a deslizamiento, contacto mecánico o ajustes frecuentes durante la ejecución de los ensayos. Entre estos elementos se encuentran las columnas principales, la palanca de la base superior del tornillo de avance, el adaptador para cubo inferior y los cubos de apoyo con mordaza; en estos casos, la aplicación de pintura podría incrementar la

fricción, afectar el alineamiento axial de la probeta, dificultar el desplazamiento de los componentes y provocar desprendimientos del recubrimiento por desgaste durante el uso repetitivo.

Por este motivo, el criterio adoptado prioriza la funcionalidad mecánica y la estabilidad operativa del sistema de carga, manteniendo superficies metálicas limpias y con baja resistencia al deslizamiento en las zonas de contacto, sin comprometer la protección general del equipo. De esta forma, el módulo integra adecuadamente criterios de durabilidad, seguridad operativa y desempeño mecánico, resultando coherente con su finalidad educativa y con las condiciones reales de uso en laboratorio.

4.6. PLANOS DE CONJUNTO, MONTAJE Y DESPIECE

El módulo educativo de ensayo de pandeo fue modelado íntegramente en el software Autodesk Inventor Professional 2025, siguiendo los lineamientos del diseño paramétrico y una secuencia lógica de construcción orientada a la fabricación real de cada componente. Cada plano fue elaborado considerando criterios de manufactura, tolerancias geométricas funcionales y condiciones de ensamblaje, con el propósito de asegurar la correcta alineación de los elementos, la transmisión adecuada de la carga axial y la estabilidad estructural del conjunto durante la ejecución de los ensayos experimentales.

Los planos de despiece permiten identificar de manera individual cada uno de los componentes del módulo, especificando dimensiones, materiales, procesos de fabricación y detalles geométricos necesarios para su mecanizado, tales como perforaciones, ranuras, espesores y superficies de contacto. Esta información resulta fundamental para garantizar que las piezas puedan ser fabricadas con precisión y ensambladas sin interferencias, manteniendo las condiciones de alineamiento requeridas para el correcto funcionamiento del sistema de carga.

Asimismo, el plano de montaje presenta la secuencia de ensamblaje, la disposición relativa de las piezas, los puntos de fijación y los elementos de unión, facilitando la correcta integración de la estructura portante, el sistema de guiado, el mecanismo de aplicación de carga y los dispositivos de apoyo de las probetas. Este plano permite verificar la coherencia entre los componentes diseñados y su interacción mecánica dentro del conjunto estructural del módulo.

Por su parte, el plano de conjunto muestra la configuración final del módulo educativo, permitiendo evaluar visualmente la distribución espacial de los subsistemas, la alineación del eje de carga y la relación geométrica entre columnas, puentes, guías y apoyos. Asimismo, los

planos incluyen cotas dimensionales, escalas gráficas y referencias geométricas que permiten interpretar con precisión las proporciones y tolerancias de cada componente, asegurando la correcta reproducción dimensional del equipo.

Esta documentación técnica constituye un respaldo fundamental del proceso de diseño, ya que permite no solo la verificación geométrica del conjunto, sino también la ejecución del proceso de fabricación y ensamblaje del módulo como equipo de laboratorio funcional, garantizando su replicabilidad y su posible implementación futura en otros entornos académicos.

Los planos de conjunto, montaje y despiece del Módulo Educativo de Pandeo diseñado se presentan de forma detallada en el Anexo A, donde se incluyen las vistas necesarias para su correcta interpretación y utilización en procesos de fabricación, ensamblaje, mantenimiento y eventual replicación del equipo.

CAPÍTULO V

COSTOS Y RESULTADOS

5. COSTOS Y RESULTADOS

5.1. FABRICACIÓN

La Figura 5.1 muestra el proceso de fabricación del puente guía del cubo superior, elemento estructural encargado de mantener la alineación del cubo durante la aplicación de carga axial. En esta etapa se realizó el maquinado del bloque principal y la verificación del centrado respecto al eje de carga, asegurando la precisión dimensional necesaria para evitar desviaciones laterales durante el ensayo de pandeo. El procedimiento se llevó a cabo en banco de trabajo, utilizando herramientas de mecanizado convencional bajo control de tolerancias ajustadas.

Figura 5.1 Fabricación del puente guía del cubo superior



La Figura 5.2 presenta los cubos con mordaza diseñados para representar las condiciones de apoyo empotrado y articulado dentro del módulo de ensayo. Estas piezas, complementarias al puente guía, fueron mecanizadas con precisión para reproducir los tipos de frontera establecidos en la teoría del pandeo de Euler. El cubo con mordaza fija permite simular el empotramiento completo, mientras que el cubo articulado facilita el giro controlado del extremo

libre de la probeta, garantizando una correcta comparación experimental entre ambos modos de apoyo.

Figura 5.2 Componentes del puente guía del cubo superior



5.2. COSTOS

5.2.1. Costos directos

5.2.1.1 Costos de materiales

Los costos directos de materiales incluyen todos los insumos empleados en la fabricación del módulo educativo de pandeo, tales como aceros ASTM A36, elementos de unión, lubricantes, pinturas, probetas y el dinamómetro de 2500 N utilizado para la aplicación de carga. En la Tabla 5.1 se detallan los materiales requeridos, sus unidades de medida, cantidades y valores unitarios correspondientes.

Tabla 5.1 Costos directos de materiales

Ítem	Elemento	Und	Cant.	P.U. (S/.)	Total (S/.)
1	Dinamómetro 2500 N	und	1	4,119.71	**4,119.71**
2	Acero ASTM A36 (planchas/perfiles)	kg	70	18.00	1,260.00
3	Acero ASTM A36 (barras/cubos)	kg	35	18.00	630.00
4	Tornillo hexagonal 1″ × 3″ (Gr. 8.8)	und	2	38.00	76.00
5	Tuerca 1″	und	2	12.00	24.00
6	Seguros (Seeger)	und	2	6.00	12.00
7	Prisioneros M10 × 1.25	und	2	8.00	16.00
8	Pintura epóxica industrial	gal	1	160.00	160.00
9	Solvente desengrasante	gal	1	40.00	40.00
10	Discos de corte y desbaste 4½″	und	6	8.00	48.00
11	Grasa/lubricantes	und	1	40.00	40.00
12	Probetas de acero (50 cm)	und	4	35.00	140.00
13	Probetas de aluminio (50 cm)	und	4	30.00	120.00
14	Consumibles e imprevistos	—	—	—	150.00
	Total materiales (S/)				**6,835.71**

5.2.1.2 Costos de estructura metálica del módulo

Los costos directos de la estructura metálica del módulo comprenden los elementos fabricados en acero ASTM A36, tales como la base, placas, columnas guía y cubos superiores e inferiores. En la Tabla 5.2 se presentan los componentes principales utilizados, junto con sus respectivas unidades, cantidades y costos de adquisición.

Tabla 5.2 Costos directos de estructura metálica del módulo

Ítem	Elemento	Und	Cant.	P.U. (S/.)	Total (S/.)
1	Base inferior ASTM A36 (plancha 12 mm)	kg	18	18.00	324.00
2	Placa superior ASTM A36 (10 mm)	kg	12	18.00	216.00
3	Puentes/placas intermedias ASTM A36	kg	20	18.00	360.00
4	Columnas guía Ø38.1 mm × 1024 mm (A36)	und	2	180.00	360.00
5	Cubo superior e inferior (A36)	kg	10	18.00	180.00
6	Tornillo de avance M24 × 3 x 170 mm	und	1	220.00	220.00
7	Palanca de operación 204 mm	und	1	80.00	80.00

8	Bocinas	und	4	100.00	400.00
9	Adaptador para cubo inferior	und	1	50.00	50.00
	Total estructura (S/)				**2,190.00**

5.2.1.3 Costos de fabricación

Los costos directos de fabricación comprenden las actividades necesarias para el proceso de manufactura del módulo educativo, incluyendo corte, maquinado, perforado, roscado, soldadura y ensamblaje de los componentes estructurales. En la Tabla 5.3 se detallan los servicios realizados, sus respectivas unidades de medida y los costos asociados a cada operación.

Tabla 5.3 Costos directos de fabricación

Ítem	Servicio	Und	Cant.	P.U. (S/.)	Total (S/.)
1	Corte de perfiles y planchas	serv	1	350.00	350.00
2	Maquinado de cubos/puentes/alojamientos	serv	1	1,600.00	1,600.00
3	Perforado y roscado (M10–M24)	serv	1	280.00	280.00
4	Soldadura y ensamblaje	serv	1	600.00	600.00
5	Alineado y calibración	serv	1	300.00	300.00
6	Pintado y acabado superficial	serv	1	300.00	300.00
7	Transporte	serv	1	180.00	180.00
	Total fabricación (S/)				**3,610.00**

5.2.2. Costos Indirectos

5.2.2.1 Diseño e Ingeniería

Se considera el 20 % del total de los costos directos, correspondiente a las actividades de diseño del módulo educativo, elaboración de planos, modelado tridimensional, análisis estructural y verificación de tolerancias dimensionales. Este porcentaje cubre también la fase de ingeniería aplicada al ajuste de componentes, documentación técnica y elaboración de manuales de operación. Con ello, el costo asignado por diseño e ingeniería es de S/ 2,527.14.

5.2.2.2 Gastos Administrativos

En este rubro se incluyen los gastos derivados de movilidad, transporte interno, combustible, papelería, impresiones y coordinación logística durante el desarrollo del proyecto. Dichos costos administrativos representan las gestiones necesarias para la adquisición de materiales, coordinación de servicios externos y traslado del equipo al laboratorio. Por lo tanto, el costo total considerado para este apartado asciende a S/ 698.05.

5.2.2.3 Costos de Montaje

En este apartado se contempla la mano de obra del soldador y del personal técnico encargado del ensamblaje, ajuste y puesta en funcionamiento de los componentes estructurales y mecánicos del módulo de ensayo de pandeo. También incluye el alineamiento y la calibración final del sistema antes de su validación experimental. El costo total correspondiente al montaje fue de S/ 600.00.

5.2.3. Costo total del módulo educativo de pandeo

El costo total del módulo educativo de pandeo se determinó a partir de la suma de los costos directos, que comprendieron los materiales, la estructura metálica y los servicios de fabricación, junto con los costos indirectos, que incluyeron el diseño e ingeniería, los gastos administrativos y el montaje.

De esta manera, el costo total de construcción y puesta en funcionamiento del módulo educativo de ensayo de pandeo alcanzó un valor de S/ 16,451.91, correspondiente a la inversión efectuada para su fabricación y ensamblaje en el laboratorio como se detalla en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Costo total del módulo educativo de pandeo

Ítem	Descripción	Total (S/.)
01	Costos directos (materiales, estructura y fabricación)	12,635.71
02	Costos indirectos (diseño, administración y montaje)	3,816.20
	Costo total del módulo educativo de pandeo (S/)	**16,451.91**

5.3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS Y CONDICIONES DE ENSAYO

Para la ejecución de los ensayos de pandeo se elaboró un conjunto de doce probetas metálicas de acero estructural ASTM A36 – Grado A36, seleccionadas por su amplia aplicación

en elementos estructurales y su límite de fluencia aproximado de 250 MPa, con módulo de elasticidad promedio de 200 GPa, según la norma ASTM A36/A36M-19. El uso de un único material permitió mantener la homogeneidad en las propiedades mecánicas, asegurando que las diferencias observadas en los resultados dependan exclusivamente de las condiciones de apoyo, del espesor, del ancho de la probeta y de la longitud efectiva de pandeo.

Las probetas se distribuyeron en tres configuraciones de apoyo: empotrado–empotrado (EMP–EMP), empotrado–articulado (EMP–ART) y articulado–articulado (ART–ART). Estas combinaciones permitieron reproducir las condiciones de restricción más representativas en los análisis teóricos de pandeo elástico, conforme a los factores de longitud efectiva (K) propuestos por la norma AISC 360-22.

Cada probeta presentó una sección rectangular con espesores comprendidos entre 3.00 mm (1/8”) y 4.78 mm (3/16”), anchos entre 12.61 mm (1/2”) y 19.15 mm (3/4”), y longitudes libres de entre 500 mm y 720 mm, según se detalla en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Características geométricas de las probetas de acero ASTM A36 – Grado A36

Probetas	Espesor b (mm)	Espesor b (pulg)	Ancho h (mm)	Ancho h (pulg)	Longitud libre (mm)	Longitud total (mm)
EMP-EMP 1	3.00	1/8"	12.64	1/2"	500	540
EMP-EMP 2	3.21	1/8"	19.15	3/4"	500	540
EMP-EMP 3	4.41	3/16"	12.61	1/2"	650	690
EMP-EMP 4	4.78	3/16"	15.94	5/8"	720	760
EMP-ART 1	3.00	1/8"	12.64	1/2"	500	520
EMP-ART 2	3.21	1/8"	19.15	3/4"	500	520
EMP-ART 3	4.41	3/16"	12.61	1/2"	500	520
EMP-ART 4	4.78	3/16"	15.94	5/8"	550	570
ART-ART 1	3.00	1/8"	12.64	1/2"	500	500
ART-ART 2	3.21	1/8"	19.15	3/4"	500	500
ART-ART 3	4.41	3/16"	12.61	1/2"	500	500
ART-ART 4	4.78	3/16"	15.94	5/8"	500	500

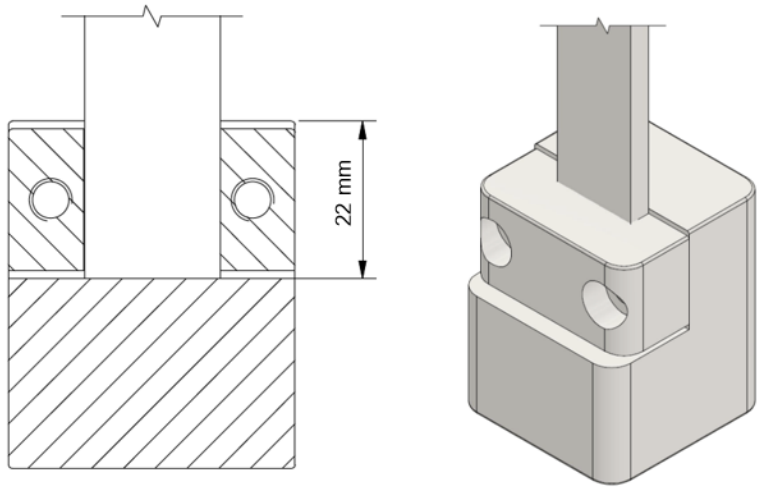
La longitud total difiere de la longitud libre debido a la porción de la probeta que se introduce en los dispositivos de apoyo, variando según la configuración:

- En la condición empotrado–empotrado, se debe agregar 44 mm a la longitud libre, ya que cada cubo de sujeción empotrado introduce 22 mm de la probeta en su interior como se muestra en la Figura 5.3.

- En la configuración empotrado–articulado, se agrega 22 mm a la longitud libre, correspondientes al extremo empotrado como se indica en la Figura 5.3, mientras que el otro extremo se apoya directamente sobre el cubo articulado sin inserción como se muestra en la Figura 5.4.
- En la condición articulado–articulado, la longitud libre coincide con la longitud total, dado que la probeta se apoya externamente sobre ambos cubos articulados sin introducirse en ellos como se indica en la Figura 5.4.

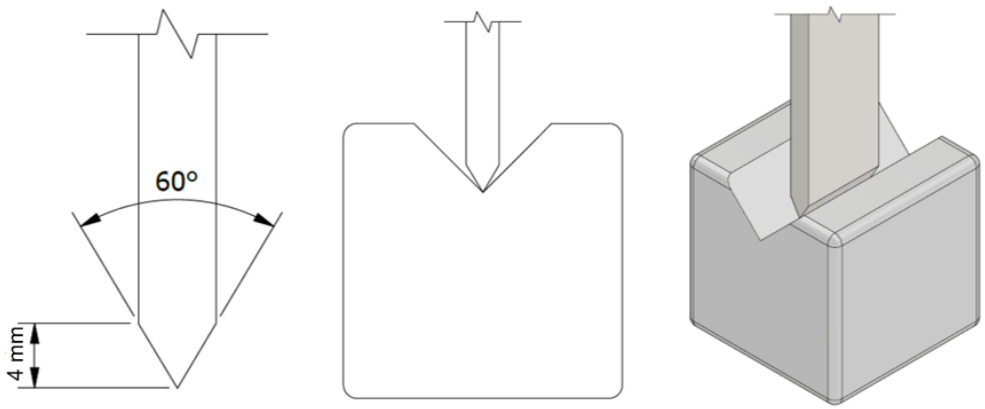
Los extremos de las probetas se prepararon de acuerdo con el tipo de apoyo, el extremo destinado al cubo de apoyo empotrado fue mecanizado con corte recto y superficie completamente lisa, garantizando una transmisión axial uniforme de la carga, tal como se aprecia en la Figura 5.3.

Figura 5.3 Extremo de la probeta en el cubo de apoyo empotrado



En cambio, el extremo correspondiente al cubo de apoyo articulado fue mecanizado con una punta de 60°, formada por dos planos simétricos desbastados a ambos lados del ancho de la probeta, con una altura de 4 mm, tal como se muestra en la Figura 5.4. Esta geometría permitió el asentamiento puntual y estable de la probeta sobre el alojamiento cóncavo del cubo articulado, asegurando la libertad de rotación y evitando concentraciones de esfuerzo en los bordes de contacto.

Figura 5.4 Extremo de la probeta en el cubo de apoyo articulado



Durante la ejecución de los ensayos se verificó la correcta alineación axial de las probetas y la rigidez de los dispositivos de sujeción. Cada probeta fue ensayada en tres repeticiones consecutivas, aplicando una carga axial creciente mediante el sistema de tornillo de avance del módulo de ensayo hasta alcanzar la carga crítica de pandeo, la medición de la carga se realizó mediante un dinamómetro analógico de 2500 N.

El detalle completo de cada probeta, incluyendo sus dimensiones medidas, condición de apoyo, longitudes efectivas y repeticiones de ensayo, se presenta en el Anexo B.

5.4. PROCESO DE ENSAMBLAJE DEL MÓDULO EDUCATIVO DE PANDEO

Con el fin de documentar el proceso de materialización del diseño propuesto, se registraron las principales etapas de fabricación y ensamblaje del módulo educativo de pandeo, las cuales permiten apreciar la transición desde el modelo digital hacia la configuración física final del equipo. Este registro permite describir de manera visual el procedimiento seguido para la integración progresiva de los componentes estructurales y funcionales del sistema.

El registro fotográfico comprende el armado de la estructura portante, la instalación de las columnas principales en el soporte base, la colocación del puente guía para el cubo superior, el montaje del puente porta tornillo, la instalación del puente de columnas principales y la incorporación de los dispositivos de apoyo para las probetas. Estas etapas reflejan la secuencia de ensamblaje adoptada y el acoplamiento mecánico entre las distintas partes del módulo.

Asimismo, se documentan las actividades de ajuste y verificación funcional previas a la ejecución de los ensayos, permitiendo observar la correcta alineación del sistema de carga y la configuración de las condiciones de apoyo de las probetas. Estas actividades forman parte del

proceso normal de puesta en operación del equipo antes de su utilización en las pruebas experimentales.

La documentación fotográfica presentada permite complementar la descripción técnica del módulo, mostrando su configuración final y las etapas relevantes de integración de componentes, lo cual contribuye a una mejor comprensión del funcionamiento general del equipo dentro del contexto académico para el cual fue diseñado.

El registro completo del proceso de ensamblaje y del módulo educativo construido se presenta en el Anexo D, donde se incluyen las principales etapas de integración estructural y la configuración final del equipo previo a la ejecución de los ensayos de pandeo.

5.5. CÁLCULO TEÓRICO DE LA CARGA CRÍTICA DE PANDEO

El cálculo teórico de la carga crítica de pandeo se realizó aplicando la ecuación de Euler, considerando las propiedades geométricas de cada probeta, el módulo de elasticidad del acero estructural ASTM A36 – Grado A36 con un módulo de elasticidad de 200 GPa y las condiciones de apoyo definidas para cada configuración experimental.

Para el análisis se establecieron dos escenarios de referencia:

1) **Condiciones ideales:** Con factores de longitud efectiva K de 0.5, 0.7 y 1.0 para las configuraciones empotrado–empotrado, empotrado–articulado y articulado–articulado, respectivamente.

2) **Condiciones recomendadas:** Con factores K de 0.65, 0.8 y 1.0, propuestos por la norma AISC 360-22 para las configuraciones empotrado–empotrado, empotrado–articulado y articulado–articulado, respectivamente, que representan con mayor precisión el comportamiento real de los apoyos implementados en el módulo experimental.

En cada caso se emplearon los parámetros geométricos obtenidos directamente a partir de las dimensiones físicas de las probetas, específicamente su espesor y ancho, a partir de los cuales se determinaron el momento de inercia, el radio de giro y la esbeltez necesarios para el cálculo teórico de la carga crítica. Debido a que el dinamómetro analógico utilizado en el módulo educativo de pandeo posee una capacidad máxima de 2500 N, fue necesario ajustar la longitud libre de cada tipo de probeta de modo que los valores teóricos de carga crítica correspondientes a cada configuración de apoyo y a los parámetros geométricos propios de cada probeta no excedieran la capacidad máxima del instrumento. Esta adecuación permitió definir

longitudes libres compatibles con la capacidad del dinamómetro, asegurando que los ensayos experimentales pudieran desarrollarse dentro de un rango operativo seguro y sin riesgo de sobrecarga. Los resultados obtenidos para las tres configuraciones de apoyo y para las diferentes medidas de probetas en función de su espesor y ancho se presentan en las Tablas 5.6, 5.7 y 5.8 que se muestran a continuación.

Tabla 5.6 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Empotrado-Empotrado

Probeta	**EMP-EMP 1**		**EMP-EMP 2**		**EMP-EMP 3**		**EMP-EMP 4**	
Espesor (b) y Ancho (h) de probeta	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**
Dimensiones (pulg)	1/8"	1/2"	1/8"	3/4"	3/16"	1/2"	3/16"	5/8"
Dimensiones (mm)	3.00	12.64	3.21	19.15	4.41	12.61	4.78	15.94
Relación b/h (Recomendado ≤ 0.5)	0.24		0.17		0.35		0.30	
Factor de longitud efectiva (k) ideal	0.50		0.50		0.50		0.50	
Factor de longitud efectiva (k) recomendado	0.65		0.65		0.65		0.65	
Modulo E (Gpa, Pa)	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11
Momento de Inercia I (m4)	2.84E-11		5.28E-11		9.01E-11		1.45E-10	
Longitud libre de probeta (m, mm)	0.50	500	0.50	500	0.65	650	0.72	720
Área (m2)	3.79E-05		6.15E-05		5.56E-05		7.62E-05	
Radio de giro r (m)	0.0009		0.0009		0.0013		0.0014	
Esbeltez (λ) (Recomendado > 100)	577.35		539.58		510.58		521.79	
Esfuerzo crítico (Pa)	1.40E+07		1.60E+07		1.79E+07		1.72E+07	
Comparación de resultados	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**
Carga crítica de pandeo (N)	898.21	531.49	1667.06	986.43	1684.27	996.61	2209.61	1307.46

Tabla 5.7 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Empotrado-Articulado

Probeta	**EMP-ART 1**		**EMP-ART 2**		**EMP-ART 3**		**EMP-ART 4**	
Espesor (b) y Ancho (h) de probeta	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**
Dimensiones (pulg)	1/8"	1/2"	1/8"	3/4"	3/16"	1/2"	3/16"	5/8"
Dimensiones (mm)	3.00	12.64	3.21	19.15	4.41	12.61	4.78	15.94
Relación b/h (Recomendado ≤ 0.5)	0.24		0.17		0.35		0.30	
Factor de longitud efectiva (k) ideal	0.7		0.7		0.7		0.7	
Factor de longitud efectiva (k) recomendado	0.8		0.8		0.8		0.8	
Modulo E (Gpa, Pa)	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11
Momento de Inercia I (m4)	2.84E-11		5.28E-11		9.01E-11		1.45E-10	
Longitud libre de probeta (m, mm)	0.50	500	0.50	500	0.50	500	0.55	550
Área (m2)	3.79E-05		6.15E-05		5.56E-05		7.62E-05	
Radio de giro r (m)	0.0009		0.0009		0.0013		0.0014	
Esbeltez (λ) (Recomendado > 100)	577.35		539.58		392.76		398.59	
Esfuerzo crítico (Pa)	9.25E+06		1.06E+07		2.00E+07		1.94E+07	
Comparación de resultados	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**
Carga crítica de pandeo (N)	458.27	350.86	850.54	651.20	1452.26	1111.88	1931.96	1479.16

Tabla 5.8 Cálculo Teórico de la Carga Crítica de Pandeo para condiciones de apoyo Articulado-Articulado

Probeta	**ART-ART 1**		**ART-ART 2**		**ART-ART 3**		**ART-ART 4**	
Espesor (b) y Ancho (h) de probeta	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**	**b**	**h**
Dimensiones (pulg)	1/8"	1/2"	1/8"	3/4"	3/16"	1/2"	3/16"	5/8"
Dimensiones (mm)	3.000	12.640	3.210	19.150	4.410	12.610	4.780	15.940
Relación b/h (Recomendado ≤ 0.5)	0.237		0.168		0.350		0.300	
Factor de longitud efectiva (k) ideal	1		1		1		1	
Factor de longitud efectiva (k) recomendado	1		1		1		1	
Modulo E (Gpa, Pa)	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11	200	2E+11
Momento de Inercia I (m4)	2.84E-11		5.28E-11		9.01E-11		1.45E-10	
Longitud libre de probeta (m, mm)	0.500	500	0.500	500	0.500	500	0.500	500
Área (m2)	3.79E-05		6.15E-05		5.56E-05		7.62E-05	
Radio de giro r (m)	0.0009		0.0009		0.0013		0.0014	
Esbeltez (λ) (Recomendado > 100)	577.350		539.580		392.755		362.354	
Esfuerzo crítico (Pa)	5.92E+06		6.78E+06		1.28E+07		1.50E+07	
Comparación de resultados	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**	**Ideal**	**Recomendado**
Carga crítica de pandeo (N)	224.55	224.55	416.77	416.77	711.61	711.61	1145.46	1145.46

Al comparar los resultados teóricos bajo condiciones ideales y recomendadas, se observa que las cargas críticas obtenidas con los valores recomendados de K son menores, lo que concuerda con el aumento de la longitud efectiva de pandeo al aproximarse a las condiciones reales de apoyo.

Asimismo, las probetas con mayor espesor (b) y menor relación de esbeltez (λ) presentan una mayor resistencia al pandeo, evidenciando la influencia directa de la rigidez de la sección transversal. En contraste, las probetas más delgadas y con longitudes mayores tienden a presentar cargas críticas teóricas más bajas, debido a su menor rigidez flexional y a la mayor propensión a la inestabilidad lateral.

Estos resultados teóricos constituyen la base de referencia para la comparación con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos, lo que permitirá evaluar la fidelidad del módulo fabricado y la influencia del tipo de apoyo sobre la estabilidad estructural de las probetas.

5.6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE CARGA CRÍTICA DE PANDEO

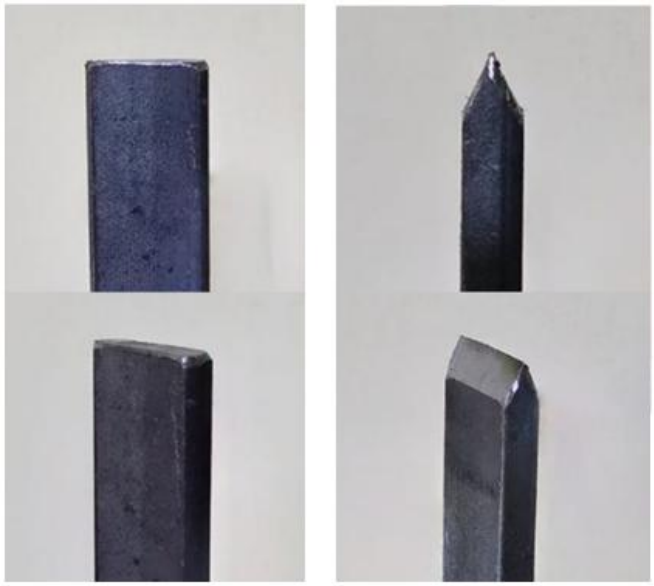
Una vez verificado el correcto funcionamiento del módulo de ensayo de pandeo y comprobadas las condiciones geométricas de las probetas de acero estructural ASTM A36 – Grado A36 como se puede apreciar en la Figura 5.5.

Figura 5.5 Probetas para ensayo de pandeo de acero estructural ASTM A36 – Grado A36



Respecto a los extremos de las probetas que irán en contacto con los cubos de apoyo, estos se pueden apreciar en la Figura 5.6, en donde la figura (a) muestra el extremo de contacto en los cubos de apoyo empotrado y la figura (b) el extremo de contacto para los cubos de apoyo articulado, se procedió a la ejecución de los ensayos experimentales.

Figura 5.6 Extremos de contacto de probetas para ensayo de pandeo según la condición de apoyo



Antes de cada prueba se realizó la alineación axial del conjunto, asegurando que el eje longitudinal de la probeta coincidiera con la línea de aplicación de la carga, con el fin de evitar excentricidades iniciales que pudieran generar esfuerzos de flexión adicionales. Asimismo, se inspeccionaron las superficies de contacto y las condiciones de apoyo, verificando que las probetas encajaran adecuadamente en los cubos empotrados según lo descrito en el apartado 5.3. Para la secuencia correspondiente al tipo de apoyo empotrado–empotrado, se ilustra en la Figura 5.7, donde la figura (a) muestra la instalación del cubo empotrado inferior fijado directamente en el extremo de la probeta, la figura (b) presenta la colocación de la probeta junto con ambos cubos empotrados dentro del módulo de ensayo, y la figura (c) evidencia el alineamiento del puente guía del cubo superior respecto a la altura del cubo empotrado superior, asegurando la correcta verticalidad y centrado del espécimen antes de la aplicación de la carga.

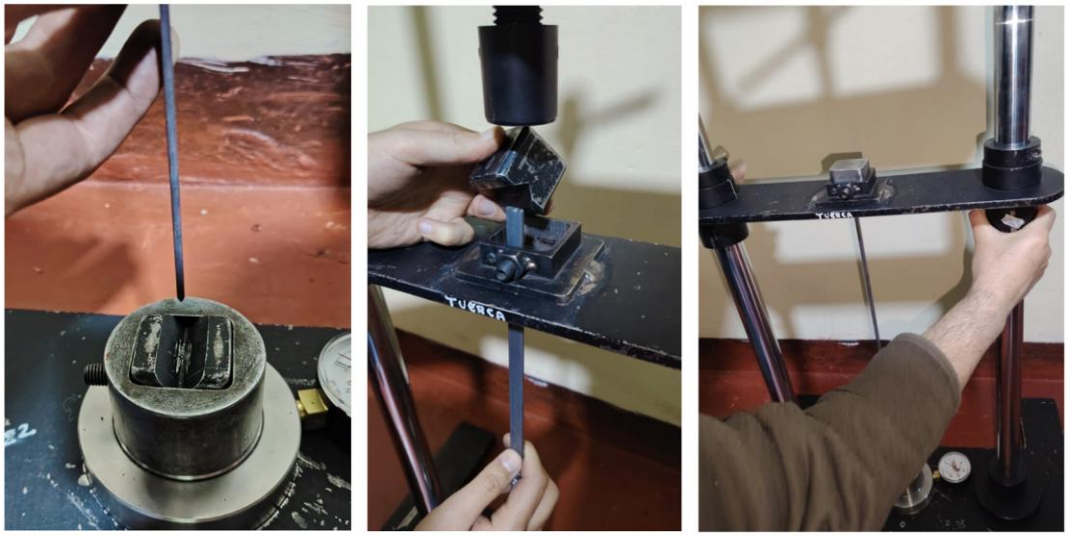
Figura 5.7 Encaje y alineamiento de las probetas en los cubos de apoyo empotrado



(a) (b) (c)

En el caso de las configuraciones que requieren apoyo articulado, se verificó previamente que los extremos de las probetas presentaran el desbaste simétrico de 60° y una altura de 4 mm, tal como se especifica en el apartado 5.3, asegurando un asiento correcto dentro de la ranura del cubo de apoyo articulado. Posteriormente, se procedió con la instalación y alineación de los elementos del conjunto. Para la secuencia correspondiente al apoyo articulado, se ilustra en la Figura 5.8, donde la figura (a) muestra el encaje del extremo inferior de la probeta en el cubo articulado previamente montado en el adaptador inferior del módulo, la figura (b) presenta la inserción del extremo superior de la probeta en el cubo articulado correspondiente, garantizando su correcta posición dentro de la ranura, y la figura (c) evidencia el ajuste del puente guía del cubo superior del módulo respecto a la altura del cubo articulado superior, permitiendo verificar la verticalidad de la probeta y asegurar su alineamiento antes de iniciar la aplicación de la carga.

Figura 5.8 Encaje y alineamiento de las probetas en los cubos de apoyo articulado



(a) (b) (c)

Los ensayos se efectuaron bajo tres configuraciones de apoyo: empotrado–empotrado (EMP–EMP), empotrado–articulado (EMP–ART) y articulado–articulado (ART–ART). Cada configuración se preparó respetando las dimensiones efectivas de longitud libre y total, garantizando que las condiciones de restricción correspondieran a los factores de longitud efectiva establecidos por la norma AISC 360-22.

Durante el procedimiento, cada probeta fue sometida a una carga axial de compresión creciente mediante el tornillo de avance del módulo, aplicando la fuerza de manera uniforme y continua hasta que se produjo la inestabilidad elástica.

La medición de la carga se realizó empleando un dinamómetro analógico, ubicado debajo del adaptador para el cubo de apoyo inferior del módulo, cuya escala graduada permitía registrar de forma directa el incremento progresivo de la fuerza aplicada.

La carga crítica de pandeo experimental se identificó a partir de dos criterios complementarios: visual, por la aparición de una deflexión lateral repentina en la zona media de la probeta, y mecánico, cuando la lectura del dinamómetro dejaba de aumentar a pesar de continuar el avance del tornillo de carga, lo que evidenciaba la pérdida de rigidez del sistema.

Para cada probeta, el ensayo se repitió tres veces bajo las mismas condiciones de montaje, velocidad de aplicación y control de alineación, con el fin de garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos.

La Tabla 5.9 presenta los valores de carga máxima obtenidos en cada repetición, así como el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación correspondientes a cada probeta y tipo de apoyo. Para una revisión detallada de las dimensiones de cada espécimen, su condición de apoyo, longitudes efectivas y los valores individuales de carga crítica registrados en cada repetición, se puede consultar el Anexo B, donde se muestra el consolidado completo de probetas empleadas en los ensayos.

Tabla 5.9 Resultados experimentales de carga crítica de pandeo (N)

N° repetición	EMP-EMP 1	EMP-EMP 2	EMP-EMP 3	EMP-EMP 4	EMP-ART 1	EMP-ART 2	EMP-ART 3	EMP-ART 4	ART-ART 1	ART-ART 2	ART-ART 3	ART-ART 4
1	620	1020	1050	1600	380	670	1100	1440	220	390	680	1050
2	620	1180	1100	1300	370	640	1080	1390	220	410	670	990
3	600	1220	1090	1280	370	620	1100	1450	225	400	670	980
Promedio (N)	613.33	1140.00	1080.00	1393.33	373.33	643.33	1093.33	1426.67	221.67	400.00	673.33	1006.67
Desviación Estándar (N)	11.55	105.83	26.46	179.26	5.77	25.17	11.55	32.15	2.89	10.00	5.77	37.86
Coeficiente de Variación CV (%)	1.88%	9.28%	2.45%	12.87%	1.55%	3.91%	1.06%	2.25%	1.30%	2.50%	0.86%	3.76%

Los resultados experimentales confirman que la carga crítica de pandeo aumenta proporcionalmente con el espesor (b) y el ancho (h) de la probeta, y disminuye con el incremento de la longitud libre, lo que concuerda con la teoría de Euler sobre el pandeo elástico.

En las configuraciones empotrado–empotrado, donde ambos extremos están completamente restringidos, se alcanzaron las mayores cargas críticas promedio, con valores entre 613 N y 1393 N. Esta condición representa el máximo grado de rigidez estructural, al impedir tanto el giro como el desplazamiento lateral de los extremos.

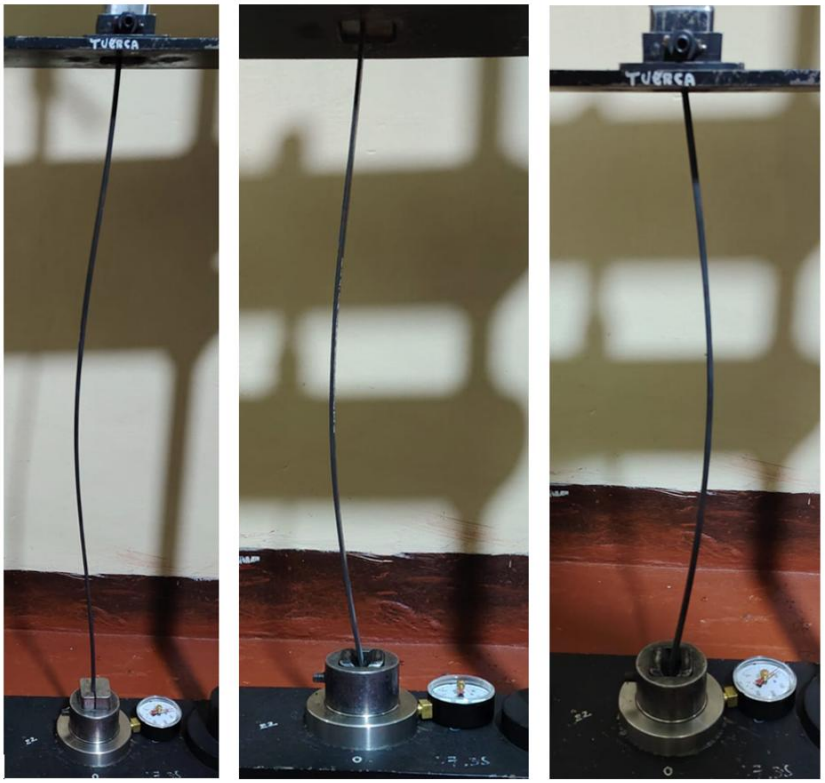
En contraste, las configuraciones empotrado–articulado mostraron cargas críticas intermedias, con valores promedio entre 373 N y 1426 N. La presencia de un extremo articulado permite una ligera rotación que incrementa la longitud efectiva de pandeo, reduciendo la capacidad de carga respecto al sistema totalmente empotrado.

Asimismo, las configuraciones articulado–articulado presentaron los valores más bajos de carga crítica, comprendidos entre 221 N y 1006 N, debido a que ambas articulaciones permiten la rotación libre de los extremos, duplicando prácticamente la longitud efectiva del elemento comprimido.

Estas tendencias evidencian una relación directa entre el grado de restricción de los apoyos y la resistencia a pandeo de las probetas, confirmando la validez funcional del módulo educativo para reproducir el comportamiento teórico previsto.

Durante los ensayos de pandeo se registró visualmente la deformación característica de las probetas en el momento próximo a la pérdida de estabilidad, observándose en todos los casos la aparición de una curvatura lateral máxima concentrada en la zona media de la longitud libre, en concordancia con el modo fundamental de pandeo descrito por la teoría de Euler. Para la deformación correspondiente a cada tipo de apoyo, se ilustra en la Figura 5.9, donde la imagen (a) muestra el comportamiento de la probeta con apoyo empotrado–empotrado, evidenciando una curvatura simétrica originada por la elevada restricción rotacional en ambos extremos; la imagen (b) presenta la deformación en la configuración empotrado–articulado, con un apoyo empotrado en la parte superior y un apoyo articulado en la parte inferior, donde la asimetría del sistema genera un desplazamiento lateral más pronunciado hacia el extremo articulado; y la imagen (c) muestra el comportamiento de la probeta bajo apoyo articulado–articulado, caracterizado por una deformación más uniforme y una mayor amplitud lateral debido a la libertad de giro existente en ambos extremos

Figura 5.9 Deformación característica de las probetas durante el ensayo de pandeo según las condiciones de apoyo



(a) (b) (c)

Los resultados obtenidos demuestran que el módulo de ensayo permite simular con precisión el fenómeno de pandeo en barras delgadas sometidas a carga axial, verificando experimentalmente la influencia de la rigidez de los apoyos, el espesor y el ancho de las probetas en la carga crítica alcanzada.

En el siguiente subapartado se presenta el análisis de variación entre repeticiones experimentales, con el objetivo de cuantificar la dispersión estadística de los resultados y evaluar la precisión y repetibilidad del procedimiento de ensayo aplicado.

5.7. ANÁLISIS DE VARIACIÓN ENTRE REPETICIONES EXPERIMENTALES

El análisis de la variación entre repeticiones constituye un paso fundamental para evaluar la consistencia y confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de pandeo. En la Tabla 5.9 se presentan los valores promedio, la desviación estándar y el

coeficiente de variación (CV) correspondientes a cada probeta y tipo de apoyo, permitiendo cuantificar la dispersión de los datos obtenidos en las tres repeticiones realizadas.

La desviación estándar expresa el grado en que las cargas registradas se alejan del valor promedio, mientras que el coeficiente de variación permite evaluar la dispersión relativa de los resultados de manera porcentual, relacionando la desviación estándar con el promedio de las mediciones.

De acuerdo con los criterios estadísticos de precisión establecidos en el ASTM Manual 7 – MNL7-E13 (*Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis*), un coeficiente de variación menor o igual al 10 % indica una excelente repetibilidad en ensayos realizados bajo condiciones controladas. Los valores comprendidos entre 10 % y 15 % se consideran aceptables cuando intervienen factores geométricos o de montaje que afectan la estabilidad del sistema, mientras que un CV superior al 15 % sugiere revisar las condiciones experimentales o de alineación del sistema.

En el presente estudio, todos los ensayos para las diferentes configuraciones de apoyos en las probetas mostraron coeficientes de variación inferiores al 10 %, excepto la probeta EMP–EMP 4, cuyo CV fue de 12.87 %, considerado dentro del rango aceptable debido al alto grado de restricción impuesto por los empotramientos y a posibles desalineaciones menores durante la aplicación de la carga. Aun así, todos los resultados se mantuvieron dentro de los márgenes de aceptación recomendados por el ASTM Manual 7 – MNL7-E13, confirmando la confiabilidad del procedimiento y del módulo de ensayo de pandeo.

5.8. COMPARACIÓN ENTRE VALORES TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

En la Tabla 5.10 se presenta la comparación porcentual entre las cargas críticas de pandeo teóricas y experimentales, considerando los factores de longitud efectiva K ideal y K recomendado, establecidos por la norma AISC 360-22, este análisis permite evaluar el grado de correspondencia entre los valores obtenidos experimentalmente y los predichos teóricamente mediante la ecuación de Euler para barras esbeltas.

Tabla 5.10 Comparación porcentual entre valores teóricos y experimentales según tipo de apoyo

Tipo de apoyo (K = ideal / recomendado)	Probeta	Carga crítica teórica ideal (N)	Carga crítica teórica ajustada (K recomendado) (N)	Carga crítica experimental (N)	Diferencia entre teórico ideal y experimental (%)	Diferencia entre teórico ajustado y experimental (%)
EMP–EMP (K = 0.5 / 0.65)	EMP-EMP 1	898.21	531.49	613.33	31.72%	-15.40%
	EMP-EMP 2	1667.06	986.43	1140	31.62%	-15.57%
	EMP-EMP 3	1684.27	996.61	1080	35.88%	-8.37%
	EMP-EMP 4	2209.61	1307.46	1393.33	36.94%	-6.57%
EMP–ART (K = 0.7 / 0.8)	EMP-ART 1	458.27	350.86	373.33	18.53%	-6.40%
	EMP-ART 2	850.54	651.2	643.33	24.36%	1.21%
	EMP-ART 3	1452.26	1111.88	1093.33	24.72%	1.67%
	EMP-ART 4	1931.96	1479.16	1426.67	26.15%	3.55%
ART–ART (K = 1 / 1)	ART-ART 1	224.55	224.55	221.67	1.28%	1.28%
	ART-ART 2	416.77	416.77	400	4.02%	4.02%
	ART-ART 3	711.61	711.61	673.33	5.38%	5.38%
	ART-ART 4	1145.46	1145.46	1006.67	12.12%	12.12%

Cuando se aplica el factor de longitud efectiva ideal (K ideal) con valores de 0.5 para apoyos empotrado–empotrado, 0.7 para empotrado–articulado y 1.0 para articulado–articulado, los resultados teóricos tienden a sobreestimar la carga crítica de pandeo respecto a los valores experimentales. Las diferencias porcentuales positivas observadas oscilan entre +31.72 % y +36.94 % para el caso empotrado–empotrado, entre +18.53 % y +26.15 % para el tipo empotrado–articulado, y entre +1.28 % y +12.12 % para el tipo articulado–articulado. Estas discrepancias se explican porque el modelo ideal supone apoyos completamente rígidos y alineación perfecta, condiciones difíciles de reproducir en el laboratorio, donde pequeñas excentricidades, holguras en los anclajes o micro flexiones en los extremos reducen la rigidez efectiva del sistema y, por tanto, la carga crítica medida.

Al emplear el factor de longitud efectiva recomendado (*K* recomendado) de 0.65 para apoyos empotrado–empotrado, 0.8 para empotrado–articulado y 1.0 para articulado–articulado, las diferencias con respecto a los resultados experimentales se reducen considerablemente. En el caso empotrado–empotrado, las discrepancias disminuyen a un rango de –15.40 % a –6.57 %, mostrando un comportamiento conservador; para el tipo empotrado–articulado, las diferencias se sitúan entre –6.40 % y +3.55 %, reflejando una concordancia muy estrecha entre los valores teóricos ajustados y los experimentales; mientras que en el tipo articulado–articulado, donde ambos factores de longitud efectiva coinciden con un *K* igual a 1, las diferencias fluctúan entre +1.28 % y +12.12 %, manteniéndose dentro de márgenes aceptables para ensayos de laboratorio.

El comportamiento observado confirma que los valores recomendados de *K* representan con mayor precisión las condiciones reales de ensayo, ya que incorporan la flexibilidad de los apoyos, las tolerancias geométricas y las pequeñas imperfecciones de montaje que afectan el fenómeno de pandeo. Por tanto, el uso del *K* recomendado conforme a la norma AISC 360-22 permite obtener resultados más próximos a la realidad física, mientras que el *K* ideal se mantiene como referencia teórica bajo condiciones de rigidez absoluta.

En conjunto, la comparación entre valores teóricos y experimentales demuestra la coherencia del comportamiento mecánico de las probetas con la teoría de Euler, validando tanto el procedimiento experimental como el desempeño del módulo educativo de ensayo de pandeo diseñado, el cual reproduce fielmente las condiciones estructurales establecidas por la norma AISC 360-22.

5.9. GUÍA DE LABORATORIO PARA EL USO DEL MÓDULO EDUCATIVO DE PANDEO

Con la finalidad de asegurar una correcta aplicación del módulo educativo y fortalecer la comprensión del fenómeno de pandeo en barras esbeltas mediante la experimentación, se elaboró una guía de laboratorio estructurada y orientada al estudiante, la cual estandariza el desarrollo de la práctica experimental y garantiza condiciones seguras, repetibles y técnicamente coherentes durante su ejecución.

La guía de laboratorio desarrolla de manera secuencial los objetivos de la práctica, las normas de seguridad y el equipo de protección personal requerido, el análisis de trabajo seguro (ATS), el fundamento teórico esencial del pandeo elástico en barras esbeltas, así como la descripción detallada del procedimiento experimental para la determinación de la carga crítica

bajo diferentes configuraciones de apoyo. Asimismo, se incluyen los criterios para el registro y tratamiento de datos experimentales, el desarrollo del informe del estudiante y un cuestionario orientado a reforzar el análisis teórico–experimental del fenómeno observado.

El contenido de la guía está alineado con el diseño y funcionamiento del módulo educativo construido, permitiendo que el estudiante identifique correctamente sus componentes, realice el montaje adecuado de las probetas, aplique la carga de manera progresiva y registre la carga crítica de pandeo bajo condiciones controladas. De esta forma, la guía de laboratorio constituye un complemento pedagógico fundamental del módulo, ya que facilita la comprensión del comportamiento estructural de barras esbeltas sometidas a compresión axial, promueve el aprendizaje activo a través de la experimentación directa y asegura la aplicación uniforme del procedimiento experimental entre diferentes grupos de usuarios del módulo.

La guía de laboratorio desarrollada se presenta íntegramente en el Anexo C, como material de apoyo para la ejecución de la práctica experimental y la formación académica en el área de estabilidad estructural.

CONCLUSIONES

- Se diseñó y fabricó un módulo educativo para ensayos de pandeo, el cual, permitió demostrar que la estructura propuesta funciona adecuadamente para reproducir condiciones controladas de compresión axial y evaluar la inestabilidad elástica en probetas de acero estructural ASTM A36 – Grado A36. El módulo logró generar resultados experimentales consistentes, con coeficientes de variación que se mantuvieron dentro de rangos aceptables según los lineamientos estadísticos especializados, y permitió comparar de manera efectiva las diferencias entre cargas críticas teóricas calculadas con los factores *K* ideales y recomendados por la norma AISC 360-22 y las cargas críticas experimentales, lo cual confirma que el prototipo cumple plenamente su finalidad académica y constituye una herramienta válida para el aprendizaje de conceptos fundamentales de pandeo estructural.
- Se analizó el fenómeno físico del pandeo en barras esbeltas, considerando su comportamiento mecánico-estructural mediante la determinación del momento de inercia, radio de giro, esbeltez y longitudes efectivas asociadas a cada condición de apoyo, lo que permitió establecer coherentemente los parámetros teóricos necesarios para el cálculo de la carga crítica de pandeo y su posterior contraste con los resultados experimentales obtenidos en el módulo educativo.
- Se diseñaron mecánicamente los componentes del módulo educativo tomando en cuenta la capacidad máxima del dinamómetro analógico de 2500 N. Este criterio de diseño garantizó la seguridad del sistema de carga, la correcta transmisión de esfuerzos axiales y la operatividad del módulo bajo condiciones estandarizadas de ensayo.
- Se elaboraron los planos de conjunto, montaje y despiece del módulo educativo, incorporando las dimensiones estandarizadas de los componentes, los sistemas de sujeción de probetas y los mecanismos de transmisión de carga, lo que permitió asegurar la correcta alineación estructural del conjunto y las configuraciones de apoyo empotrado–empotrado, empotrado–articulado y articulado–articulado durante los ensayos de pandeo asegurando así resultados confiables y reproducibles.
- Se desarrolló una guía de laboratorio que orienta el uso adecuado del módulo educativo, el procedimiento de ensayo y el registro de datos experimentales, permitiendo verificar la repetibilidad de los resultados obtenidos y establecer comparaciones consistentes entre las cargas críticas teóricas y experimentales; que permita evidenciar la influencia de las

condiciones de apoyo y de las dimensiones de las probetas en el comportamiento de pandeo, fortaleciendo la comprensión del fenómeno en el proceso de aprendizaje.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda que la Escuela Profesional continúe incentivando el desarrollo de módulos experimentales didácticos como el propuesto, ya que fortalecen el aprendizaje práctico de los estudiantes y contribuyen a una formación más integral en diseño y análisis estructural.
- Para trabajos de investigación posteriores se sugiere ampliar la variedad de secciones transversales analizadas, incorporando perfiles distintos al rectangular, esto permitiría evaluar cómo influyen la geometría y la distribución del material en la estabilidad estructural y enriquecería el estudio comparativo del pandeo.
- Se recomienda reforzar la enseñanza del uso de normas técnicas como la AISC 360-22 dentro de los cursos de análisis estructural, con la finalidad de familiarizar a los estudiantes con la selección adecuada de factores de longitud efectiva y su impacto en el diseño real de elementos a compresión.
- Para investigaciones futuras se sugiere explorar la incorporación de sistemas digitales de medición de carga como alternativa complementaria al dinamómetro analógico. Esto permitiría registrar la evolución temporal de la carga y ampliar las posibilidades de análisis, sin que ello implique que los métodos utilizados en la presente investigación hayan sido insuficientes.
- Se recomienda que la Escuela Profesional promueva espacios de experimentación donde los estudiantes puedan contrastar los resultados teóricos del pandeo con ensayos reales en módulos educativos como el desarrollado. Esto fortalecerá el entendimiento práctico de la influencia de los factores K y de las condiciones de apoyo en el comportamiento estructural.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboukifa, M., & Moustafa, M. A. (2022). Structural and buckling behavior of full-scale slender UHPC columns. *Engineering Structures*, *255*, 113928. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113928

Achuthan, K., & Murali, S. S. (2015). *A Comparative Study of Educational Laboratories from Cost & Learning Effectiveness Perspective* (pp. 143–153). https://doi.org/10.1007/978-3-319-18473-9_15

Amariles López, C., Ramírez-Sepúlveda, D., & Cano-Saldaña, L. (2022). Comparación entre el ACI-318-19 y la NSR-10 para diseño estructural de pórticos de concreto en zonas de amenaza sísmica alta. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *32*(2), 115–129. https://doi.org/10.18359/rcin.5933

American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*.

American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-22)*.

Arguello, G. (2023). *Máquina universal de ensayos: Sistema de supervisión y control*. Universidad Técnica del Norte.

Arora, R., & Acharya, A. (2020). A unification of finite deformation J2 Von-Mises plasticity and quantitative dislocation mechanics. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, *143*, 104050. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2020.104050

ASTM International. (2010). *ASTM E4-10: Standard Practices for Force Verification of Testing Machines*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0004-10

ASTM International. (2016a). *ASTM E4-16: Standard Practices for Force Verification of Testing Machines*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0004-16

ASTM International. (2016b). *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis: 8th Edition (ASTM Manual, 7)* (Dean V. Neubauer, Ed.; 8th ed.).

ASTM International. (2018). *ASTM E209-18: Standard Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0209-18

ASTM International. (2019). *ASTM E9-19: Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/E0009-19

Attard, M. M. (2011). Global Buckling Experiments on Sandwich Columns with Soft Shear Cores. *Electronic Journal of Structural Engineering*, *11*, 21–31. https://doi.org/10.56748/ejse.11140

Baranovskyi, D., Wysmulski, P., Rozylo, P., Debski, H., Bulakh, M., Kopyść, M., & Myamlin, S. (2025). Investigation of Buckling and Failure in Thin-Walled Columns Fabricated from PLA and PETG Using FDM 3D Printing. *Materials*, *18*(14), 3346. https://doi.org/10.3390/ma18143346

Briceño, I. (2025). *Formulario Diseño A Compresión Estructuras de Acero*.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (McGraw Hill, Ed.; 8va. ed.).

Callister, W., & Rethwisch, D. (2018). *Materials science and egineering an introduction* (Wiley, Ed.; Tenth Edit).

Cóndor, A., & Quispe, Y. (2021). *Diseño de una máquina de ensayos a tracción standard bajo la norma ASTM E8 para la Facultad de Ingeniería de la Universidad Continental*. Universidad Continental.

dos Santos, E. S., Batista, E. M., & Camotim, D. (2012). Experimental investigation concerning lipped channel columns undergoing local–distortional–global buckling mode interaction. *Thin-Walled Structures*, *54*, 19–34. https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.004

Dowling, N., Lampe, S., & Kral, M. (2019). *Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue* (Pearson, Ed.; Fifth Edit).

El-Sayed, T. A., Abdallah, K. S., Ahmed, H. E., & El-Afandy, T. H. (2023). Structural Behavior of Ultra-High Strength Concrete Columns Reinforced with Basalt Bars Under Axial Loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *17*(1), 43. https://doi.org/10.1186/s40069-023-00600-9

Franklin, V. A., Leon, J. S., Jegan, T. M. C., Glivin, G., Vasudevan, N., Geetha, B., Micheal, J., & Prasad, B. (2022). *Evaluation of critical buckling strength of columns: An experimental study*. 030003. https://doi.org/10.1063/5.0103818

Franky, K., Chen, L., Mengxing, D., & Itoumbou Christina Joyce, N. (2022). Elastic-plastic Buckling Analysis of Q690 High Strength Steel Tubes Under Global Bending. *American Journal of Civil Engineering*, *10*(2), 49. https://doi.org/10.11648/j.ajce.20221002.13

Gere, J. M., & Goodno, B. (2009). *Mechanics of Materials* (CENGACE Learning, Ed.; Seventh Ed).

Goel, M. D., Bedon, C., Singh, A., Khatri, A. P., & Gupta, L. M. (2021). An Abridged Review of Buckling Analysis of Compression Members in Construction. *Buildings*, *11*(5), 211. https://doi.org/10.3390/buildings11050211

Gutiérrez-Gómez, P. (2023). Aprendizaje Desarrollador de Competencias en Ingeniería Civil: Abordando la Complejidad y la Transversalidad. *593 Digital Publisher CEIT*, *8*(4), 471–498. https://doi.org/10.33386/593dp.2023.4.1906

Hafiz, P., & Baru, A. (2018). An Investigation of Buckling Phenomenon in Steel Elements. *Experimental and Numerical Analysis in Heriot Watt University*.

Hamoda, A. A., Ahmed, M., Abadel, A. A., Ghalla, M., Patel, V. I., & Liang, Q. Q. (2023). Experimental and numerical studies of circular precast concrete slender columns with intermediate connection filled with high-performance concrete. *Structures*, *57*, 105204. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105204

Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of Materials* (Prentice Hall, Ed.; Eight Edit).

Huan, H., Liu, L., Mandelis, A., Peng, C., Chen, X., & Zhan, J. (2020). Mechanical Strength Evaluation of Elastic Materials by Multiphysical Nondestructive Methods: A Review. *Applied Sciences*, *10*(5), 1588. https://doi.org/10.3390/app10051588

Huang, Y., & Jiang, J. (2023). A Critical Review of von Mises Criterion for Compatible Deformation of Polycrystalline Materials. *Crystals*, *13*(2), 244. https://doi.org/10.3390/cryst13020244

Ibrahim, T. H. (2017). Buckling Loads and Effective Length Factor for Non-Prismatic Columns. *Journal of Engineering*, *23*(10), 134–145. https://doi.org/10.31026/j.eng.2017.10.10

International Organization for Standarization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017(es): Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*.

Karagiozova, D., & Alves, M. (2008). Dynamic Elastic-Plastic Buckling of Structural Elements: A Review. *Applied Mechanics Reviews*, *61*(4). https://doi.org/10.1115/1.2939481

Korentz, J. (2020). Influence of Geometric Imperfections on Buckling Resistance of Reinforcing Bars during Inelastic Deformation. *Materials*, *13*(16), 3473. https://doi.org/10.3390/ma13163473

Lee, S. (2025). *Understanding Axial Load in Structural Engineering*. Numerical Analytics. https://www.numberanalytics.com/blog/ultimate-guide-to-axial-load#google_vignette

Li, G., Sun, X., Yang, Z., Fang, C., & Qiu, Z. (2022). Buckling behavior of slender square concrete filled steel tubular columns strengthened with CFRP profile under combined

compression and bending. *Journal of Building Engineering*, *53*, 104563. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104563

Manoli, C. K., Papatzani, S., & Mouzakis, D. E. (2022). Exploring the Limits of Euler–Bernoulli Theory in Micromechanics. *Axioms*, *11*(3), 142. https://doi.org/10.3390/axioms11030142

Masters, A. (2024). Frugal Education: What, why, and how? *Future in Educational Research*, *2*(2), 109–130. https://doi.org/10.1002/fer3.32

MechaniCalc. (2024). *Mechanical Properties of Materials*. https://mechanicalc.com/reference/mechanical-properties-of-materials

Meza, F. J., Becque, J., & Hajirasouliha, I. (2020). Experimental study of cold-formed steel built-up columns. *Thin-Walled Structures*, *149*, 106291. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106291

Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (Pearson Educación, Ed.; 4ta edició).

Nasution, A., Mat, M., Januar, S., & Quanjin, M. (2024). Effect of number of triggers and shape of crash box on energy absorption during experimental collision. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, *19*(10), 580–592. https://doi.org/10.59018/052479

Norton, R. (2009). *Diseño de maquinaria. Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (McGraw Hill, Ed.; 4ta. ed.).

Ochshorn, J. (2009). Approximate Derivation of Critical Buckling Load. *Journal of Architectural Engineering*, *15*(4), 139–141. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2009)15:4(139)

Piven, V. (2019). Practical-Modular Training in Engineering Education: Problems and Solutions. *Proceedings of the International Scientific Conference "Far East Con" (ISCFEC 2018)*. https://doi.org/10.2991/iscfec-18.2019.37

Quan, C., Walport, F., & Gardner, L. (2024). Equivalent geometric imperfections for the design of steel and stainless steel beam-columns by GMNIA. *Journal of Constructional Steel Research*, *215*, 108502. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108502

Rajib, S., & Chen, L. (2024). Experimental and Numerical Investigation of Buckling Behaviour in Q690 High-Strength Steel Tubes Under Combined Axial Compression and Bending Loads. *American Journal of Civil Engineering*, *12*(6), 178–187. https://doi.org/10.11648/j.ajce.20241206.11

Rivera, J. (2023). *Resistencia de materiales. Libro interactivo para ingenieros* (Red Educativa Digital Descartes, Ed.).

Rivero, K., Figueroa, C., Carvajal, J., Gómez, R., & Fumero, A. (2020). Máquina para ensayo de compresión en materiales utilizados en ingeniería de tejidos. *Revista Cubana de Ingeniería*, *XI*(3), 11–21.

Rouble, M., Dobbs, M., & Gilbert, A. (2024). *WinterLab: Developing a low-cost, portable experiment platform to encourage engagement in the electronics lab*. https://doi.org/10.14434/ijdl.v14i1.33406

Roy, K., Ting, T. C. H., Lau, H. H., & Lim, J. B. P. (2019). Experimental and numerical investigations on the axial capacity of cold-formed steel built-up box sections. *Journal of Constructional Steel Research*, *160*, 411–427. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.05.038

Saffari, H., Rahgozar, R., & Jahanshahi, R. (2008). An efficient method for computation of effective length factor of columns in a steel gabled frame with tapered members. *Journal of Constructional Steel Research*, *64*(4), 400–406. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.09.001

Selvaggio, A., Upadhya, S., Grodotzki, J., & Erman Tekkaya, A. (2020). Development of a Remote Compression Test Lab for Engineering Education. In *Cyber-Physical Systems and Digital Twins* (pp. 496–505). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23162-0_45

Shahid, S., Andreasson, E., Petersson, V., Gukhool, W., Kang, Y., & Kao-Walter, S. (2023). Simplified Characterization of Anisotropic Yield Criteria for an Injection-Molded Polymer Material. *Polymers*, *15*(23), 4520. https://doi.org/10.3390/polym15234520

Shepherd, B., & Zirakian, T. (2023). Experimental Study and Fragility Analysis of Effective-Length Factors in Column Buckling. *Journal of Building Material Science*, *5*(1), 9–16. https://doi.org/10.30564/jbms.v5i1.5432

Slimani, A., Belaid, T., Saidani, M., Ammari, F., & Adman, R. (2023). A new method for determining the effective length factor of columns in partially braced frames on elastic supports. *Structural Engineering and Mechanics*, *85*(6), 825–835.

Syed, A. U., & Goldack, A. (2023). *Effect of Slenderness on the Design of FRP reinforced Concrete Columns*. 574–582. https://doi.org/10.2749/newdelhi.2023.0574

Tembrevilla, G., Phillion, A., & Zeadin, M. (2024). Experiential learning in engineering education: A systematic literature review. *Journal of Engineering Education*, *113*(1), 195–218. https://doi.org/10.1002/jee.20575

Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability* (McGraw Hill, Ed.). https://structures.dhu.edu.cn/_upload/article/files/c2/53/6997426d46cb8f09fcd5d26175e2/5bcfea4b-34b9-48f7-966b-a74ab5ddae8c.pdf

Tomás, A., & Tovar, J. P. (2012). The influence of initial geometric imperfections on the buckling load of single and double curvature concrete shells. *Computers & Structures*, *96–97*, 34–45. https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.01.007

Ugural, A., & Fenster, S. (2020). *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity* (Pearson, Ed.; Sixth Edit).

Veidth, M. (2025). *Stress–Strain Curve Explained*. CAE Assistant. https://caeassistant.com/blog/stress-strain-curve/

Vy, S., & Mahendran, M. (2020). Compression Tests of Fixed Ended CFS Members with Improved Connectors. *Proceedings of the Cold-Formed Steel Research Consortium Colloquium*, 1–8.

Wong, R., Adesope, O., Yang, C., Oni, O., Vanwie, B., Dutta, P., Kaiphanliam, K., Adesope, F., Ajeigbe, O., & Gartner, J. (2024). Engineering Students Engagement Profiles while Using Low-Cost Desktop Learning Modules. *International Journal of Engineering Education*, *40*(2), 322–335.

Zeng, X. (2023). *A displacement-controlled analytical procedure for post-buckling analysis demonstrated by revisiting Euler buckling problem*.

Zhang, J.-H., & Young, B. (2018). Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, *147*, 380–392. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.008

Zhong, Y., Sun, Y., Hai Tan, K., & Zhao, O. (2021). Testing, modelling and design of high strength concrete-filled high strength steel tube (HCFHST) stub columns under combined compression and bending. *Engineering Structures*, *241*, 112334. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112334

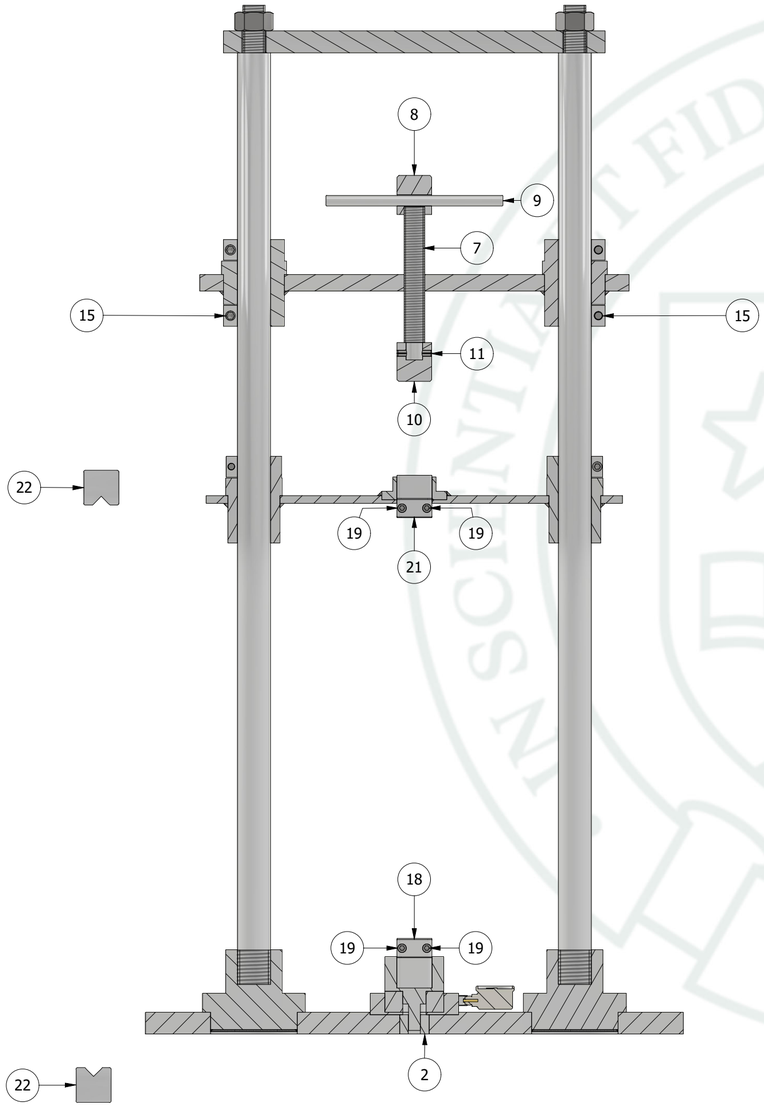
Ziółkowski, A., & Imiełowski, S. (2011). Buckling and Post-buckling Behaviour of Prismatic Aluminium Columns Submitted to a Series of Compressive Loads. *Experimental Mechanics*, *51*(8), 1335–1345. https://doi.org/10.1007/s11340-010-9455-y

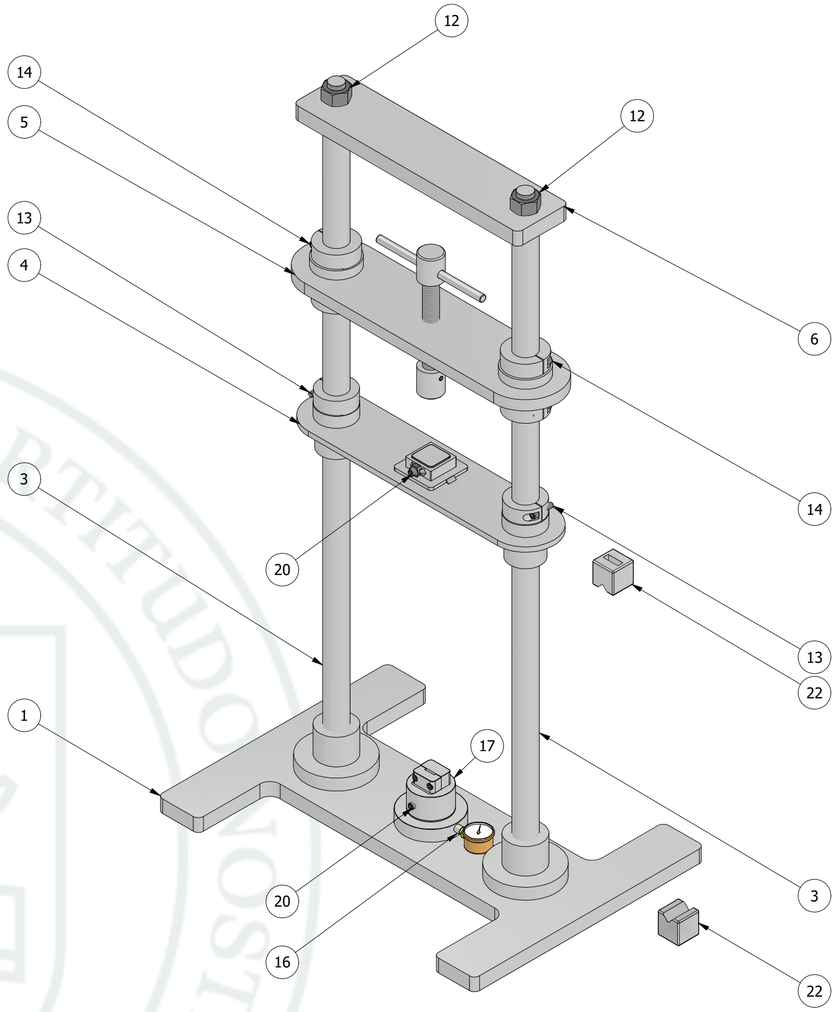
ANEXOS

Anexo A: Planos de conjunto y despiece del Módulo Educativo de Pandeo

Plano	Tipo de Plano	Número de referencia	Hoja
Módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas	Plano de Conjunto	PC-001-2025	1
Módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas	Plano de Montaje	PM-001-2025	2
Soporte base	Plano de Despiece	PD-001-2025	3
Inserto cilíndrico con agujero cuadrado	Plano de Despiece	PD-002-2025	4
Columna principal	Plano de Despiece	PD-003-2025	5
Puente guía para cubo superior	Plano de Despiece	PD-004-2025	6
Puente porta tornillo	Plano de Despiece	PD-005-2025	7
Puente de columnas principales	Plano de Despiece	PD-006-2025	8
Tornillo de avance	Plano de Despiece	PD-007-2025	9
Base superior de tornillo	Plano de Despiece	PD-008-2025	10
Palanca	Plano de Despiece	PD-009-2025	11
Base inferior de tornillo	Plano de Despiece	PD-010-2025	12
Adaptador para cubo inferior	Plano de Despiece	PD-011-2025	13
Cubo inferior con mordaza	Plano de Despiece	PD-012-2025	14
Cubo superior con mordaza	Plano de Despiece	PD-013-2025	15
Cubo de apoyo articulado	Plano de Despiece	PD-014-2025	16

MÓDULO EDUCATIVO PARA PRUEBAS DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS





***NOTA:** Los ítems 18 y 21 podrán ser reemplazados por el ítem 22 dependiendo de las condiciones de apoyo requeridas para el ensayo.

ÍTEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
22	2	Cubo de apoyo articulado *	Acero ASTM A36 - Grado A36
21	1	Cubo Superior con mordaza	Acero ASTM A36 - Grado A36
20	2	Tornillo prisionero Allen M10 x 0.8 x 20 ISO 4026	Acero templado ISO 4026 - Clase 45H
19	4	Tornillo Allen M6 x 0.75 x 20 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
18	1	Cubo inferior con mordaza	Acero ASTM A36 - Grado A36
17	1	Adaptador para cubo inferior	Acero ASTM A36 - Grado A36
16	1	Dinamómetro PCE-HFK 2.5K	Capacidad máxima 2500 N
15	2	Tornillo Allen M10 x 1 x 17.3 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
14	2	Tornillo Allen M10 x 0.8 x 18 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
13	2	Tornillo Allen M8 x 0.8 x 30 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
12	2	Tuerca hexagonal ANSI B18.2.2 - 1 - 8	Acero al Carbono ASTM A563 - Grado A
11	1	Pin elástico 7 x 40 - A ISO 8752	Acero Inoxidable AISI 304
10	1	Base inferior de tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
9	1	Palanca	Acero ASTM A36 - Grado A36
8	1	Base superior de tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
7	1	Tornillo de avance	Acero ASTM A36 - Grado A36
6	1	Puente de columnas principales	Acero ASTM A36 - Grado A36
5	1	Puente porta tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
4	1	Puente guía para cubo superior	Acero ASTM A36 - Grado A36
3	2	Columna principal	Acero ASTM A36 - Grado A36
2	1	Inserto cilíndrico con agujero cuadrado	Acero ASTM A36 - Grado A36
1	1	Soporte base	Acero ASTM A36 - Grado A36

LISTA DE PARTES

Universidad Católica de Santa María

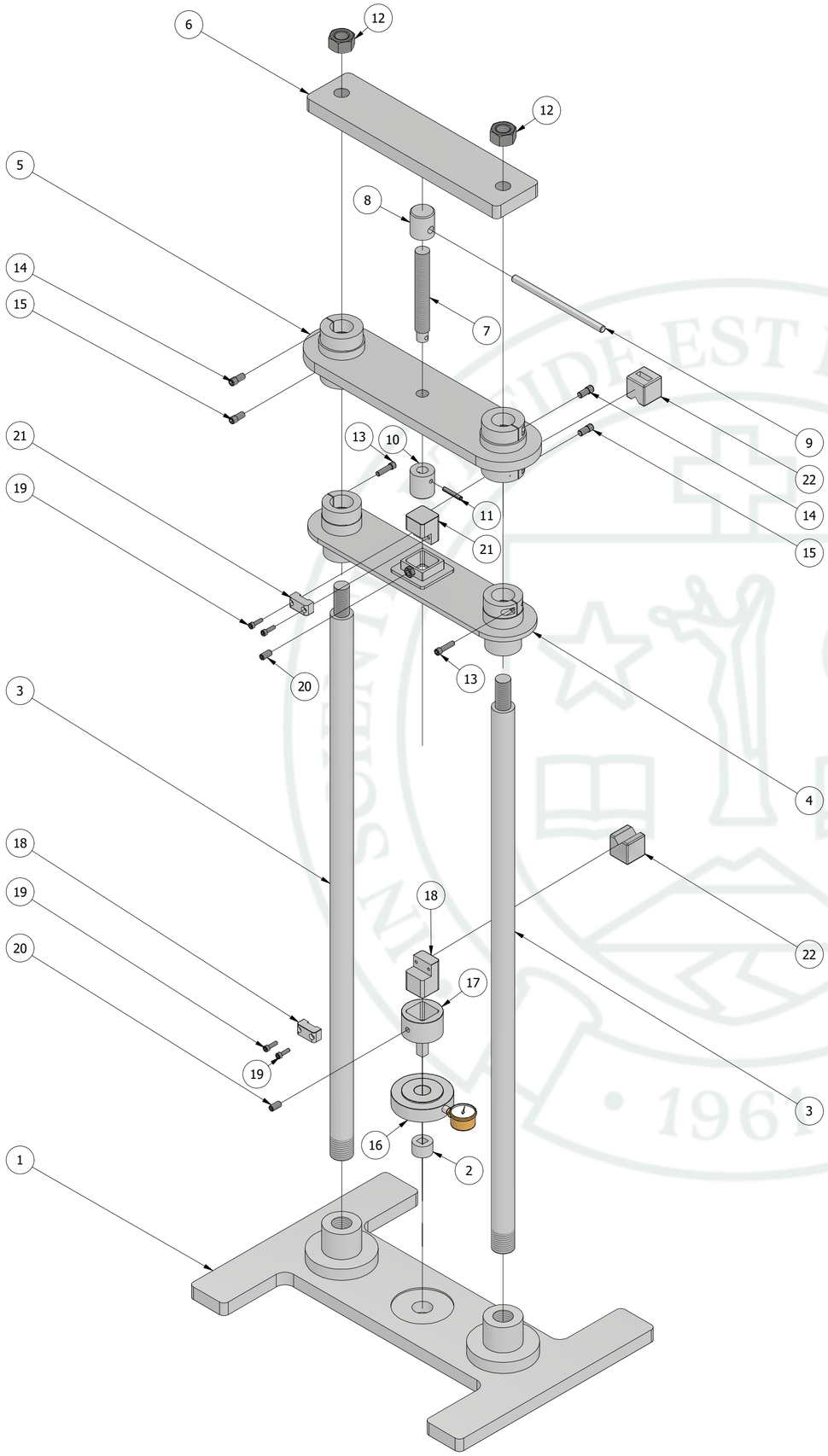
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica

Tesis:
Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N

Creado por:	Arobado por:	Tipo de Documento:	
Carpio Eduardo Herrera Jorge	Alcázar Hermann	Plano de Conjunto	

Título, Subtítulo:	Número de Referencia:	Rev.:
MÓDULO EDUCATIVO PARA PRUEBAS DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS	PC-001-2025	A

Escala:	Form.:	Fecha:	Hoja:
1:5	A2	02/07/2025	1/16



***NOTA:** Los ítems 18 y 21 podrán ser reemplazados por el ítem 22 dependiendo de las condiciones de apoyo requeridas para el ensayo.

ÍTEM	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
22	2	Cubo de apoyo articulado *	Acero ASTM A36 - Grado A36
21	1	Cubo superior con mordaza	Acero ASTM A36 - Grado A36
20	2	Tornillo prisionero Allen M10 x 0.8 x 20 ISO 4026	Acero templado ISO 4026 - Clase 45H
19	4	Tornillo Allen M6 x 0.75 x 20 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
18	1	Cubo inferior con mordaza	Acero ASTM A36 - Grado A36
17	1	Adaptador para cubo inferior	Acero ASTM A36 - Grado A36
16	1	Dinamómetro PCE-HFK 2.5K	Capacidad máxima 2500 N
15	2	Tornillo Allen M10 x 1 x 17.3 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
14	2	Tornillo Allen M10 x 0.8 x 18 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
13	2	Tornillo Allen M8 x 0.8 x 30 ISO 4762	Acero inoxidable ISO 3506 - A2-70
12	2	Tuerca hexagonal ANSI B18.2.2 - 1 - 8	Acero al Carbono ASTM A563 - Grado A
11	1	Pin elástico 7 x 40 - A ISO 8752	Acero Inoxidable AISI 304
10	1	Base inferior de tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
9	1	Palanca	Acero ASTM A36 - Grado A36
8	1	Base superior de tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
7	1	Tornillo de avance	Acero ASTM A36 - Grado A36
6	1	Puente de columnas principales	Acero ASTM A36 - Grado A36
5	1	Puente porta tornillo	Acero ASTM A36 - Grado A36
4	1	Puente guía para cubo superior	Acero ASTM A36 - Grado A36
3	2	Columna principal	Acero ASTM A36 - Grado A36
2	1	Inserto cilíndrico con agujero cuadrado	Acero ASTM A36 - Grado A36
1	1	Soporte base	Acero ASTM A36 - Grado A36

LISTA DE PARTES

Universidad Católica de Santa María
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica

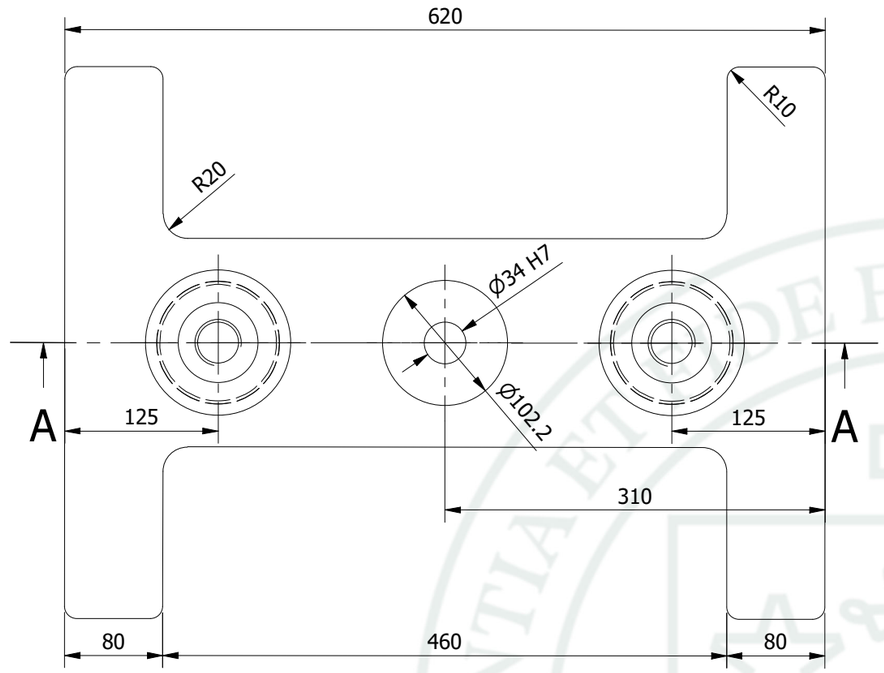
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N

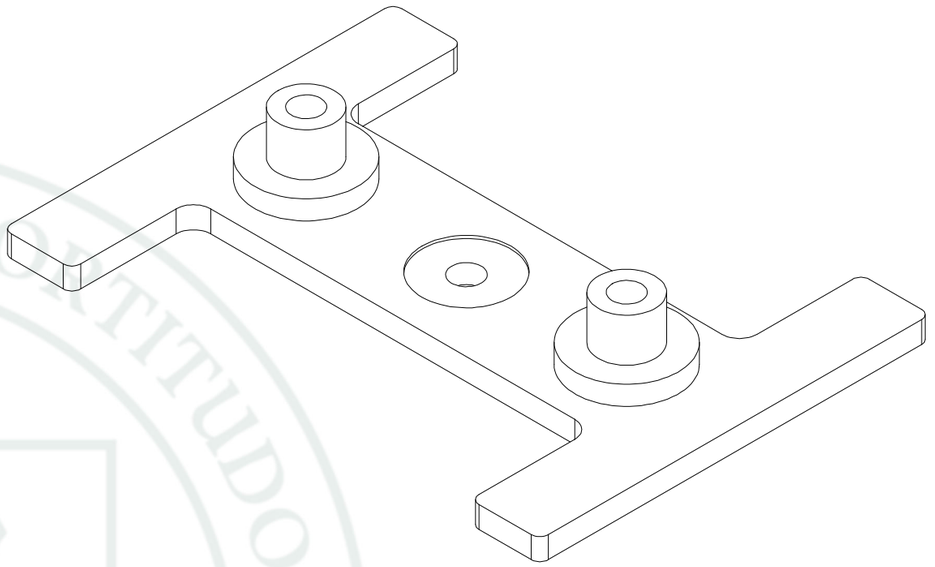
Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge
Arobado por: Alcázar Hermann
Tipo de Documento: Plano de Montaje

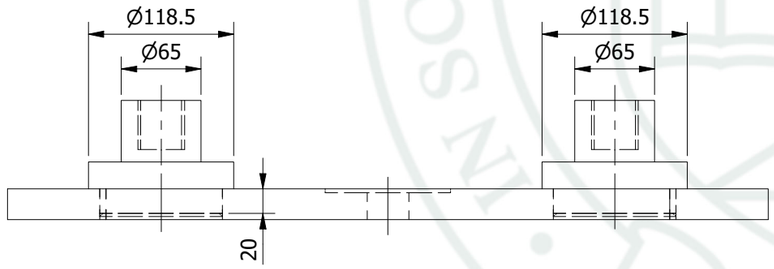
Título, Subtítulo: MÓDULO EDUCATIVO PARA PRUEBAS DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS

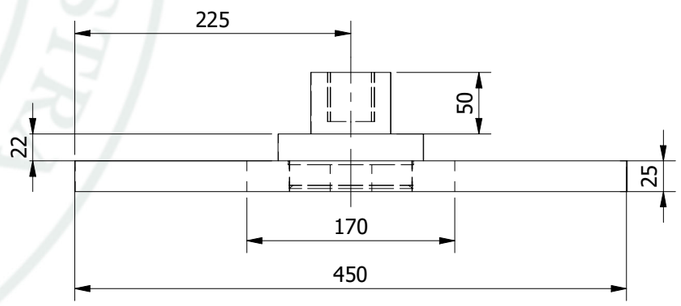
Número de Referencia: PM-001-2025
Rev.: A
Escala: 1:5
Form.: A2
Fecha: 02/07/2025
Hoja: 2/16

N9

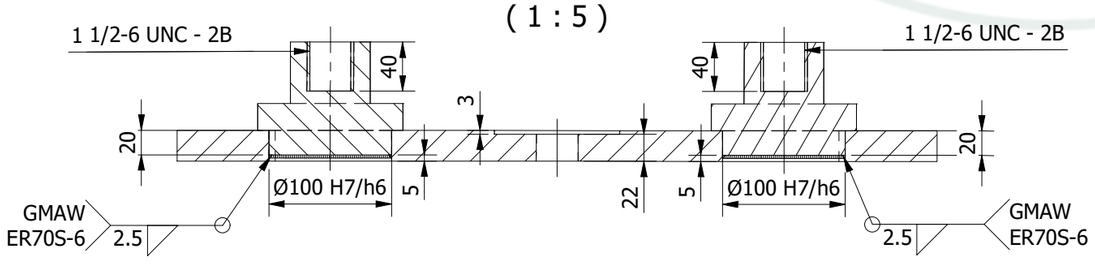








SECCIÓN A-A
(1 : 5)



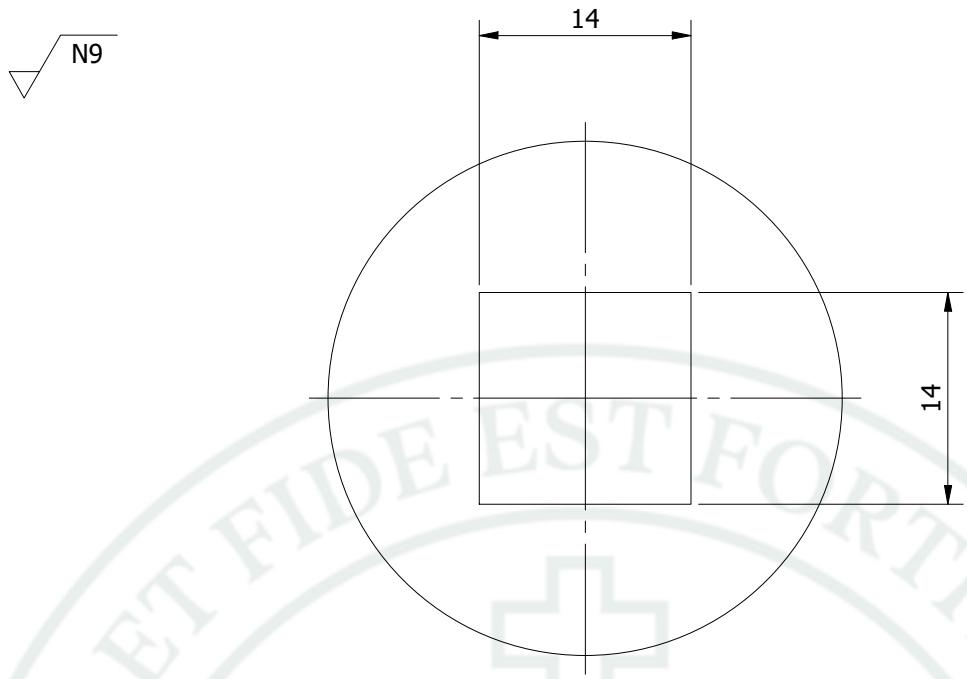
Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

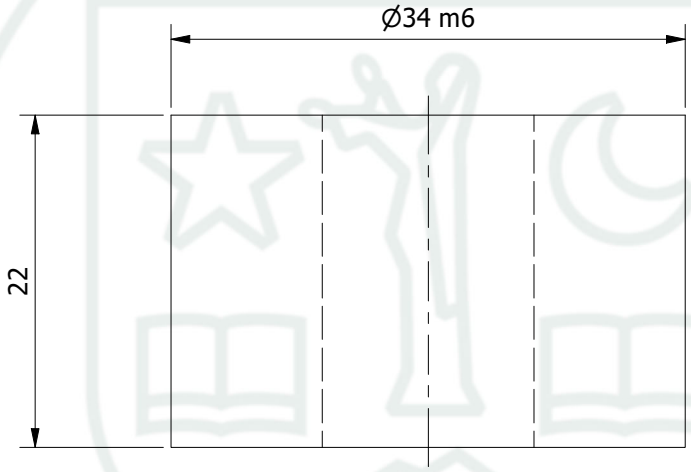
Tolerancia General: ISO 2768 - m	Material: Acero ASTM A36 - Grado A36	Acabado Superficial: N9: 0.0063 mm

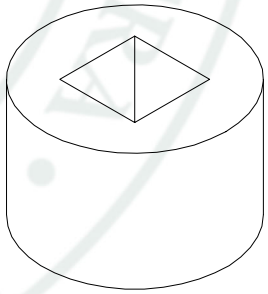
Universidad Católica de Santa María
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica

Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N

Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece			
Título, Subtítulo: SOPORTE BASE		Número de Referencia: PD-001-2025			Rev.: A
		Escala: 1:5	Form.: A3	Fecha: 02/07/2025	Hoja: 3/16





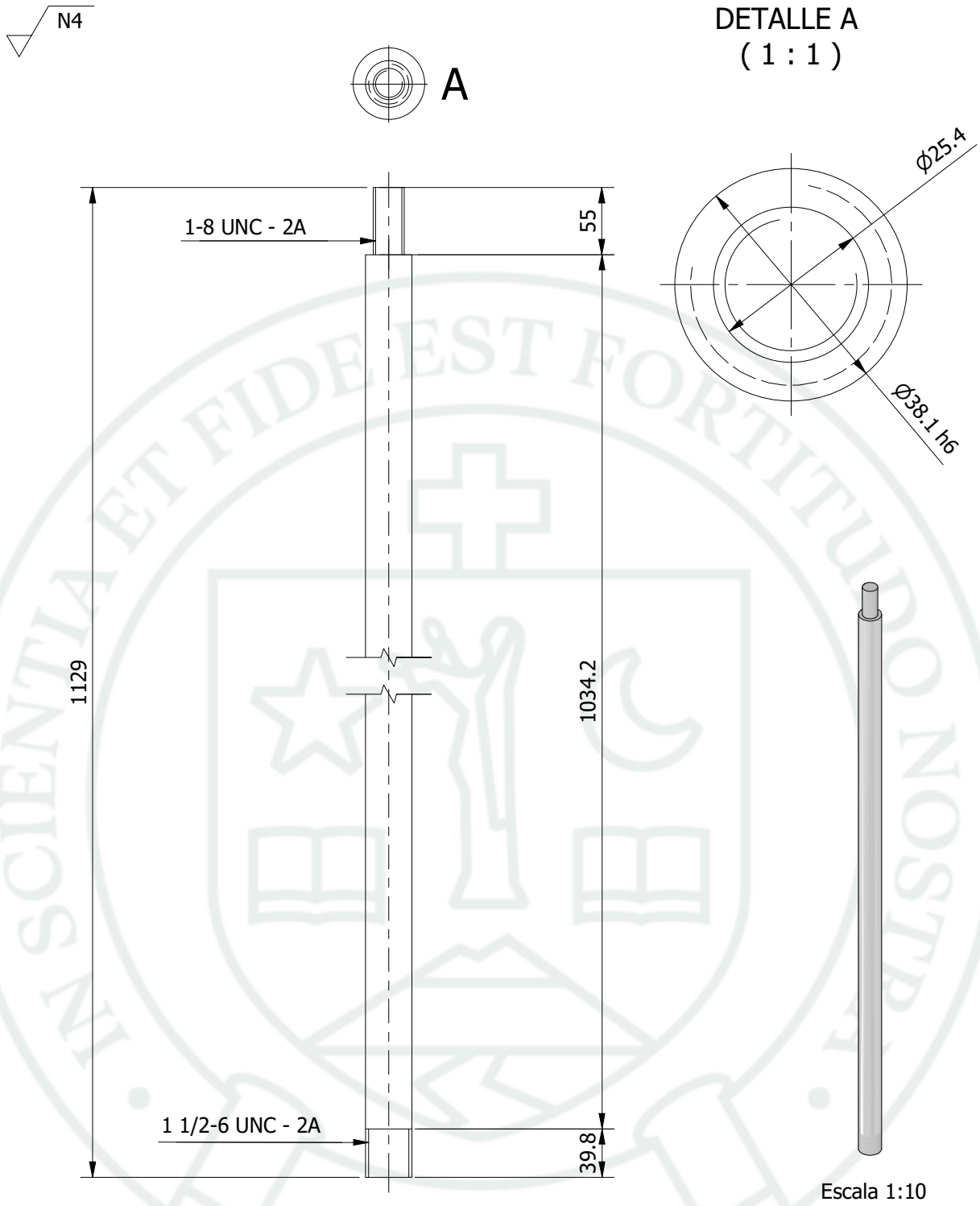


Escala 1:1

Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N9: 0.0063 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece		
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: INSERTO CILÍNDRICO CON AGUJERO CUADRADO		Número de Referencia: PD-002-2025		Rev.: A
			Escala: 2:1	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025 / Hoja: 4/16

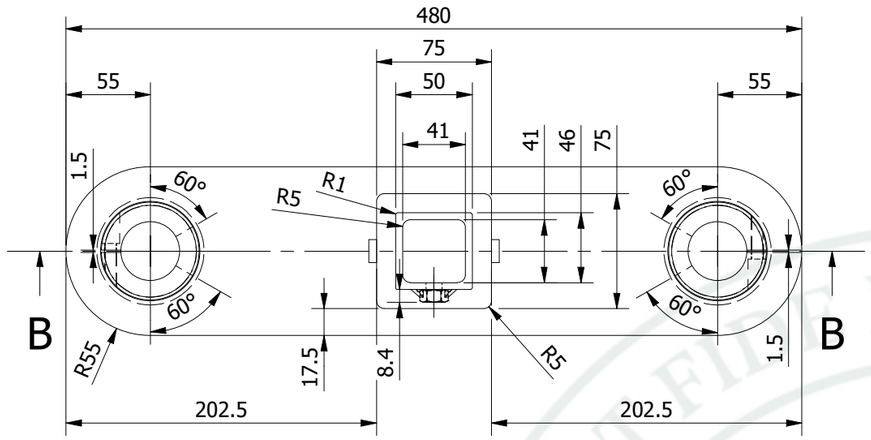


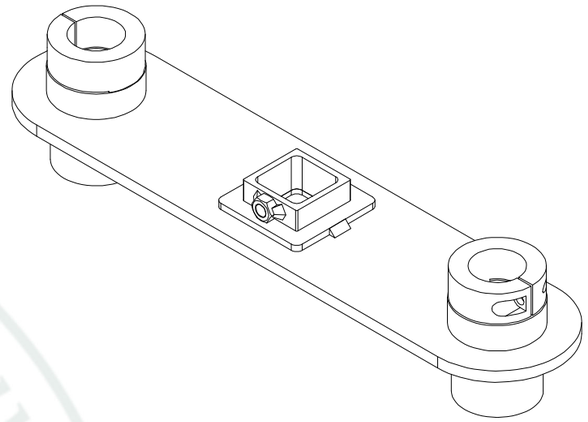
Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

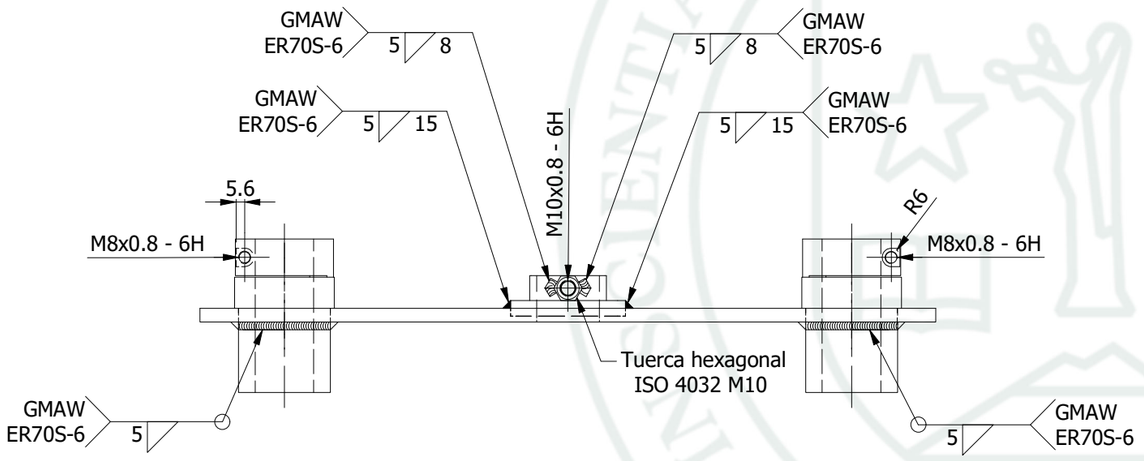
Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N4: 0.0002 mm

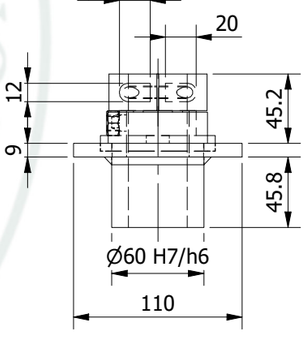
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: COLUMNA PRINCIPAL		Número de Referencia: PD-003-2025	Rev.: A
			Escala: 1:5 / Form.: A4 / Fecha: 02/07/2025	Hoja: 5/16

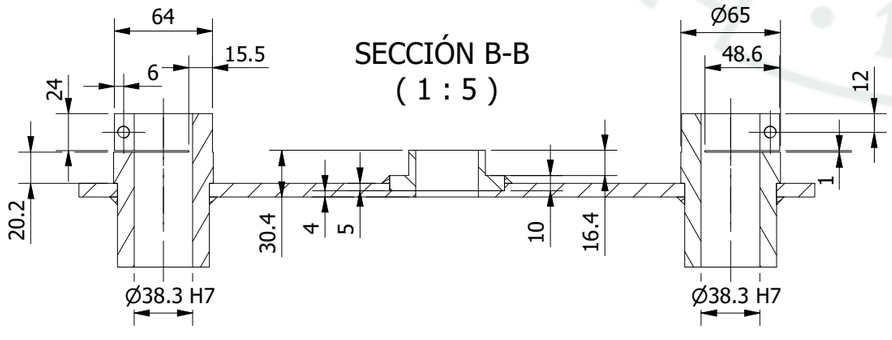
N9











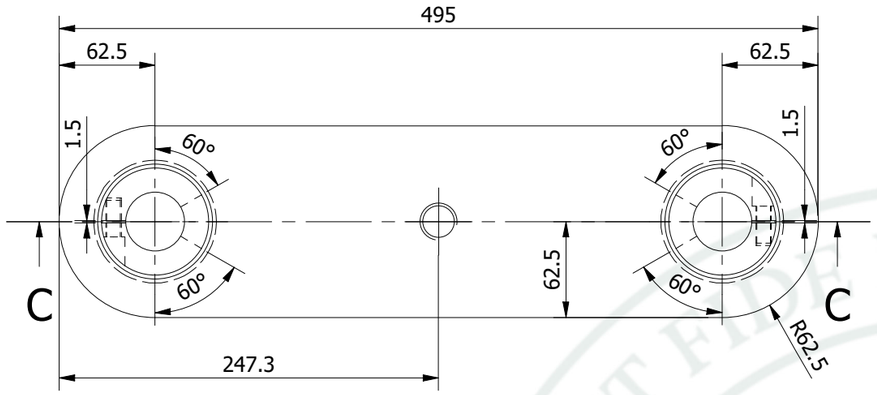
SECCIÓN B-B
(1 : 5)

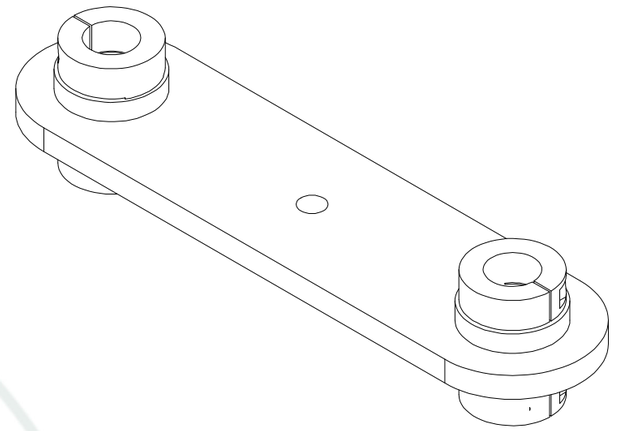
Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

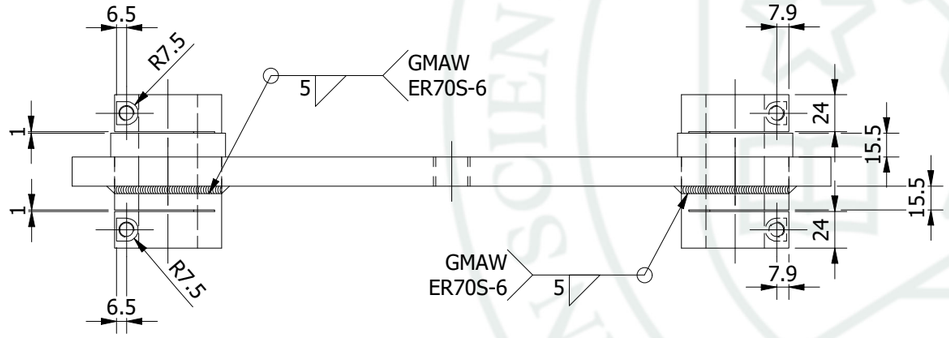
Tolerancia General: ISO 2768 - m	Material: Acero ASTM A36 - Grado A36	Acabado Superficial: N9: 0.0063 mm

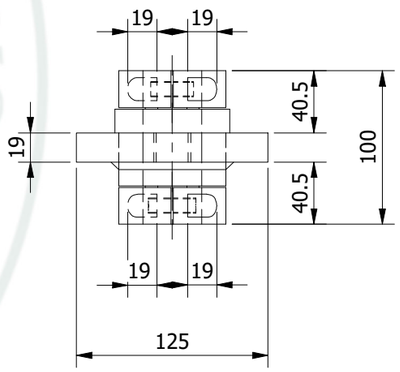
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: PUENTE GUÍA PARA CUBO SUPERIOR		Número de Referencia: PD-004-2025	Rev.: A
		Escala: 1:5 / Form.: A3 / Fecha: 02/07/2025		Hoja: 6/16

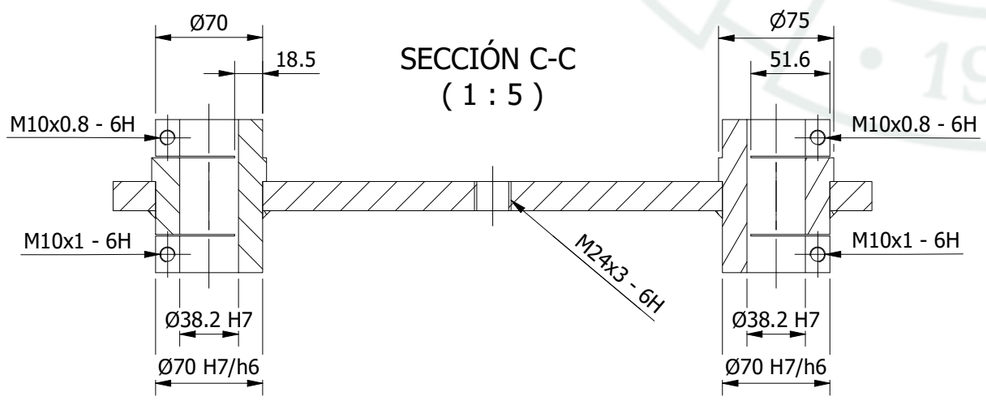
N9











Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General: ISO 2768 - m	Material: Acero ASTM A36 - Grado A36	Acabado Superficial: N9: 0.0063 mm

Universidad Católica de Santa María

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica
Mecánica Eléctrica y Mecatrónica

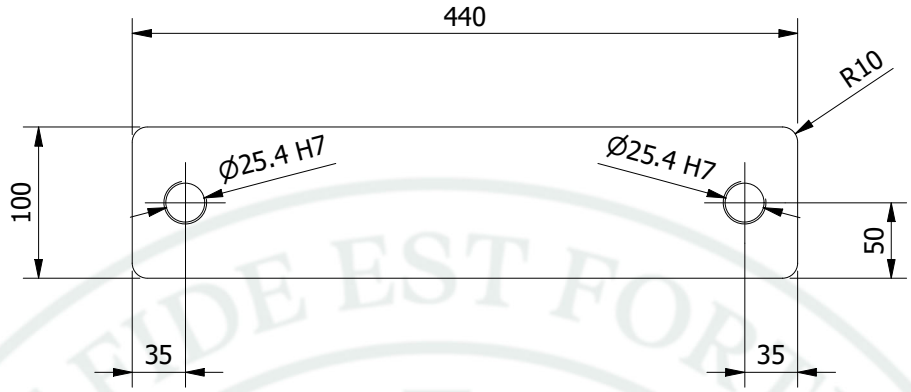
Tesis:
Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N

Creado por:	Arobado por:	Tipo de Documento:	
Carpio Eduardo Herrera Jorge	Alcázar Hermann	Plano de Despiece	

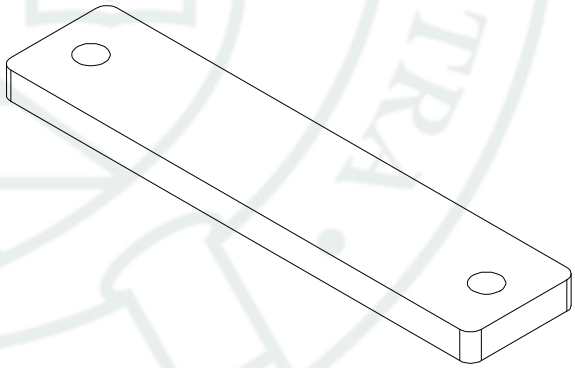
Título, Subtítulo:
PUENTE PORTA TORNILLO

Número de Referencia:			Rev.:
PD-005-2025			A
Escala: 1:5	Form.: A3	Fecha: 02/07/2025	Hoja: 7/16

N9



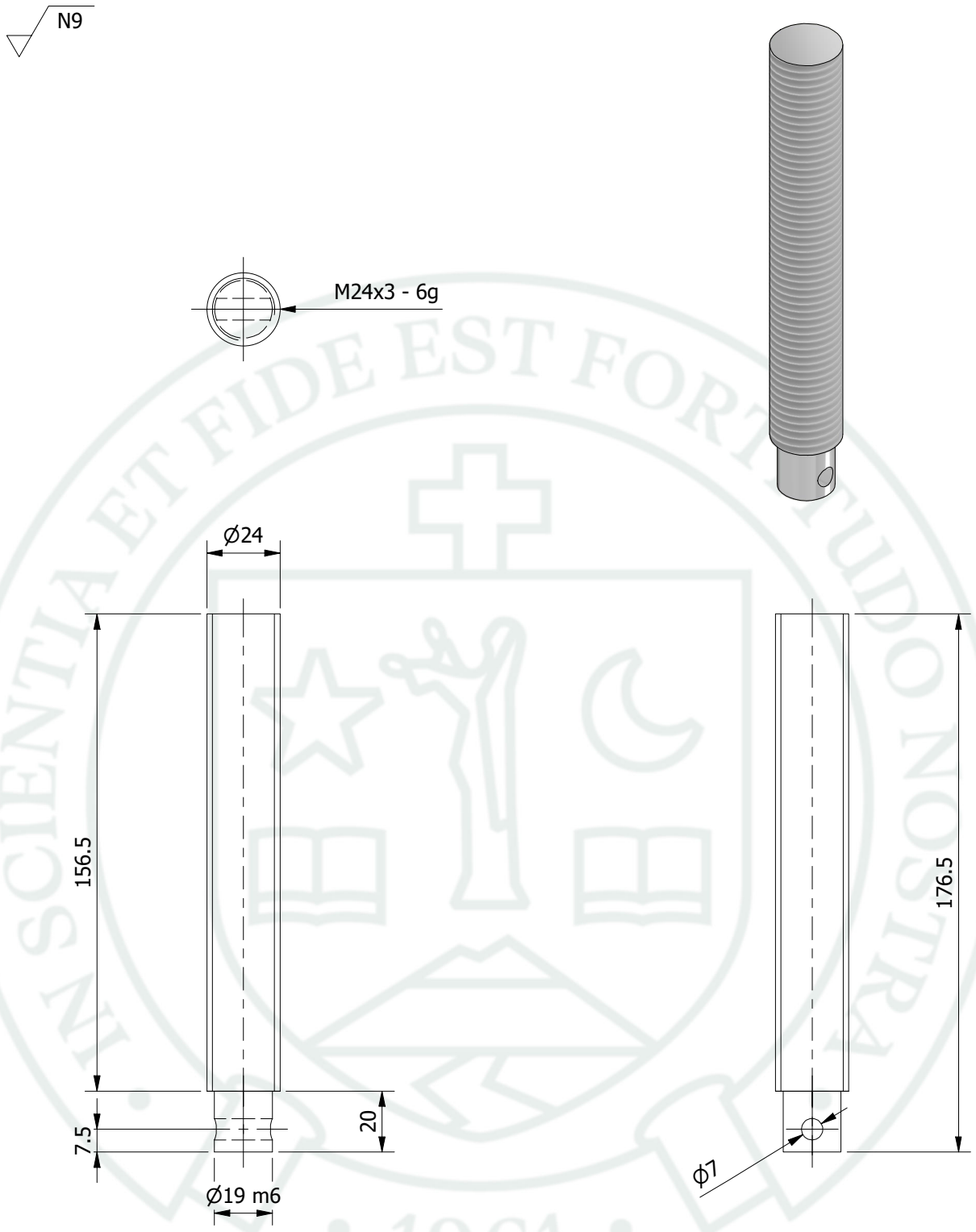




Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N9: 0.0063 mm

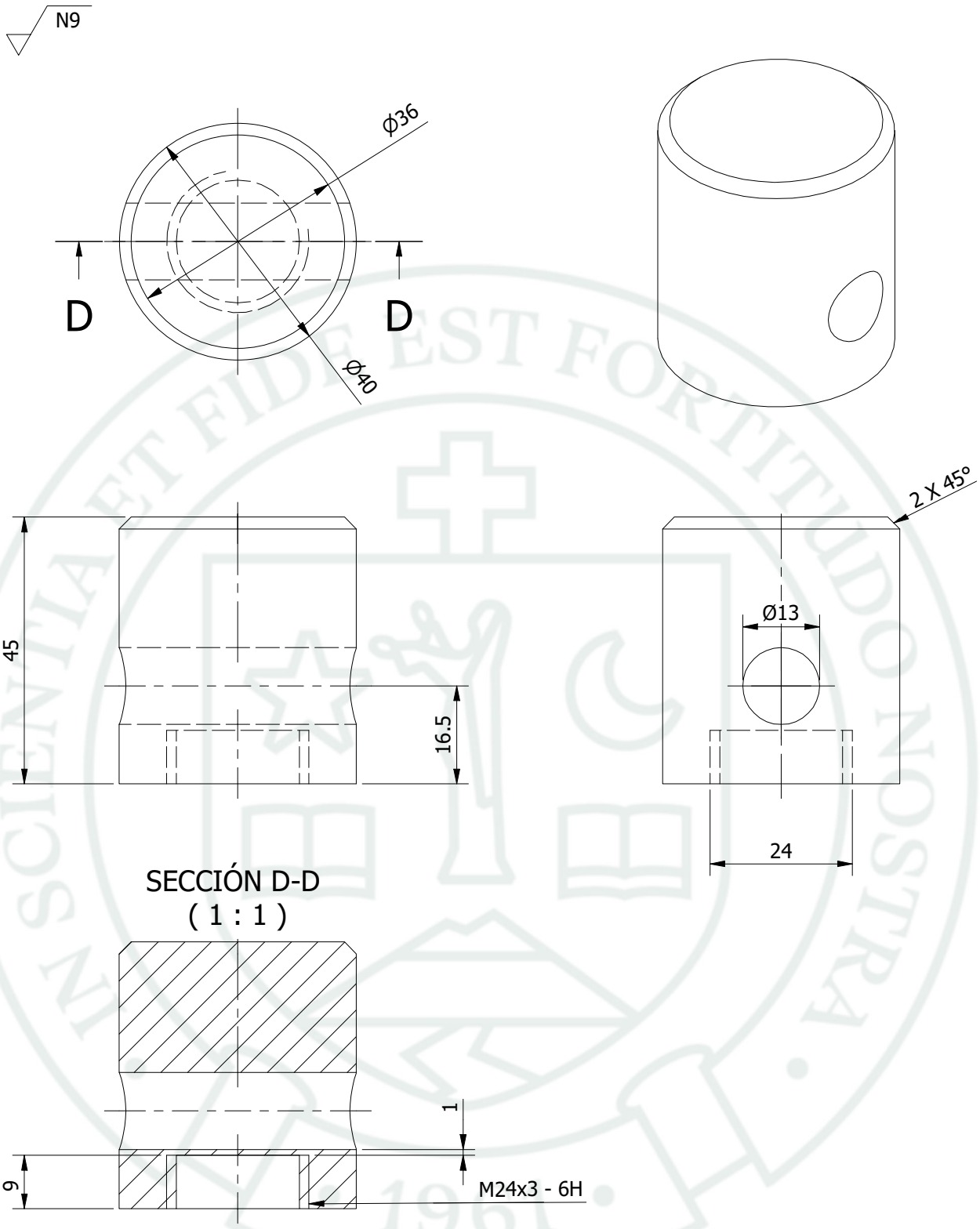
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece		
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: PUENTE DE COLUMNAS PRINCIPALES		Número de Referencia: PD-006-2025		Rev.: A
			Escala: 1:5	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025 / Hoja: 8/16



Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N9: 0.0063 mm

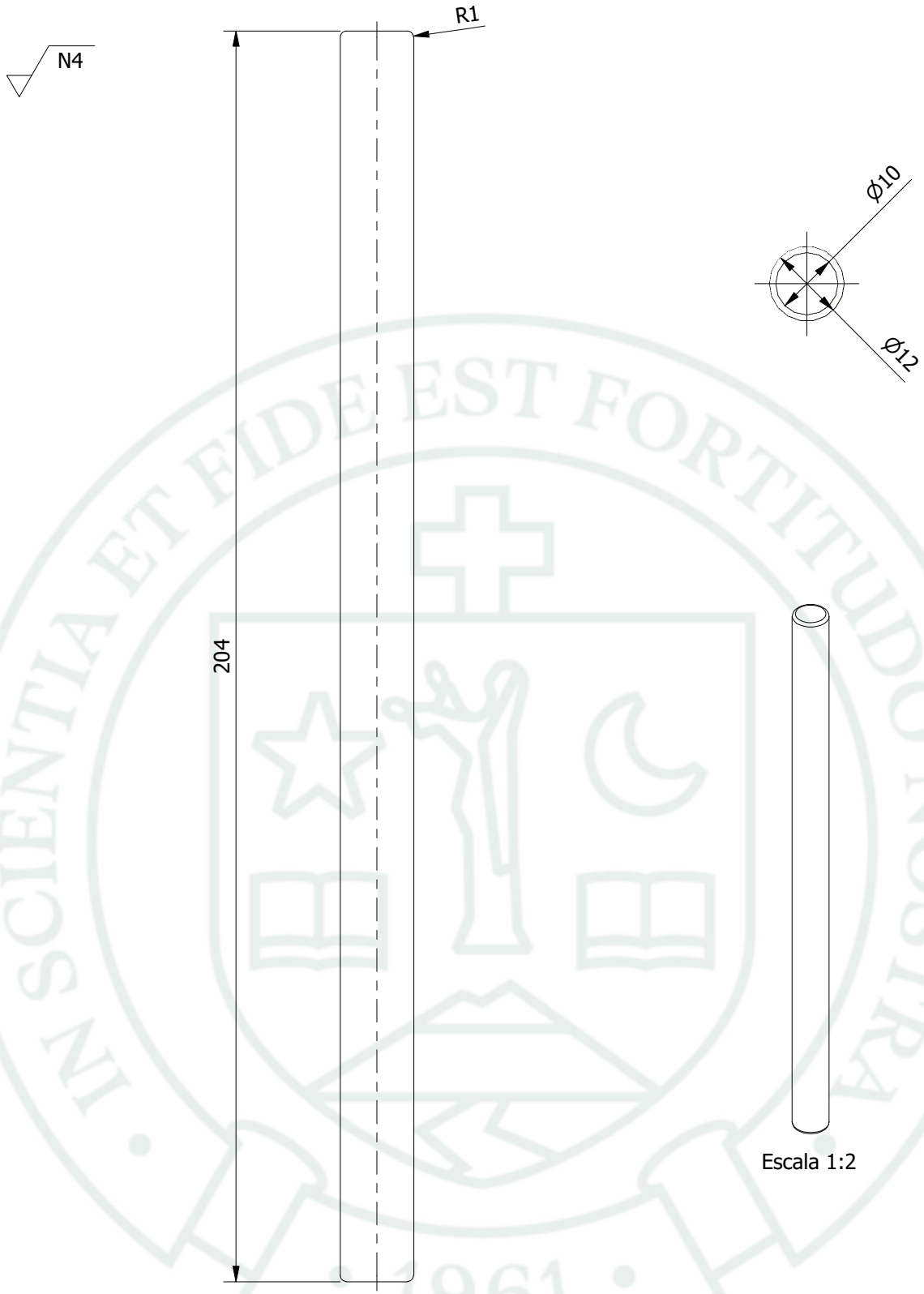
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece		
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: TORNILLO DE AVANCE		Número de Referencia: PD-007-2025		Rev.: A
			Escala: 1:2	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025 / Hoja: 9/16



Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N9: 0.0063 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece		
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: BASE SUPERIOR DE TORNILLO		Número de Referencia: PD-008-2025		Rev.: A
			Escala: 1:1	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025 / Hoja: 10/16

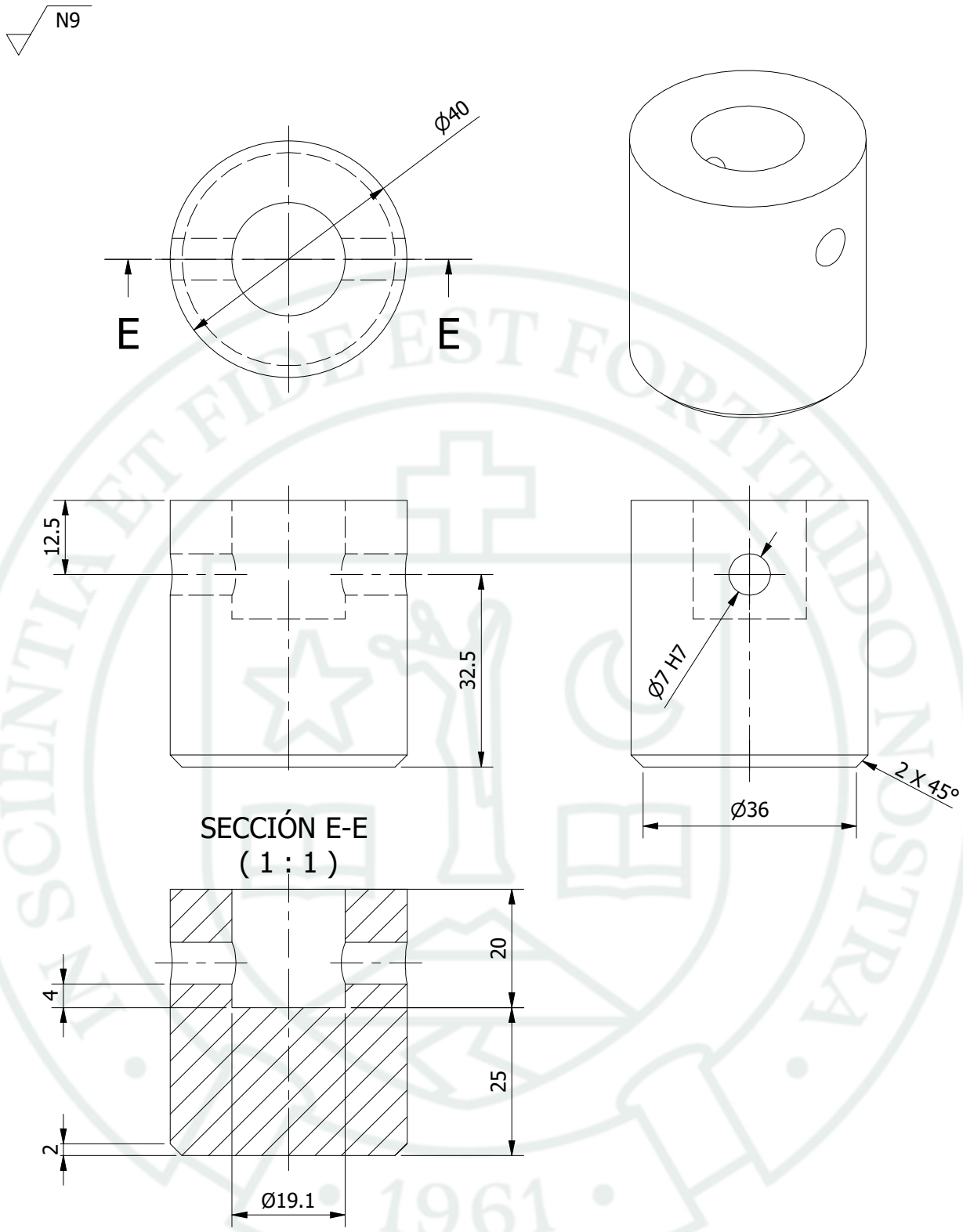


Escala 1:2

Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N4: 0.0002 mm

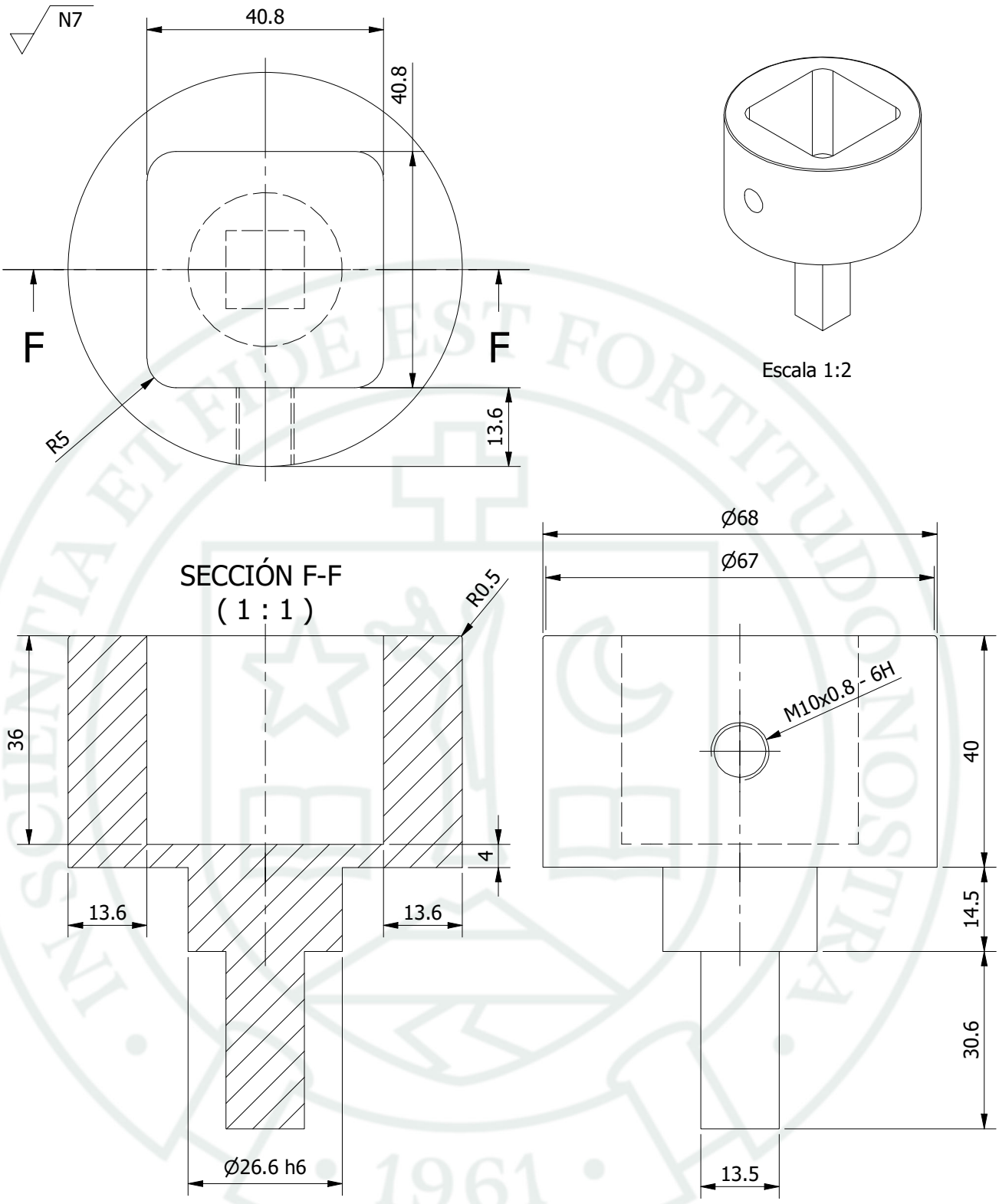
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: PALANCA		Número de Referencia: PD-009-2025	Rev.: A
			Escala: 1:1 / Form.: A4 / Fecha: 02/07/2025	Hoja: 11/16



Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N9: 0.0063 mm

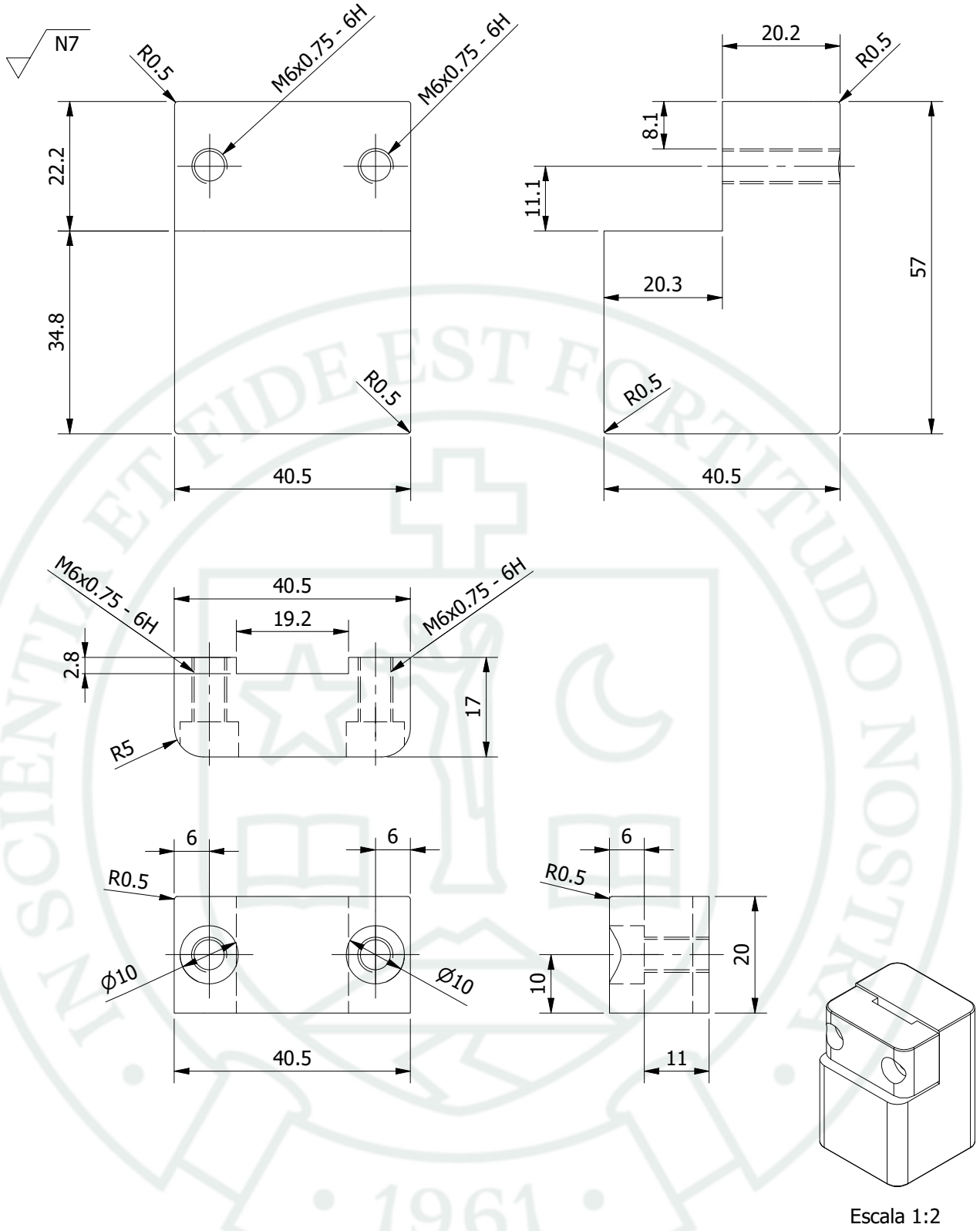
Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece			
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: BASE INFERIOR DE TORNILLO		Número de Referencia: PD-010-2025			Rev.: A
			Escala: 1:1	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025	Hoja: 12/16



Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N7: 0.0016 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: ADAPTADOR PARA CUBO INFERIOR		Número de Referencia: PD-011-2025	Rev.: A
			Escala: 1:1 / Form.: A4 / Fecha: 02/07/2025	Hoja: 13/16

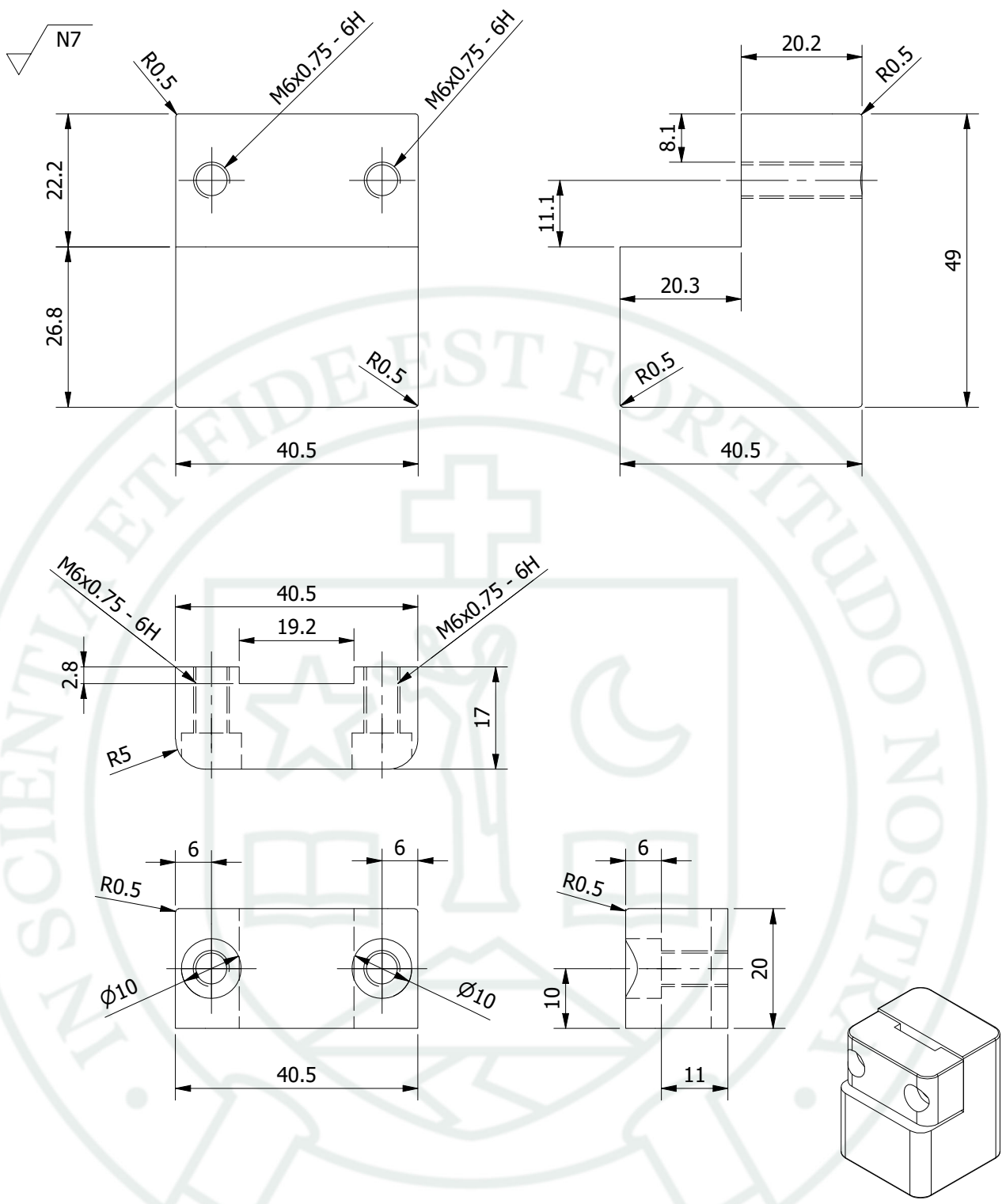


Escala 1:2

Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N7: 0.0016 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: CUBO INFERIOR CON MORDAZA		Número de Referencia: PD-012-2025	Rev.: A
			Escala: 1:1 / Form.: A4 / Fecha: 02/07/2025	Hoja: 14/16

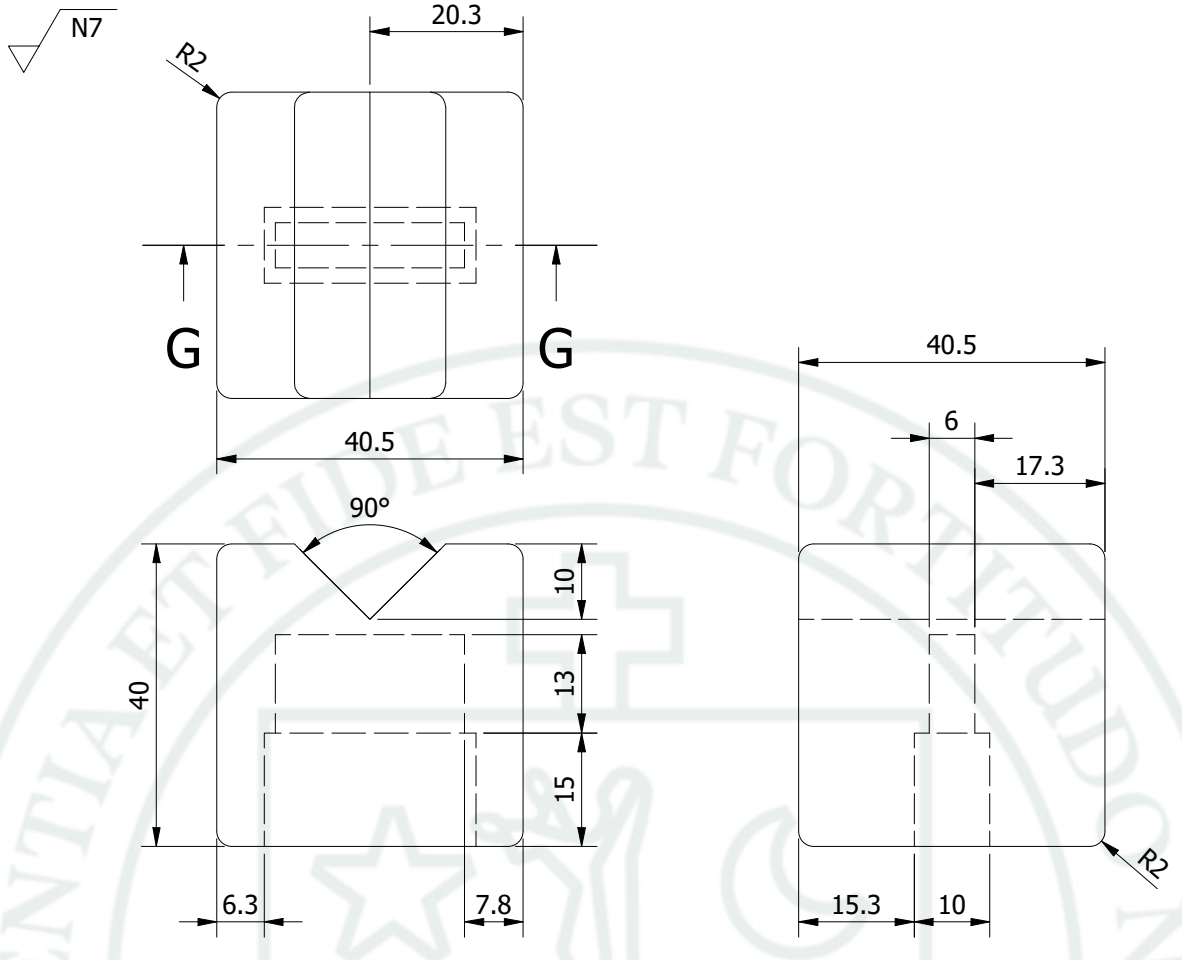


Escala 1:2

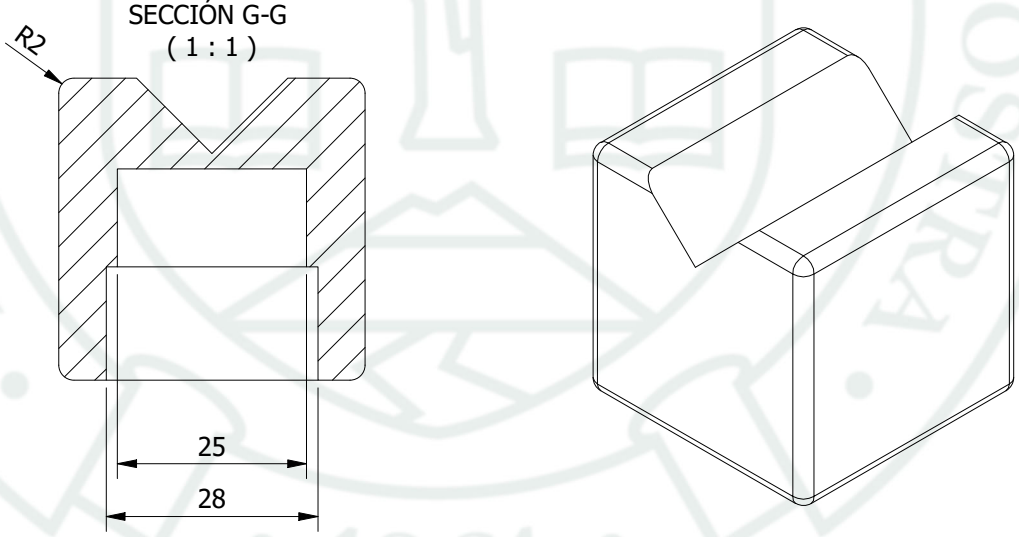
Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N7: 0.0016 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece	
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: CUBO SUPERIOR CON MORDAZA		Número de Referencia: PD-013-2025	Rev.: A
			Escala: 1:1 / Form.: A4 / Fecha: 02/07/2025	Hoja: 15/16



SECCIÓN G-G
(1 : 1)



Escala 1:1

Diferencias en mm para medidas nominales en mm					
Grado de Precisión	desde 0.5 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m (mediano)	± 0.1	± 0.1	± 0.2	± 0.3	± 0.5

Tolerancia General:	Material:	Acabado Superficial:
ISO 2768 - m	Acero ASTM A36 - Grado A36	N7: 0.0016 mm

Universidad Católica de Santa María Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Mecánica Eléctrica y Mecatrónica	Creado por: Carpio Eduardo Herrera Jorge	Arobado por: Alcázar Hermann	Tipo de Documento: Plano de Despiece		
Tesis: Diseño y fabricación de un módulo educativo para pruebas de pandeo en barras esbeltas con capacidad de 2500 N	Título, Subtítulo: CUBO DE APOYO ARTICULADO		Número de Referencia: PD-014-2025		Rev.: A
			Escala: 1:1	Form.: A4	Fecha: 02/07/2025 / Hoja: 16/16

Anexo B: Tabla consolidada de probetas, dimensiones, repeticiones y carga crítica experimental

Código	Repetición	Condición de apoyo	Material	Espesor b (mm)	Espesor b (pulg)	Ancho h (mm)	Ancho h (pulg)	Longitud libre (mm)	Longitud total (mm)	Carga crítica experimental (N)
EMP–EMP 1–1	1	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	544	620
EMP–EMP 1–2	2	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	544	620
EMP–EMP 1–3	3	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	544	600
EMP–EMP 2–1	1	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	544	1020
EMP–EMP 2–2	2	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	544	1180
EMP–EMP 2–3	3	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	544	1220
EMP–EMP 3–1	1	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	650	694	1050
EMP–EMP 3–2	2	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	650	694	1100
EMP–EMP 3–3	3	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	650	694	1090
EMP–EMP 4–1	1	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	720	764	1600
EMP–EMP 4–2	2	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	720	764	1300
EMP–EMP 4–3	3	Empotrado–Empotrado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	720	764	1280
EMP–ART 1–1	1	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	522	380

EMP–ART 1–2	2	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	522	370
EMP–ART 1–3	3	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	522	370
EMP–ART 2–1	1	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	522	670
EMP–ART 2–2	2	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	522	640
EMP–ART 2–3	3	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	522	620
EMP–ART 3–1	1	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	522	1100
EMP–ART 3–2	2	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	522	1080
EMP–ART 3–3	3	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	522	1100
EMP–ART 4–1	1	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	550	572	1440
EMP–ART 4–2	2	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	550	572	1390
EMP–ART 4–3	3	Empotrado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	550	572	1450
ART–ART 1–1	1	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	500	220
ART–ART 1–2	2	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	500	220
ART–ART 1–3	3	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.00	1/8”	12.64	1/2”	500	500	225
ART–ART 2–1	1	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	500	390
ART–ART 2–2	2	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	500	410

ART–ART 2–3	3	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	3.21	1/8”	19.15	3/4”	500	500	400
ART–ART 3–1	1	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	500	680
ART–ART 3–2	2	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	500	670
ART–ART 3–3	3	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.41	3/16”	12.61	1/2”	500	500	670
ART–ART 4–1	1	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	500	500	1050
ART–ART 4–2	2	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	500	500	990
ART–ART 4–3	3	Articulado–Articulado	ASTM A36 – Grado A36	4.78	3/16”	15.94	5/8”	500	500	980

Anexo C: Guía de laboratorio para el uso del módulo educativo de pandeo

E.P.I.M.M.E.M.	Universidad Católica de Santa María	Nro.	
		Página:	1 de 17
Tema	ENSAYO DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS MEDIANTE MÓDULO EDUCATIVO	Código:	
		Semestre:	
		Grupo:	

GUÍA DE LABORATORIO

ENSAYO DE MATERIALES

ESCUELA PROFESIONAL DE: INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA

ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA

LABORATORIO N° 1: ENSAYO DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS MEDIANTE MÓDULO EDUCATIVO

Versión: 2025-01
Fecha: Noviembre – 2025

1. OBJETIVOS

Objetivo general

- Utilizar el módulo educativo de pandeo para determinar experimentalmente la carga crítica en barras esbeltas sometidas a compresión axial y analizar su comportamiento bajo distintas condiciones de apoyo.

Objetivos específicos

- Reconocer e identificar los componentes principales del módulo educativo de pandeo.
- Montar correctamente las probetas según las configuraciones empotrado–empotrado, empotrado–articulado y articulado–articulado.
- Determinar experimentalmente la carga crítica de pandeo mediante un dinamómetro analógico.
- Evaluar la influencia de la longitud libre, el espesor y el ancho de la probeta en la carga crítica.
- Comparar los resultados experimentales con los valores teóricos obtenidos a partir de la ecuación de Euler.

2. SEGURIDAD

Equipo de protección personal (EPP)		
EPP	**Función preventiva**	**Aplicación en el ensayo de pandeo**
Lentes de seguridad	Protegen los ojos frente a partículas desprendidas, proyección accidental de fragmentos o movimientos súbitos de la probeta durante el pandeo.	Uso obligatorio durante el montaje de la probeta, aplicación de carga y toma de datos.
Guantes de protección mecánica	Protegen las manos contra cortes, atrapamientos y contacto directo con superficies metálicas.	Utilizados durante el montaje, desmontaje y manipulación de las probetas y cubos de apoyo.
Calzado de seguridad	Protege los pies frente a caídas de piezas metálicas o componentes del módulo educativo.	Uso permanente dentro del laboratorio durante toda la práctica experimental.
Ropa de trabajo (mameluco u overol)	Protege el cuerpo y la ropa del usuario, evitando enganches con elementos móviles del equipo.	Uso obligatorio durante la ejecución completa del ensayo de pandeo.

Reglas generales de seguridad

- Verificar el estado del módulo antes de iniciar el ensayo.
- No exceder la capacidad máxima del dinamómetro (2500 N).
- Mantener las manos alejadas de la línea de carga durante la aplicación de la fuerza.
- No realizar ajustes con carga aplicada.
- Mantener el área de trabajo limpia y ordenada.
- Ejecutar el ensayo únicamente bajo la supervisión del docente responsable.

3. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y DETERMINACIÓN DE CONTROLES (IPERC DE LÍNEA BASE)

- **Objetivo:** Identificar peligros asociados con la preparación, operación y cierre de la práctica, estimar los riesgos y establecer controles para prevenir lesiones y daños al equipo. La matriz constituye una propuesta académica que debe verificarse y aprobarse según las condiciones reales del laboratorio y el procedimiento institucional de seguridad y salud en el trabajo.

- **Metodología de valoración propuesta:**
  Nivel de riesgo (NR) = Probabilidad (P) × Severidad (S). Se adopta una escala ordinal de 1 a 5 para cada variable. La evaluación residual presupone que los controles indicados están implementados y son efectivos; de no verificarse, se conserva el nivel inicial.

P	Probabilidad	S	Severidad
1	Rara: no esperada en condiciones normales	1	Insignificante: sin lesión o primeros auxilios mínimos
2	Poco probable: ocasional	2	Menor: lesión leve reversible
3	Posible: puede suceder durante la práctica	3	Moderada: lesión que requiere atención médica
4	Probable: ocurrencia esperable sin controles	4	Grave: lesión incapacitante
5	Muy probable: exposición frecuente o persistente	5	Catastrófica: lesión irreversible grave o fatalidad

Clasificación adoptada: Bajo (1–4) · Moderado (5–9) · Alto (10–25) tal como se muestra en la siguiente matriz.

MATRÍZ BÁSICA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS

SEVERIDAD							
	Catastrófica	5	25	20	15	10	5
	Grave	4	20	16	12	8	4
	Moderada	3	15	12	9	6	3
	Menor	2	10	8	6	4	2
	Insignificante	1	5	4	3	2	1
			5	4	3	2	1
			Muy probable	Probable	Posible	Poco probable	Rara
			PROBABILIDAD				

Antes de iniciar el ensayo deben tratarse los riesgos altos o críticos; los niveles residuales deben mantenerse bajo control y supervisión.

- **Medidas generales previas al ensayo:**
  - Verificar integridad y fijación del módulo, estado de cubos de apoyo y tornillo, centrado de la carga, ausencia de fisuras o deformaciones en las probetas y capacidad del dinamómetro (2500 N).
  - Usar lentes, calzado y ropa de seguridad, y guantes adecuados para manipular material sin carga.
  - Mantener libres las manos y el cuerpo de la trayectoria de pandeo y de los puntos de atrapamiento.
  - No reajustar el montaje mientras exista carga aplicada.

- **Nota de integración:** Esta matriz complementa el ATS que se detallará puntos más adelante en la guía, el IPERC valora los riesgos de las actividades y el ATS fija el orden y las precauciones de ejecución. Las cifras P y S son estimaciones preliminares con fines de formación, no resultados de una inspección presencial. Las columnas proceso, actividad y tarea diferencian la etapa general, la acción operativa y el paso específico del ensayo.

  Con la finalidad de identificar los peligros, evaluar los riesgos y establecer las medidas de control necesarias durante el desarrollo de la práctica experimental, se elaboró el IPERC de línea base correspondiente al ensayo de pandeo en barras esbeltas mediante módulo educativo. Esta matriz contempla las actividades y tareas involucradas en el procedimiento, considerando los riesgos asociados a la manipulación de las probetas, el montaje, la aplicación de cargas axiales y la operación del equipo. Asimismo, permite determinar los niveles de riesgo inicial y residual, contribuyendo a la prevención de incidentes y al desarrollo seguro de las actividades de laboratorio.

  A continuación, se presenta la matriz IPERC de línea base para el ensayo de pandeo en barras esbeltas:

IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS, EVALUACIÓN Y CONTROL DE RIESGOS - LÍNEA BASE

ENSAYO DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS

Proceso	Actividad	Tarea	Puesto de Trabajo	Clasificación del Peligro	Peligros	Riesgos	Consecuencia	Evaluación de Riesgo Inicial				Controles Administrativos	Evaluación del Riesgo Residual				Responsable
								Nivel de Probabilidad (P)	Nivel de Severidad (S)	Clasificación del Riesgo (PxS)	Nivel de Riesgo		Nivel de Probabilidad (P)	Nivel de Severidad (S)	Clasificación del Riesgo (PxS)	Nivel de Riesgo	
Ensayo de pandeo en barras esbeltas mediante módulo educativo	Ingreso y preparación	Verificar orden, accesos y uso de EPP antes de ingresar al área de trabajo.	Estudiante / docente	Locativo / mecánico	Desorden, obstáculos y objetos en el piso	Caída al mismo nivel	Contusiones leves, hematomas o esguinces.	2	2	4	Bajo	Orden y limpieza; despejar accesos; calzado de seguridad; revisión previa del área	1	**2**	**2**	Bajo	Docente responsable del laboratorio
	Inspección del módulo	Revisar fijaciones, integridad de los componentes y funcionamiento del módulo sin carga.	Docente / encargado	Mecánico	Piezas sueltas, deterioradas o mal fijadas	Golpe o atrapamiento por desprendimiento de un componente	Contusiones, lesiones en dedos o fracturas.	3	3	9	Medio	Inspección visual y funcional sin carga; inmovilizar el equipo defectuoso; reportar y corregir antes de usar	1	**3**	**3**	Bajo	Estudiante

	Medición de probetas	Medir espesor, ancho y longitud libre de la probeta; revisar aristas.	Estudiante	Mecánico	Aristas vivas y rebabas del acero A36	Contacto accidental con aristas y rebabas	Heridas cortantes superficiales en las manos.	3	2	6	**Medio**	Revisar bordes y retirar rebabas; manipular con guantes mecánicos; apoyar sobre superficie estable	1	**2**	**2**	**Bajo**	Estudiante, bajo supervisión del docente
	Selección e instalación de apoyos	Seleccionar, colocar y fijar los cubos de apoyo de la configuración requerida.	Estudiante / docente	Mecánico	Puntos de pellizco entre cubos y accesorios	Atrapamiento de dedos entre los cubos y accesorios	Contusiones y lesiones por aplastamiento de los dedos.	3	3	9	**Medio**	Montar sin carga; sujetar por zonas seguras; verificar asiento y fijación; seguir orientación docente	1	**3**	**3**	**Bajo**	Estudiante, bajo supervisión del docente
	Colocación y alineación	Posicionar la probeta, centrarla y verificar la alineación axial.	Docente / estudiante	Mecánico	Probeta mal centrada / montaje inestable	Desplazamiento repentino de la probeta por desalineación	Contusiones o lesiones oculares por impacto.	3	4	12	**Alto**	Verificar longitud libre, centrado y apoyo de ambos extremos; corregir sin carga; docente autoriza inicio	1	**4**	**4**	**Bajo**	Estudiante, bajo supervisión del docente
	Giro del tornillo y carga	Accionar progresivamente el tornillo de avance sin movimientos bruscos.	Estudiante	Mecánico	Partes móviles, puntos de atrapamiento	Atrapamiento de manos en las partes móviles del mecanismo	Lesiones por aplastamiento y contusiones en dedos o manos.	3	3	9	**Medio**	Accionar desde zona prevista; no tocar los apoyos mientras se carga; mantener distancia de manos	1	**3**	**3**	**Bajo**	Estudiante, bajo supervisión del docente
	Compresión y pandeo	Observar la respuesta lateral de la probeta durante el incremento de carga.	Docente / estudiante	Mecánico	Energía elástica acumulada; deformación lateral súbita	Impacto por desplazamiento lateral súbito de la probeta	Contusiones graves, lesiones oculares o traumatismos.	4	4	16	**Alto**	Aplicar carga gradual; excluir manos/rostro del plano de pandeo; protección ocular; supervisión permanente; detener ante anomalías	2	**4**	**8**	**Medio**	Estudiante, bajo supervisión del docente

	Control de carga	Verificar que el dinamómetro no exceda su capacidad de 2500 N.	Docente / estudiante	Mecánico	Sobrecarga del dinamómetro analógico	Falla o desprendimiento de componentes por sobrecarga	Traumatismos por impacto y posibles lesiones graves.	3	4	12	**Alto**	No superar 2500 N; leer continuamente; suspender carga ante señal anormal o falta de lectura confiable	1	**4**	**4**	**Bajo**	Estudiante, bajo supervisión del docente
	Lectura de datos	Leer y registrar la carga crítica manteniendo distancia de la zona de pandeo.	Estudiante	Mecánico	Aproximación del rostro a elementos bajo carga	Golpe por pérdida súbita de estabilidad durante la lectura	Lesiones faciales, contusiones o daño ocular.	3	3	9	**Medio**	Leer desde posición lateral segura, sin inclinarse sobre la trayectoria de la probeta; observación supervisada	1	**3**	**3**	**Bajo**	Estudiante
	Descarga controlada	Retroceder el tornillo y verificar que la carga sea cero antes de intervenir.	Estudiante / docente	Mecánico	Liberación brusca de energía y carga residual	Movimiento inesperado de componentes al liberar la carga residual	Contusiones, atrapamiento o lesiones por aplastamiento.	3	4	12	**Alto**	Retroceder tornillo gradualmente; confirmar lectura cero; no modificar apoyos hasta descarga total	1	**4**	**4**	**Bajo**	Estudiante
	Desmontaje y limpieza	Retirar la probeta descargada; ordenar y limpiar el módulo y área de trabajo.	Estudiante	Mecánico	Piezas con bordes agudos o aún tensionadas	Contacto con bordes cortantes o piezas que conservan carga	Heridas cortantes, contusiones o lesiones en los dedos.	3	3	9	**Medio**	Confirmar carga cero; desmontar con guantes; almacenar probetas y accesorios ordenadamente	1	**3**	**3**	**Bajo**	Estudiante

Nota: Las actividades del ensayo de pandeo serán ejecutadas por los estudiantes bajo la supervisión del docente responsable del laboratorio, quien verificará las condiciones de seguridad del módulo, el cumplimiento de las medidas de control establecidas y la correcta aplicación de los procedimientos experimentales.

4. ANÁLISIS DE TRABAJO SEGURO (ATS)

ANALISIS DE TRABAJO SEGURO (ATS) ENSAYO DE PANDEO EN BARRAS ESBELTAS MEDIANTE MÓDULO EDUCATIVO					
Curso:					
N°	**1° Pasos del trabajo**	**2° Riesgos identificados**	**3° Acciones preventivas**	**4° Requerimientos**	**5° Responsable**
1	Ingreso al laboratorio	Tropezones, caídas por desorden, uso inadecuado del área	Orden y uso de EPP	Calzado de seguridad, laboratorio despejado	Estudiante
2	Explicación del docente	Errores de comprensión del procedimiento, montaje incorrecto	Atención a indicaciones	Presencia del docente, guía de laboratorio, silencio y concentración	Ing. Jefe Prácticas
3	Montaje de probeta	Atrapamiento de dedos, desalineación de la probeta, caída de piezas	Montaje sin carga	Herramientas adecuadas, verificación visual del alineamiento, supervisión	Estudiante
4	Aplicación de carga	Pérdida súbita de estabilidad, pandeo brusco, desplazamiento inesperado de la probeta	Carga progresiva	Dinamómetro calibrado, límite máximo de carga, área despejada	Estudiante
5	Toma de datos	Lecturas incorrectas, distracción durante la medición	Observación cuidadosa	Hoja de registro, buena iluminación, posición visual adecuada	Estudiante
6	Desmontaje	Daños al equipo, atrapamiento	Descarga total previa	Confirmación de carga cero, herramientas en buen estado	Estudiante

		por carga residual			
7	Orden y limpieza	Pérdida de material, contaminación del área de trabajo	Entrega ordenada	Entrega del módulo limpio y completo	Estudiante

5. FUNDAMENTO TEÓRICO

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad que ocurre en barras esbeltas sometidas a carga axial de compresión, cuando la carga aplicada alcanza un valor crítico que provoca una deflexión lateral significativa. La carga crítica depende de la rigidez flexional del elemento, su longitud libre, la condición de apoyo y las propiedades del material. En esta práctica se analiza el pandeo elástico de barras esbeltas y se comparan los resultados experimentales con los valores teóricos calculados mediante la ecuación de Euler.

a) Cálculo de la carga crítica teórica

La carga crítica de pandeo teórica se calcula empleando la ecuación de Euler para barras esbeltas sometidas a compresión axial:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

donde:

- P_{cr} = carga crítica teórica de pandeo (N)
- E = módulo de elasticidad del material ensayado (Pa)
- I = momento de inercia de la sección transversal (m⁴)
- L = longitud libre de la probeta (m)
- K = factor de longitud efectiva (adimensional)

Valores de *K* recomendados

Para el desarrollo de la práctica se emplean los factores de longitud efectiva *K* recomendados, ya que estos representan de manera más realista el grado de restricción rotacional presente en los apoyos reales del módulo educativo. Dichos valores se toman de la norma AISC 360-22 (Specification for Structural Steel Buildings) y son:

- Empotrado – empotrado: $K = 0.65$
- Empotrado – articulado: $K = 0.80$
- Articulado – articulado: $K = 1.00$

Estos valores se utilizan en lugar de los coeficientes ideales porque consideran imperfecciones geométricas, flexibilidad de los apoyos y condiciones reales de

montaje, permitiendo una mejor concordancia entre los resultados teóricos y experimentales.

b) Radio de giro

El radio de giro se calcula a partir de las propiedades geométricas de la sección transversal de la probeta y se define como la raíz cuadrada del cociente entre el momento de inercia y el área de la sección transversal:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

donde:

- r = radio de giro (m)
- I = momento de inercia de la sección transversal (m^4)
- A = área de la sección transversal (m^2)

El radio de giro representa una medida geométrica que relaciona la distribución del área respecto al eje de pandeo y es un parámetro fundamental para la evaluación de la esbeltez.

c) Esbeltez de la probeta

La esbeltez de cada probeta se determina mediante la expresión:

$$\lambda = \frac{KL}{r}$$

donde:

- λ = esbeltez (adimensional)
- K = factor de longitud efectiva según la condición de apoyo
- L = longitud libre de la probeta (m)
- r = radio de giro (m)

Una probeta se considera esbelta para el análisis de pandeo elástico cuando su relación de esbeltez supera el valor de esbeltez de transición correspondiente al material. Este límite depende del módulo de elasticidad y del esfuerzo de fluencia, por lo que no constituye un valor constante para todos los materiales. En el caso del acero estructural ASTM A36, utilizado en la presente práctica, se establece una esbeltez de transición aproximada de 126. Por tanto, para la aplicación de la ecuación de Euler, se requiere que la relación de esbeltez de la probeta sea mayor a dicho valor, conforme al procedimiento de cálculo desarrollado en el apartado referido a esbeltez de transición.

d) Esbeltez de transición (λ_c)

La esbeltez de transición es un parámetro adimensional que permite establecer el límite entre el comportamiento de pandeo inelástico y elástico de una barra sometida a compresión axial. Este valor depende de las propiedades mecánicas del material, específicamente del módulo de elasticidad y del límite de fluencia, y permite determinar la aplicabilidad de las ecuaciones de Johnson y Euler.

Según Gere y Goodno (2009), la esbeltez de transición se determina mediante la siguiente expresión:

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{2E}{\sigma_y}}$$

Donde:

- λ_c = Esbeltez de transición (adimensional).
- E = Módulo de elasticidad del material (MPa).
- σ_y = Límite de fluencia del material (MPa).

Para el acero estructural ASTM A36, utilizado en las probetas del módulo educativo, se consideran las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo de elasticidad: E = 200 000 MPa.
- Límite de fluencia: σ_y = 250 MPa.

Reemplazando estos valores:

$$\lambda_c = \pi \sqrt{\frac{2(200\,000)}{250}}$$

$$\lambda_c = \pi\sqrt{1600}$$

$$\lambda_c = 125.66 \approx 126$$

Por tanto, para las probetas de acero estructural ASTM A36, se establece una esbeltez de transición aproximada de 126, que permite diferenciar los siguientes comportamientos:

- Si $\lambda > 126$: la probeta se clasifica como esbelta dentro del régimen de pandeo elástico, por lo que resulta aplicable la ecuación de Euler.
- Si $\lambda < 126$: la probeta se encuentra dentro del régimen de pandeo inelástico o de esbeltez intermedia, cuyo comportamiento puede evaluarse mediante la ecuación de Johnson.
- Si $\lambda \approx 126$: la probeta se encuentra próxima al límite de transición entre ambos regímenes.

En consecuencia, antes de desarrollar el ensayo, se deberá calcular la relación de esbeltez de cada probeta mediante $\lambda = KL/r$ y compararla con la esbeltez de transición

del acero ASTM A36. Para efectos de esta práctica, se considerarán probetas esbeltas, bajo el criterio de pandeo elástico de Euler, aquellas cuya relación de esbeltez sea mayor a 126.

6. EQUIPOS Y MATERIALES

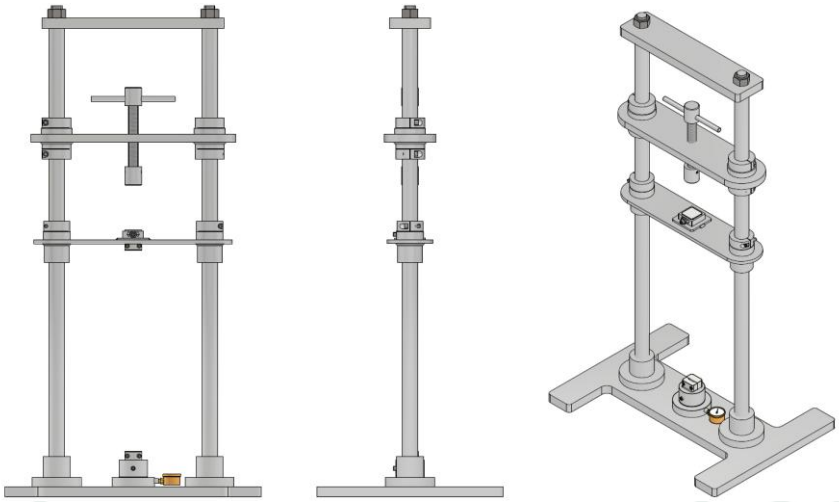
- Módulo educativo para ensayos de pandeo
- Dinamómetro analógico (capacidad 2500 N)
- Probetas metálicas de acero estructural ASTM A36
- Cubos de apoyo empotrado y articulado
- Calibrador Vernier
- Regla metálica
- Hoja de registro de datos

7. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

a) Identificación del módulo educativo

Antes de iniciar el ensayo, se identifican y reconocen los componentes principales del módulo educativo de pandeo, tales como el soporte base, las columnas principales, el puente de columnas, el puente guía para el cubo superior, el tornillo de avance, el adaptador para cubo inferior y los cubos de apoyo empotrado y articulado. Esta identificación permite al estudiante comprender la función de cada elemento dentro del sistema y su influencia en la correcta transmisión de la carga axial durante el ensayo.

Módulo educativo de pandeo



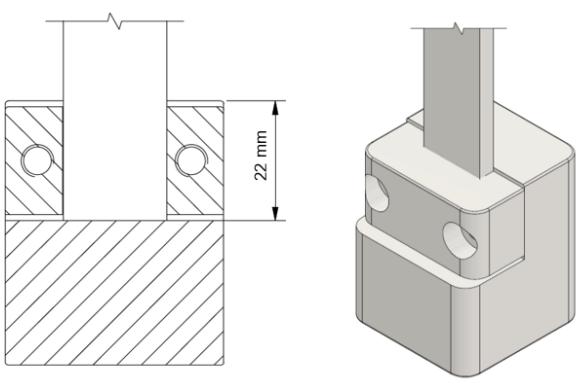
b) Medición de las dimensiones de la probeta

Se procede a medir el espesor y el ancho de la probeta mediante un calibrador Vernier, y la longitud libre mediante una regla metálica, registrando cuidadosamente estos valores en la hoja de datos. Estas dimensiones geométricas son fundamentales para el análisis posterior, ya que influyen directamente en la rigidez flexional, la esbeltez y la carga crítica de pandeo de la probeta.

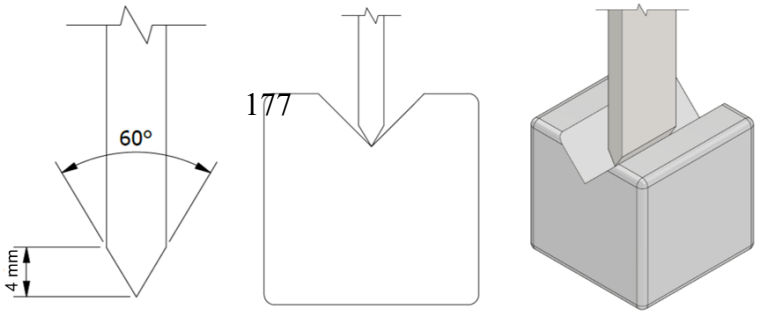
c) Selección de la configuración de apoyo

Se selecciona la configuración de apoyo a ensayar según el objetivo de la práctica, pudiendo ser empotrado–empotrado, empotrado–articulado o articulado–articulado. Para ello, se instalan los cubos de apoyo correspondientes en los extremos inferior y superior del módulo, verificando que el tipo de cubo utilizado coincida con la condición de borde requerida para el ensayo. El extremo de la probeta que estará en contacto según el tipo de apoyo se detalla en las siguientes figuras.

Extremo de la probeta en el cubo de apoyo empotrado



Extremo de la probeta en el cubo de apoyo articulado



d) Montaje y alineación de la probeta

La probeta se coloca cuidadosamente entre los cubos de apoyo, asegurando que su eje longitudinal coincida con la línea de aplicación de la carga. Se verifica la alineación axial del conjunto mediante el puente guía del cubo superior, con el fin de evitar excentricidades iniciales que puedan generar esfuerzos de flexión adicionales y alterar el valor de la carga crítica medida.

e) Aplicación progresiva de la carga de compresión

Una vez asegurado el montaje y la alineación, se aplica la carga axial de compresión de manera gradual, uniforme y continua mediante el tornillo de avance del módulo cuidando de no exceder la carga máxima de 2500 N del dinamómetro. La aplicación progresiva de la carga permite observar el comportamiento de la probeta durante el incremento de la fuerza y evita solicitaciones bruscas que puedan afectar la estabilidad del sistema o la lectura del dinamómetro.

f) Determinación de la carga crítica de pandeo

La carga crítica experimental se registra empleando el dinamómetro analógico cuando se observa una deflexión lateral repentina de la probeta, característica del inicio del pandeo, o cuando la lectura del dinamómetro alcanza un valor máximo y deja de incrementarse pese a continuar el avance del tornillo. Este valor se considera representativo de la carga crítica de pandeo para la probeta y configuración de apoyo evaluada.

g) Descarga del sistema y repetición del ensayo

Tras registrar la carga crítica, se descarga el sistema de forma controlada girando del tornillo de avance en sentido inverso hasta eliminar completamente la carga aplicada. El ensayo se repite tres veces para cada probeta, manteniendo las mismas condiciones de montaje, alineación y aplicación de carga, con el propósito de evaluar la repetibilidad de los resultados y obtener valores promedio representativos.

8. REGISTRO Y TRATAMIENTO DE DATOS

e) Carga crítica por repetición

La carga crítica de pandeo experimental por repetición corresponde al valor máximo de carga registrado por el dinamómetro analógico en cada ensayo individual, identificado cuando se observa la deflexión lateral característica de la probeta o cuando la lectura del instrumento deja de incrementarse pese a continuar la aplicación de carga.

Este valor se registra directamente como:

$$P_{cr,i}$$

donde:

- $P_{cr,i}$= carga crítica experimental de la repetición i (N)
- i = número de repetición del ensayo (1, 2 o 3)

f) Promedio de carga crítica

El valor promedio de la carga crítica experimental se calcula a partir de las repeticiones realizadas para cada probeta y condición de apoyo, mediante el promedio aritmético:

$$\bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr,1} + P_{cr,2} + P_{cr,3}}{n}$$

donde:

- $\bar{P}_{cr}$= carga crítica experimental promedio (N)
- $P_{cr,1}, P_{cr,2}, P_{cr,3}$= cargas críticas experimentales por repetición (N)
- n= número de repeticiones

g) Desviación estándar

La desviación estándar permite cuantificar la dispersión de los valores experimentales respecto al promedio y se determina mediante:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(P_{cr,i} - \bar{P}_{cr})^2}{n-1}}$$

donde:

- s= desviación estándar (N)
- $P_{cr,i}$= carga crítica experimental de cada repetición (N)
- $\bar{P}_{cr}$= carga crítica experimental promedio (N)
- n= número de repeticiones

h) Observaciones del modo de pandeo

Durante cada ensayo se registran observaciones cualitativas del modo de pandeo presentado por la probeta, identificando la forma de la deformación lateral, la ubicación de la curvatura máxima y su relación con el tipo de apoyo empleado. Estas observaciones permiten correlacionar el comportamiento experimental con el modo fundamental de pandeo previsto por la teoría de Euler para barras esbeltas.

9. DESARROLLO DEL INFORME DEL ESTUDIANTE

El informe debe contener:

1. Objetivos de la práctica
2. Fundamento teórico resumido
3. Descripción del procedimiento experimental
4. Resultados experimentales y tablas de datos
5. Análisis comparativo teórico–experimental
6. Respuestas al cuestionario
7. Observaciones
8. Conclusiones
9. Recomendaciones
10. Bibliografía consultada

10. CUESTIONARIO

1. ¿Cómo influye la longitud libre en la carga crítica de pandeo?
2. ¿Por qué la condición empotrado–empotrado presenta mayor sensibilidad a la alineación?
3. ¿Qué diferencia se observa entre el comportamiento experimental y el teórico?
4. ¿Qué factores experimentales pueden generar dispersión en los resultados?

11. CONCLUSIÓN DE LA PRÁCTICA

La práctica permite visualizar de manera directa el fenómeno de pandeo en barras esbeltas y comprobar experimentalmente la influencia de la geometría y las condiciones de apoyo en la carga crítica, fortaleciendo la comprensión del comportamiento estructural bajo compresión axial.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Institute of Steel Construction. (2022). *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-22).* https://www.aisc.org/aisc/publications/current-standards/aisc-360/
- ASTM International. (2016). *Manual on presentation of data and control chart analysis* (8.ª ed., ASTM Manual 7).
- ASTM International. (2019a). *Standard specification for carbon structural steel (ASTM A36/A36M-19).* https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19
- ASTM International. (2019b). *Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature (ASTM E9-19).* https://doi.org/10.1520/E0009-19
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8.ª ed.). McGraw-Hill.
- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mechanics of materials* (7.ª ed.). Cengage Learning.
- Timoshenko, S. P., & Gere, J. M. (1961). *Theory of elastic stability* (2.ª ed.). McGraw-Hill.

Anexo D: Panel fotográfico del ensamblaje y prueba de funcionamiento del módulo educativo de pandeo

Ensamblaje del módulo educativo de pandeo

Montaje de las columnas principales al soporte base



Montaje del puente guía para cubo superior



Montaje del puente porta tornillo

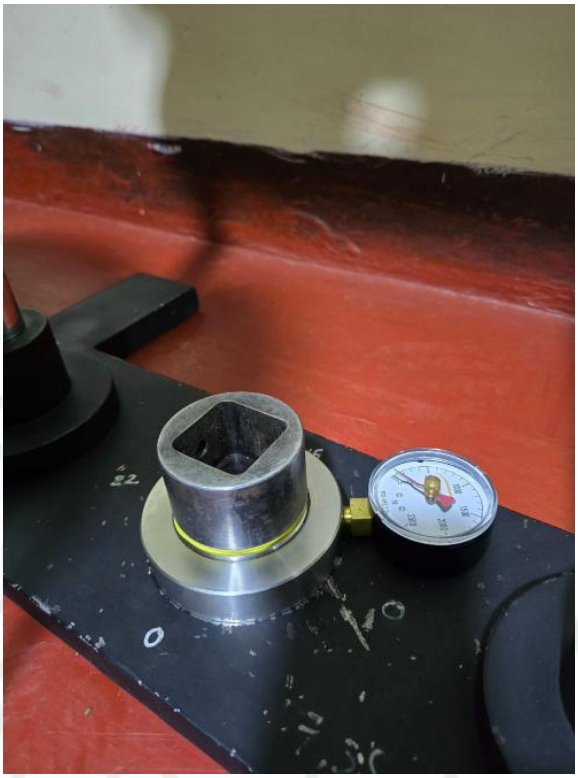


Montaje del puente de columnas principales



Montaje del dinamómetro de 2500 N y del adaptador para cubo inferior





Módulo educativo de pandeo completamente ensamblado



Ejecución del ensayo de pandeo con el módulo

Montaje de la probeta en el cubo de apoyo empotrado inferior



Montaje de la probeta en el cubo de apoyo empotrado superior



Verificación de la alineación de la probeta en el módulo



Verificación de la posición de la aguja indicadora del dinamómetro en 0 N antes del inicio del ensayo



Aplicación de carga progresiva sobre la probeta mediante el giro del tornillo de avance



Verificación de la curva de pandeo en la probeta ensayada de acuerdo al tipo de apoyos



Toma de lectura de la carga crítica registrada por el dinamómetro analógico al término del ensayo de pandeo para su posterior contrastación con el cálculo teórico

