

ANEXO A.

DOCUMENTO GUÍA PARA NORMALIZACIÓN DE ENSAYO

Norma Técnica de Ensayo de Fatiga Multiaxial

ÍNDICE / TABLE OF CONTENTS

1. Alcance (Scope)
2. Normas de Referencia (Referenced Standards)
3. Terminología (Terminology)
4. Aparatos (Apparatus)
5. Especímenes (Test Specimens)
6. Procedimiento de Ensayo (Test Procedure)
7. Registro y Reporte de Datos (Data Recording and Reporting)
8. Consideraciones de Seguridad y Medio Ambiente (Safety and Environmental Considerations)
9. Referencias (References)

1. Alcance (Scope)

Esta norma especifica los requisitos y procedimientos para la ejecución de ensayos de fatiga multiaxial en materiales metálicos, bajo combinaciones de carga axial, torsional y de flexión (rotativa y/o alternativa), con control por fuerza o deformación. Es aplicable a probetas cilíndricas o tubulares con sección uniforme y a configuraciones equivalentes, y cubre: (a) diseño y preparación de probetas; (b) alineación, sujeción y montaje; (c) aplicación y medición de cargas/esfuerzos; (d) selección de frecuencia; (e) criterios de terminación; y (f) registro y reporte de resultados. Los resultados se expresan como número de ciclos a la falla o run-out, y se representan mediante con criterios multiaxiales reconocidos (Findley, Sines, Crossland). Las actividades metrológicas y de seguridad deben cumplir con ISO/IEC 17025 e ISO 45001, respectivamente.

2. Normas de Referencia (Referenced Standards)

ASTM E466; ASTM E606; ISO/TR 12112; ISO 9513; ISO/IEC 17025; ISO 45001; RETIE (2024); Resolución 2044 (1979).

3. Terminología (Terminology)

3.1 Geometría de la probeta / Specimen Geometry

Longitud calibrada (L) / Gauge length: Sección central de la probeta en la que se concentran y miden los esfuerzos/deformaciones. Recomendación: $L = 3d$.

Longitud total (Lt) / Total length: Extensión completa de la probeta, incluyendo zonas de sujeción. Recomendación: $L_t = 20d$.

Radio del cuello (R) / Fillet radius: Transición entre zona calibrada y agarre. Recomendación: $R = 4d$ para minimizar concentradores.

Diámetro de agarre (D) / Grip diameter: Diámetro de las zonas extremas fijadas a las mordazas. Recomendación: $D = 2d$.

Diámetro mínimo (d) / Minimum gauge diameter: Para metales: $d \geq 6,35$ mm; medir con precisión 0,01 mm.

Acabado superficial (Ra) / Surface roughness: Se recomienda $R_a \leq 0,4$ μm para retrasar iniciación de grietas.

Marcado / Marking: Identificación única en zonas no críticas para trazabilidad.

3.2 Mecánica y esfuerzos / Mechanics and Stresses

Esfuerzo normal (σ): Fuerza por unidad de área (N/mm^2). En flexión varía linealmente a través de la sección.

Esfuerzo cortante (τ): Componente tangencial; clave en torsión y estados combinados.

Momento flector (M): Momento por cargas transversales que induce curvatura.

Momento de inercia (I): Para sección circular maciza: $I = \pi \cdot d^4 / 64$; distancia a fibra extrema $c = d/2$.

Tensiones principales ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$): Definen el estado multiaxial local; base de criterios equivalentes (von Mises).

3.3 Deformación y energía / Strain and Energy

Deformación axial (ϵ): Cambio de longitud relativo; en LCF puede controlarse (ASTM E606).

Deformación cortante (γ): Distorsión angular por esfuerzos cortantes; relevante en torsión.

Densidad de energía de deformación: Energía almacenada por unidad de volumen; usada en criterios multiaxiales.

Módulos E y ν : Constantes elásticas de Young y Poisson.

3.4 Fatiga y vida / Fatigue and Life

Fatiga: Fallo progresivo bajo cargas cíclicas; inicia usualmente en la superficie o entallas.

Curva S-N (Wöhler): Relación S vs log N; ley de Basquin $S_a = A \cdot N^b$ ($b < 0$).

LCF/HCF: Bajo ciclo con plasticidad ($\lesssim 10^5$) vs alto ciclo elástico ($\gtrsim 10^5$).

Run-out: Ensayo detenido a N predefinido (p. ej., 10^7) sin falla.

3.5 Carga multiaxial y fase / Multiaxial Loading and Phase

Multiaxial: Actúan simultáneamente componentes en múltiples direcciones (tracción+torsión+flexión).

Proporcional / No proporcional: Trayectorias con dirección fija (proporcional) vs cambiante (no proporcional).

Ángulo de fase (φ): Desfase axial-torsional; $\varphi=0^\circ$ in-fase, $\varphi=90^\circ$ típico no proporcional.

Relación de biaxialidad (ρ): $\rho = \tau_a/\sigma_a$ en tensión-torsión; mide grado de multiaxialidad.

3.6 Control y frecuencia / Control and Frequency

Control por fuerza/deformación: La variable objetivo del ciclo es carga o deformación.

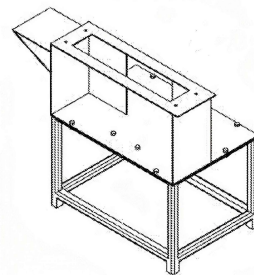
Frecuencia (f): Seleccionar para evitar $\Delta T > 10^\circ C$, resonancias y efectos dinámicos.

Histéresis: Energía por ciclo (área del bucle $\sigma-\epsilon$); aumenta con plasticidad.

4. Aparatos (Apparatus) Máquina de Fatiga Multiaxial

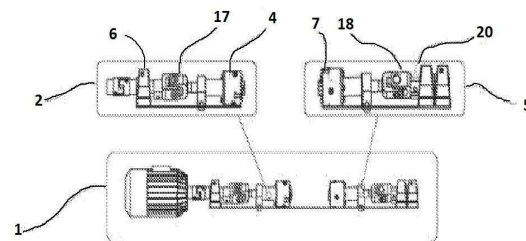
4.1. Bastidor

Estructura de soporte compuesta por largueros y travesaños que sostiene motores, sistemas de sujeción y cojinetes. Incluye mesa con niveladores para estabilidad y opciones de acople con sistemas de amortiguamiento o mortero de concreto para reducción de vibraciones.



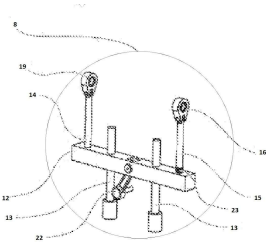
4.2. Sistema Rotacional 1

Formado por un eje de potencia (2) y un eje conducido (5), acoplados mediante juntas universales y cojinetes de bolas. Permite la sujeción de probetas en los extremos mediante dispositivos de fijación colineales.



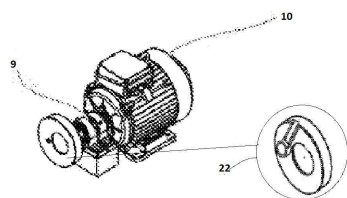
4.3. Mecanismo Reciprocante

Constituido por un elemento alternante guiado linealmente, conectado a un mecanismo oscilatorio (22). Transmite movimiento mediante brazos articulados con cojinetes móviles al eje de potencia y al eje conducido.



4.4. Sistema Rotacional 2

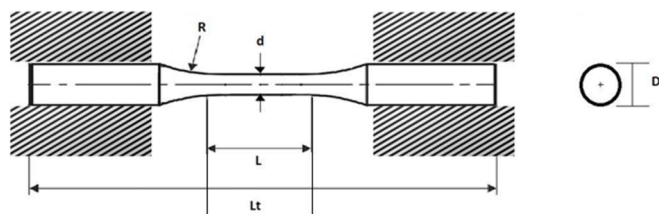
Incluye un segundo motor (10) y un eje de transmisión (9) que acciona un mecanismo biela-manivela (22). Permite realizar ensayos de flexión alternativa o combinada con el Sistema Rotacional 1 para generar sollicitaciones multiaxiales.



Operación

La máquina puede trabajar con un solo motor (flexión rotacional o alternativa) o con ambos en conjunto para aplicar cargas multiaxiales.

5. Especímenes (Test Specimens)



DIMENSIÓN	ESPECIFICACIÓN	TAMAÑO
L	Longitud calibrada	$L=3d$
Lt	Longitud total de la muestra	$Lt=20d$
R	Radio del cuello	$R=4d$
D	Diámetro de sección de agarre	$D=2d$

DIMENSIÓN DE LAS MUESTRAS

Todas las muestras empleadas en una serie de pruebas para la determinación de la vida a fatiga deben tener el mismo tamaño, forma y tolerancia de diámetro.

Con el fin de calcular la fuerza a aplicar para obtener el esfuerzo requerido, el diámetro mínimo real de cada muestra debe medirse con una precisión de 0,01 mm. Se debe tener cuidado durante la medición de la muestra antes de la prueba para asegurar que la superficie no se dañe.

La muestra recomendada posee una sección transversal circular sólida y diámetro mínimo de 6,35 mm (0,25 pulgadas) en la sección de prueba.

PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

GENERAL

En cualquier programa de prueba de fatiga multiaxial diseñado para caracterizar las propiedades intrínsecas de un material, es importante observar las siguientes recomendaciones en la preparación de muestras.

Una posible razón para desviarse de estas recomendaciones es si el programa de prueba tiene como objetivo determinar la influencia de un factor específico (tratamiento de superficie, oxidación, etc.) que sea incompatible con las recomendaciones.

En todos los casos, cualquier desviación debe anotarse en el informe de la prueba.

MARCADO DE LA MUESTRA

La marca o identificación única de cada muestra debe mantenerse en cada etapa de su preparación. Esto puede aplicarse utilizando cualquier método confiable en un área que no sea probable que desaparezca durante el mecanizado o que pueda afectar negativamente la calidad de la prueba. Al finalizar el proceso de mecanizado, es deseable que ambos extremos de cada muestra estén marcados

de manera única para que, después de la falla de una muestra, cada mitad aún pueda ser identificada.

6. Procedimiento de Ensayo (Test Procedure)

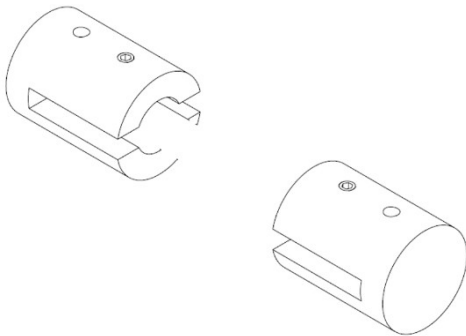
MONTAJE DE LA MUESTRA:

ALINEACIÓN ADECUADA:

La muestra debe montarse en los dispositivos de sujeción de manera que se asegure una alineación adecuada. Esto es crucial para minimizar las tensiones residuales que podrían afectar los resultados de la prueba.

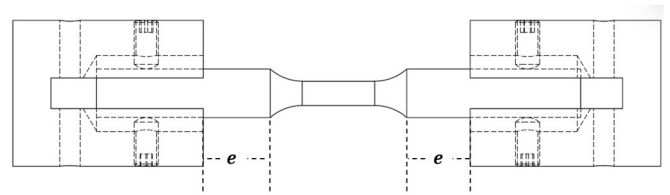
DISPOSITIVOS DE SUJECIÓN:

Se deben utilizar los dispositivos de sujeción para evitar deslizamientos o movimientos durante la prueba. Estos dispositivos permiten que la muestra se mantenga firmemente en su lugar sin causar daños.



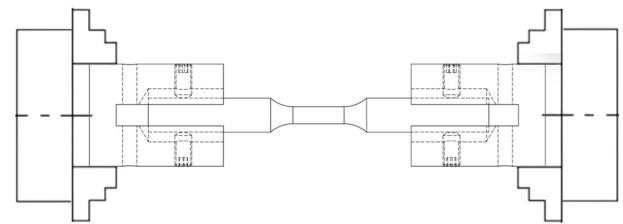
PRECISIÓN EN EL MONTAJE:

Es importante que el montaje de la muestra se realice con precisión para asegurar que la fuerza aplicada durante la prueba sea uniforme y controlada.



MONTAJE EN LA MÁQUINA:

El montaje en los mandriles de la maquina se debe realizar con la probeta ya instalada en los elementos de sujeción, fijar correctamente el montaje a los mandriles asegurando una correcta aplicación de la fuerza y la rotación de la maquina en el ensayo.



VERIFICACIÓN DE LA MUESTRA:

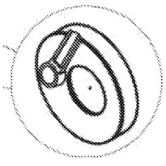
Verifique la correcta alineación de la muestra en la máquina, verifique la superficie de la longitud calibrada en busca de daños provocados en el montaje que puedan desviar o influir en los resultados.

APLICACIÓN DE LA FUERZA

CONTROL DE LA FUERZA:

La fuerza es controlada por medio de una rueda excéntrica con la ayuda en un tornillo, la rueda debe estar totalmente centrada, la posición central deja la carga de la maquina en 0 KN.

Cuando la muestra está en la maquina se debe hacer uso del tornillo y aplicar la carga con ayuda de una llave 10mm



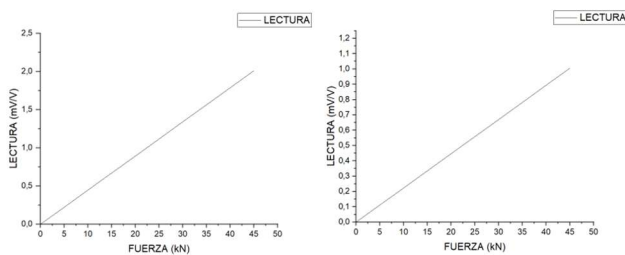
REGISTRO DE LA FUERZA:

Es importante registrar la magnitud de la fuerza aplicada durante la prueba, la fuerza aplicada a la muestra será medida por medio de un sistema que monitorea en tiempo real el comportamiento del sistema, el cual cuenta con un sensor de carga, un captador de señal USB y un software de manejo de información.



MEDICIÓN DE LA FUERZA:

Según la curva de calibración del sensor de carga, la fuerza se calculará dependiendo la señal de excitación que se le aplique al sensor, la señal de salida es directamente proporcional a la señal de ingreso y se leerá siguiendo la gráfica.



RELACIÓN CARGA ESFUERZO:

Como el sistema de medición de fuerza no mide el esfuerzo es necesario calcular la fuerza a aplicar por medio de un análisis de comportamiento del sistema que trabaja como una viga con 2 apoyos y sometida a dos fuerzas que flexionan el sistema.

De este análisis:

$$M = P * 45$$

Como el sistema está sometida a flexión

$$S_x = M * \frac{C}{i}$$

$$C = \frac{D}{2}$$

$$i = \frac{\pi}{4} * C^4$$

Simplificando el sistema de ecuaciones y buscando una ecuación del esfuerzo en función de la fuerza y el diámetro de la probeta, tenemos:

$$S_x = 458,36 * \frac{P}{D^3} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Donde:

S_x = esfuerzo a aplicar

M = Momento flector en la sección de interés

C

= Distancia del eje centroidal a las fibras externas.

i

= momento de inercia de la sección transversal con respecto

P = carga del sistema

D = Diámetro de la probeta

ELECCIÓN DE LA FUERZA A APLICAR EN EL ENSAYO:

Conociendo las propiedades del material calculadas por ensayos de tracción, se definen los siguientes porcentajes para el cálculo de las fuerzas a aplicar en los diferentes ensayos.

Se distribuirán del 40% S_y al 90% S_y , por ninguna razón se realizarán ensayos por encima de estos valores.

Se registrarán los valores calculados en la siguiente tabla.

%Sy	Sx [N/mm²]	P [N]
40%		
50%		
60%		
70%		
80%		
90%		

MONITOREO DE LA PRUEBA:

Durante la prueba, se debe monitorear continuamente la fuerza aplicada para asegurar que se mantenga dentro de los parámetros establecidos. Cualquier desviación debe ser registrada y corregida.

SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA:

IMPORTANCIA DE LA FRECUENCIA:

Factor crucial que puede influir significativamente en los resultados y la interpretación de los datos obtenidos.

CONTROL DEL CALENTAMIENTO:

Una de las razones para seleccionar la frecuencia de prueba es asegurar condiciones de carga estables y repetitivas. En ensayos de alto ciclo, el material debe trabajar dentro de su rango elástico, por lo que no se esperan incrementos significativos de temperatura por deformación plástica. No obstante, niveles de esfuerzo elevados pueden generar cierto calentamiento local por amortiguamiento interno o contacto en los puntos de sujeción, por lo que la frecuencia debe elegirse de manera que no amplifique estos efectos y mantenga la reproducibilidad de los resultados.

REPRESENTATIVIDAD DE LAS CONDICIONES REALES:

La frecuencia de prueba debe ser representativa de las condiciones reales a las que el material estará

sometido en su aplicación práctica. Por ejemplo, componentes que operan a altas velocidades pueden requerir pruebas a frecuencias más altas para simular adecuadamente las condiciones de servicio

MINIMIZACIÓN DE EFECTOS DINÁMICOS:

A frecuencias muy altas, pueden surgir efectos dinámicos que no están presentes en condiciones de carga estática o cuasi-estática. Estos efectos pueden incluir resonancias y vibraciones que podrían influir en la respuesta del material y en la interpretación de los resultados

DURACIÓN DE LA PRUEBA:

La frecuencia también afecta la duración total de la prueba. Frecuencias más altas permiten completar un mayor número de ciclos en un tiempo más corto, lo cual es beneficioso para estudios de vida a fatiga que requieren millones de ciclos. Sin embargo, esto debe equilibrarse con la necesidad de evitar el sobrecalentamiento y otros efectos adversos

PRECISIÓN Y REPRODUCIBILIDAD:

Mantener una frecuencia constante y controlada es esencial para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados. Cualquier variación en la frecuencia durante la prueba puede introducir incertidumbres y afectar la comparabilidad de los datos obtenidos en diferentes ensayos

FACTORES QUE CONSIDERAR

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MUESTRA

Diferentes materiales tienen distintas propiedades mecánicas que afectan su comportamiento bajo cargas cíclicas. Por ejemplo, materiales dúctiles y

frágiles pueden responder de manera diferente a la misma frecuencia de carga.

SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA

Algunos materiales son más sensibles a los cambios de temperatura que otros. La frecuencia debe seleccionarse para minimizar el calentamiento, ya que el incremento de temperatura puede modificar las propiedades mecánicas locales en la zona crítica donde se concentra el daño por fatiga. Dado que la fatiga es un fenómeno que se inicia y desarrolla de manera localizada, por ejemplo, en la superficie o en regiones con concentraciones de esfuerzo, incluso pequeños cambios térmicos en esa región pueden acelerar la nucleación y propagación de grietas, afectando la vida a fatiga de forma significativa

CONDICIONES DE PRUEBA

La prueba se realizará a temperatura ambiente La frecuencia debe ajustarse y mantenerse constante para evitar el sobrecalentamiento de la muestra.

DURABILIDAD Y VIDA ÚTIL:

La frecuencia debe seleccionarse para simular las condiciones reales de servicio del material. Esto es importante para obtener resultados representativos de la durabilidad y la vida útil del material bajo condiciones de carga cíclica

CAPACIDAD DEL EQUIPO DE ENSAYO - PRECISIÓN Y ESTABILIDAD

El equipo de ensayo debe ser capaz de mantener una frecuencia constante y precisa durante toda la prueba. Las variaciones en la frecuencia pueden afectar la reproducibilidad y la fiabilidad de los resultados.

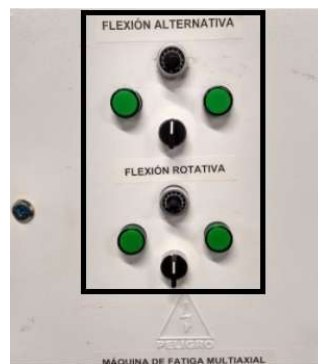
LIMITACIONES DEL EQUIPO

La máquina de fatiga multiaxial presenta limitaciones operativas a altas frecuencias debido a la generación de vibraciones indeseadas que pueden comprometer la estabilidad del ensayo y la integridad del sistema de sujeción. Aunque el equipo permite ajustar la frecuencia de aplicación de cargas, su diseño está optimizado para operar a frecuencias constantes y moderadas, priorizando la precisión en la aplicación de esfuerzos multiaxiales por encima de la variabilidad en la velocidad de carga. Por tanto, el control de frecuencia no constituye el objetivo principal del sistema, sino más bien la reproducción confiable de condiciones de carga multiaxial representativas.

DISPOSITIVO DE SELECCIÓN DE FRECUENCIA

Para un ensayo de fatiga multiaxial se usa el sistema rotacional 1 y el sistema rotacional 2 simultáneamente, dado que el sistema rotacional 1 controla la flexión rotativa y el 2 la flexión alternativa.

El sistema de rotación 1 y 2 tienen la posibilidad de ir desde 3,3 Hz hasta 58,3Hz, se define una frecuencia para el ensayo y se gradúa con ayuda del sistema de control de frecuencia.



7. Registro y Reporte de Datos (Data Recording and Reporting)

REGISTRO DE LA FRECUENCIA

DOCUMENTACIÓN

Registrar la frecuencia seleccionada para cada ensayo y verificar que se mantenga constante durante toda la prueba es fundamental. Este control asegura la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados entre diferentes muestras. En los informes de ensayo se deben incluir el valor de la frecuencia y las condiciones de prueba, proporcionando así un contexto completo para la interpretación de los resultados obtenidos.

FINALIZACIÓN DE LA PRUEBA

La prueba debe finalizarse cuando se fracture la muestra. Se deben registrar todos los datos relevantes, incluyendo el número de ciclos hasta la falla y cualquier observación sobre el comportamiento de la muestra durante la prueba.

REGISTRO DE RESULTADOS

Documentar el número de ciclos alcanzados al momento de la falla, junto con los datos descritos en la tabla.

Probeta	σ (N/mm ²)	Alt	σ medio	Ciclos1 (N)	Ciclos2 (N)	Observación

INFORME DE ENSAYO

IDENTIFICACIÓN DEL ENSAYO

EQUIPO UTILIZADO

Descripción del equipo de ensayo,

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Código o número de identificación de la muestra para asegurar la trazabilidad.

Descripción del material de la muestra, incluyendo su composición y propiedades mecánicas.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Detalles sobre cómo se preparó la muestra antes del ensayo, incluyendo cualquier tratamiento térmico o mecánico aplicado.

CONDICIONES DEL ENSAYO

Se detallará y documentará las condiciones y características del ensayo, con ayuda de las tablas 4 y 5.

RESULTADOS DEL ENSAYO

Con ayuda de la tabla 6 se entregarán los detalles de número de ciclos para la falla y las características del comportamiento de las probetas.

ANÁLISIS DE DATOS

INSPECCIÓN POST-PRUEBA

Realizar una inspección visual de la muestra para identificar el modo de falla. Documentar cualquier característica notable de la fractura o daño.

MODELO DE PRESENTACIÓN DE CURVAS S-N

Ejes del Gráfico:

Eje Vertical (S): Se representa una magnitud equivalente de tensión o deformación, calculada según el criterio multiaxial adoptado (por ejemplo, tensión equivalente de Sines o Crossland, amplitud de deformación en el plano crítico, densidad de energía de deformación, etc.)

Eje Horizontal (N): Representa el número de ciclos hasta el fallo.

8. Consideraciones de Seguridad y Medio Ambiente (Safety and Environmental Considerations)

Indumentaria reglamentaria: ropa ajustada; prohibido mangas amplias, cinturones sueltos, sandalias, bufandas, joyería suelta.

Riesgo eléctrico: cumplir RETIE (2024) en operación/arranque de la máquina y tablero principal.

Riesgo de atrapamiento: operar siempre con guarda cerrada según Resolución 2044 de 1979; proteger órganos móviles y transmisiones.

EPP obligatorio y disposición adecuada de residuos metálicos conforme normativa ambiental vigente.

9. Referencias (References)

ASTM E466 (2015) — Standard Practice for Force-Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests.

ASTM E606 (2012) — Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing.

ISO/TR 12112 (2018) — Metallic materials — Fatigue — Multiaxial fatigue testing.

ISO 9513 (2012) — Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing.

ISO/IEC 17025 (2017) — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

ISO 45001 (2018) — Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use.

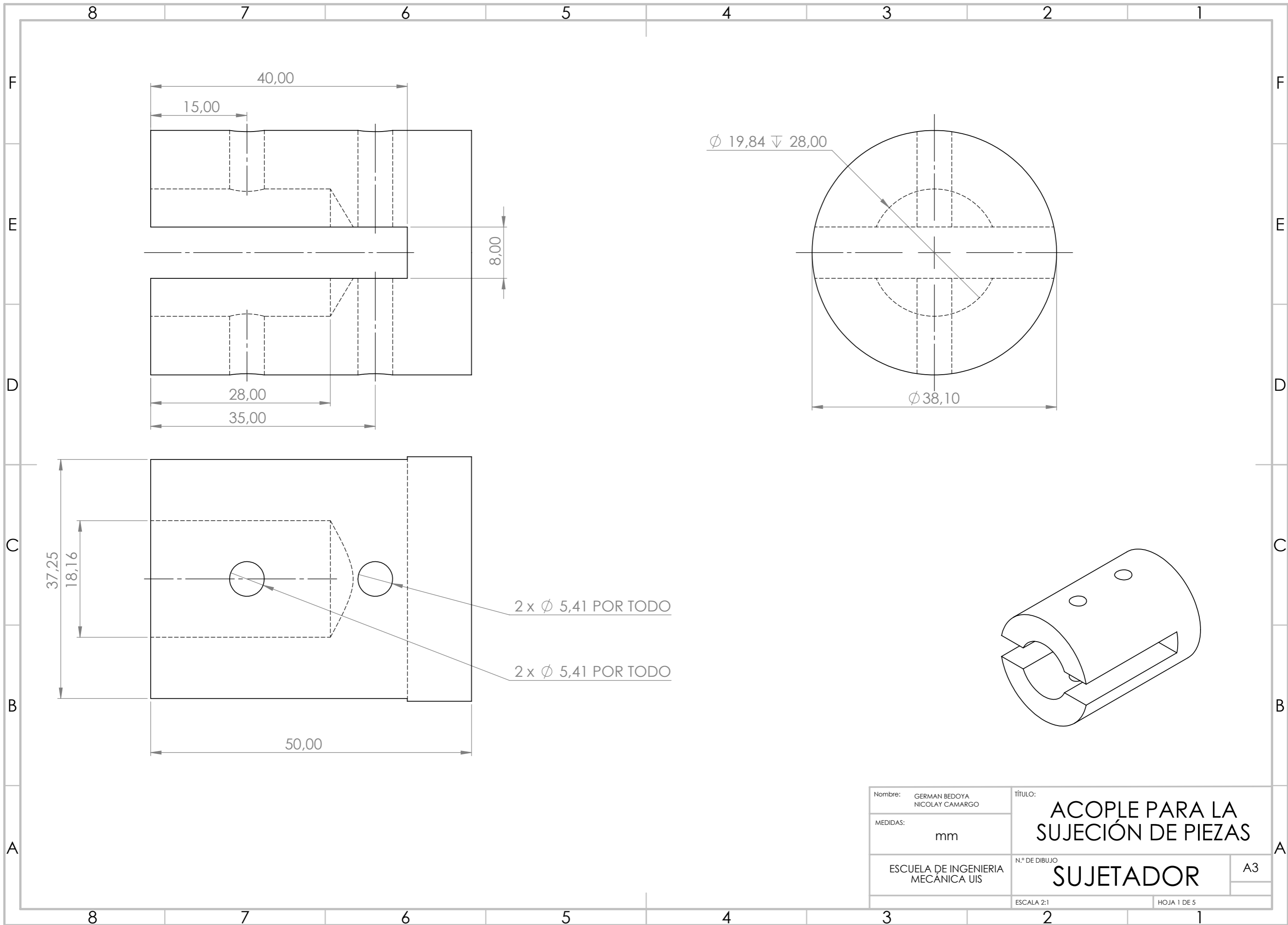
RETIE (2024) — Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (Colombia).

Resolución 2044 (1979) — Máquinas herramienta e industriales (Colombia).

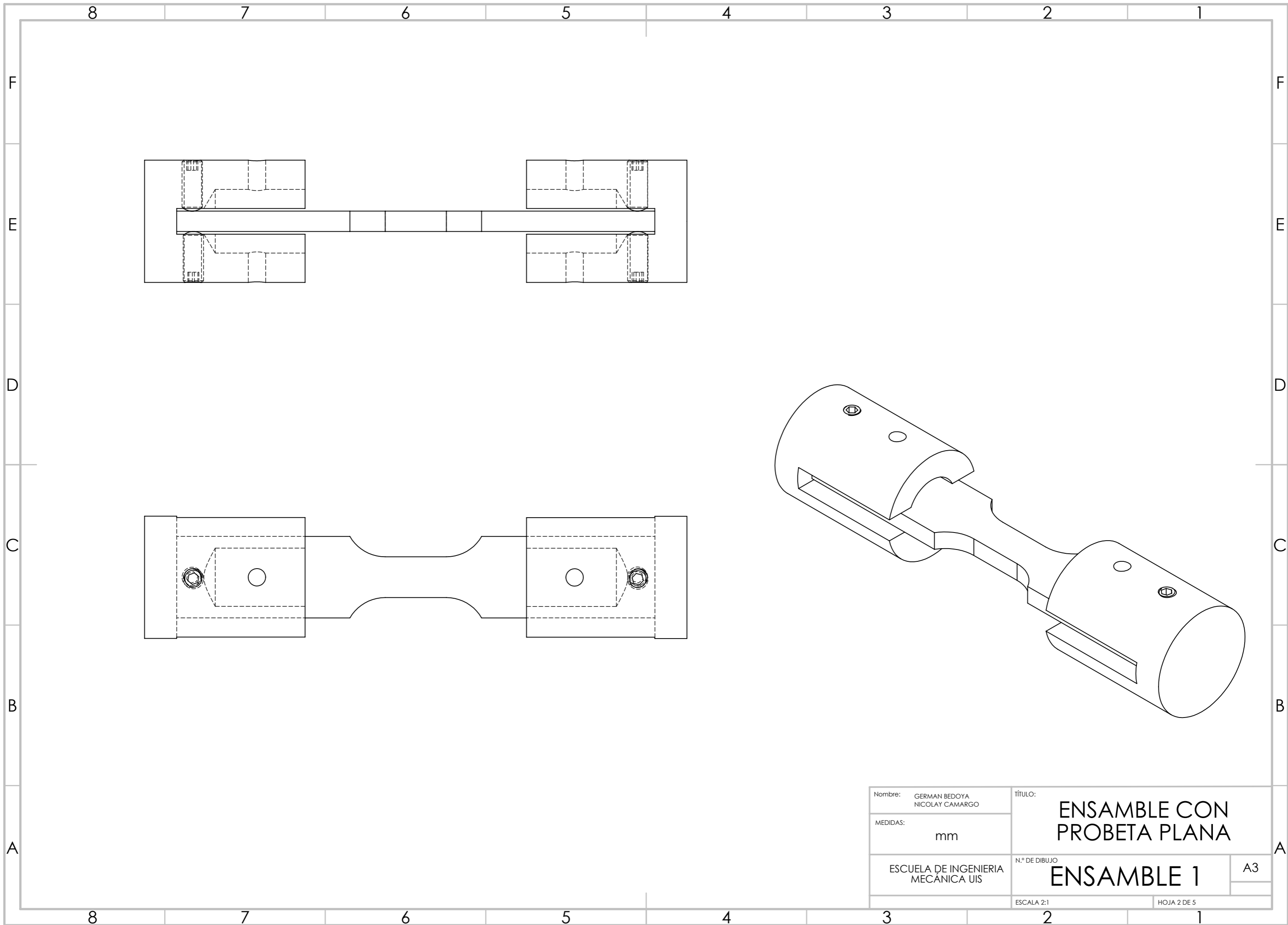
Camargo, N.; Bedoya, G. (2025). Tesis UIS — Ensayo de fatiga multiaxial.

ANEXO B.

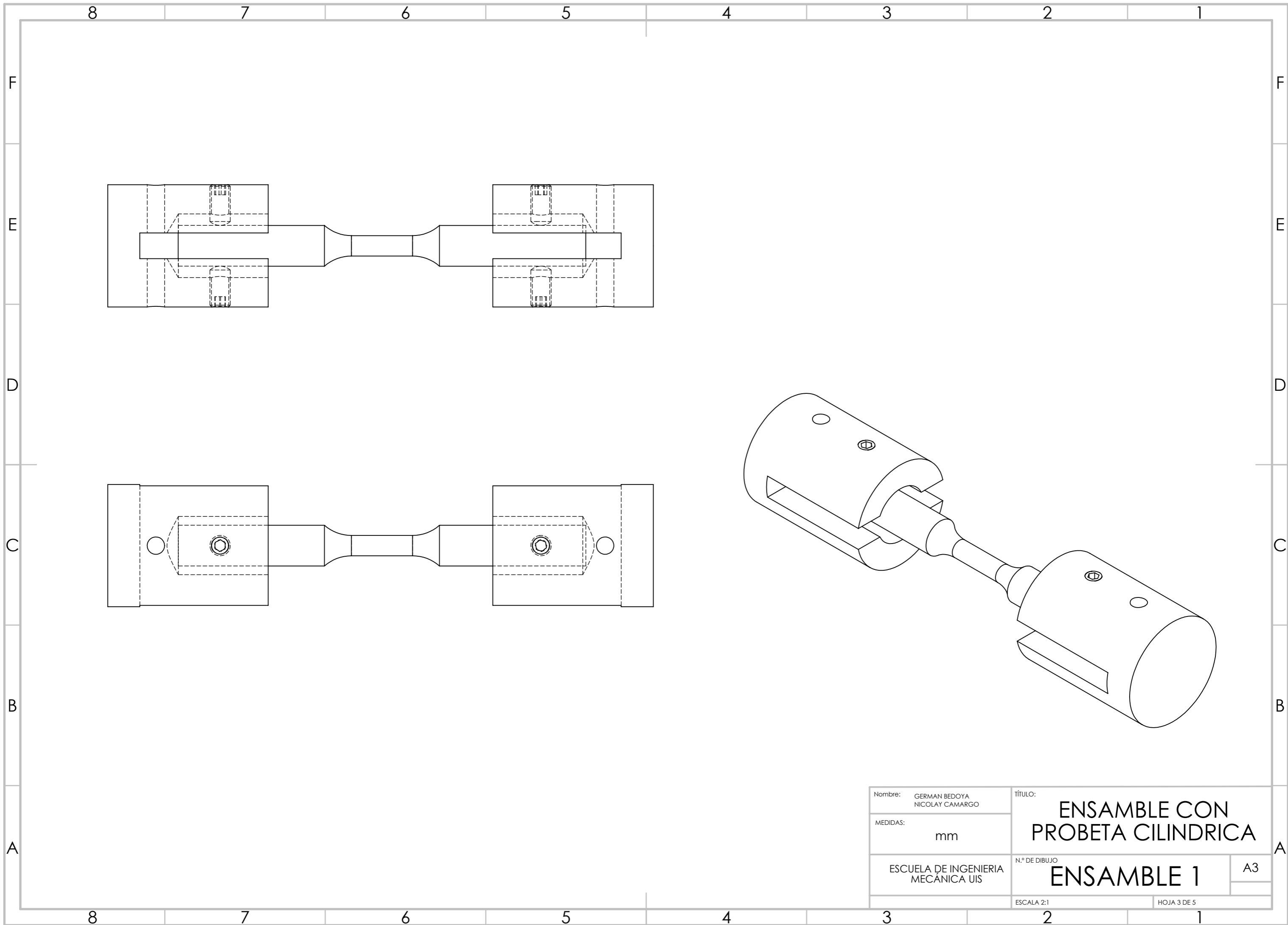
PLANOS SUJETADOR DE PIEZAS DE ENSAYO



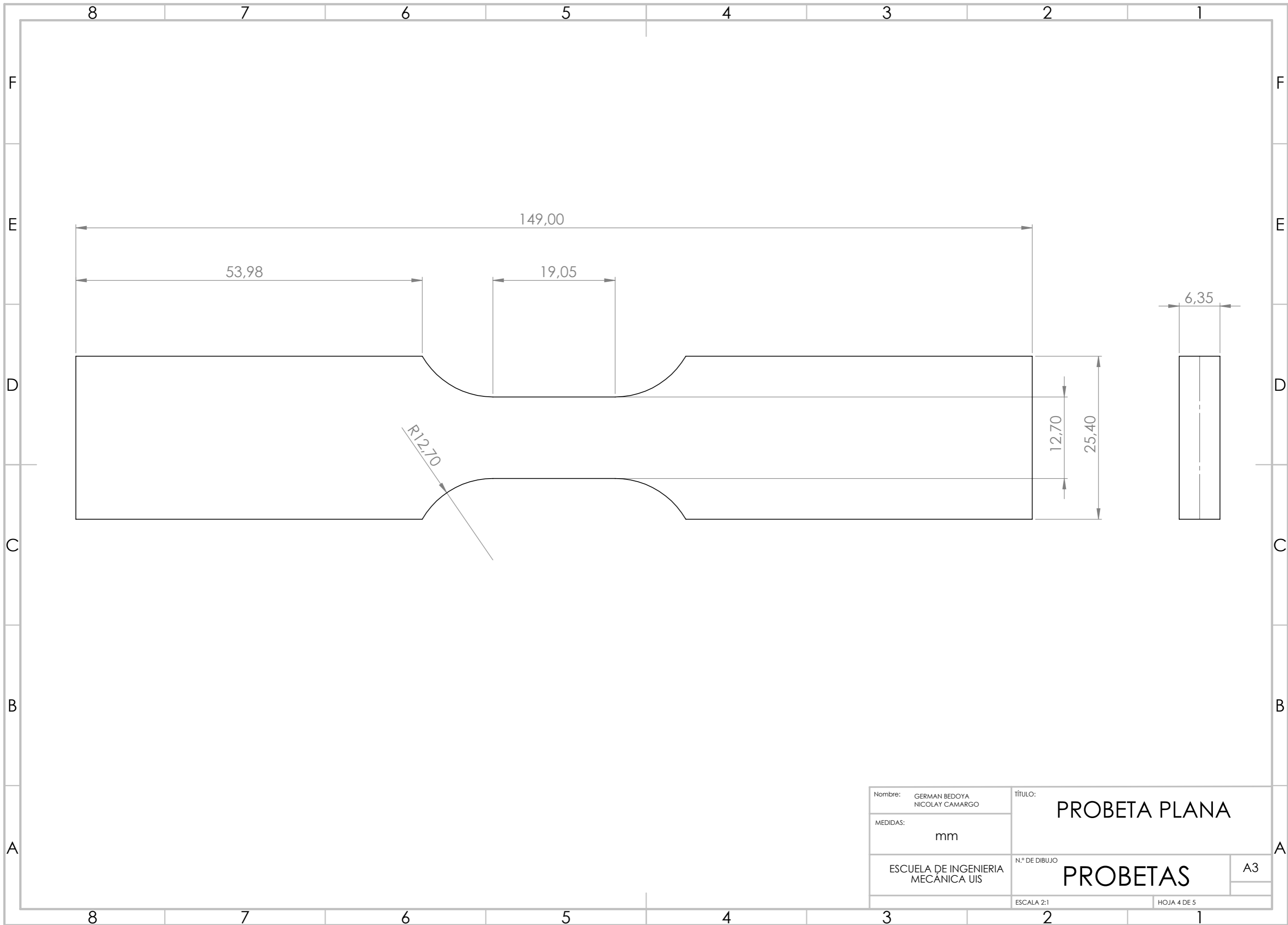
Nombre:	GERMAN BEDOYA NICOLAY CAMARGO	TÍTULO:	ACOPLE PARA LA SUJECIÓN DE PIEZAS	
MEDIDAS:	mm	N.º DE DIBUJO	SUJETADOR	
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA UIS		ESCALA 2:1	HOJA 1 DE 5	A3



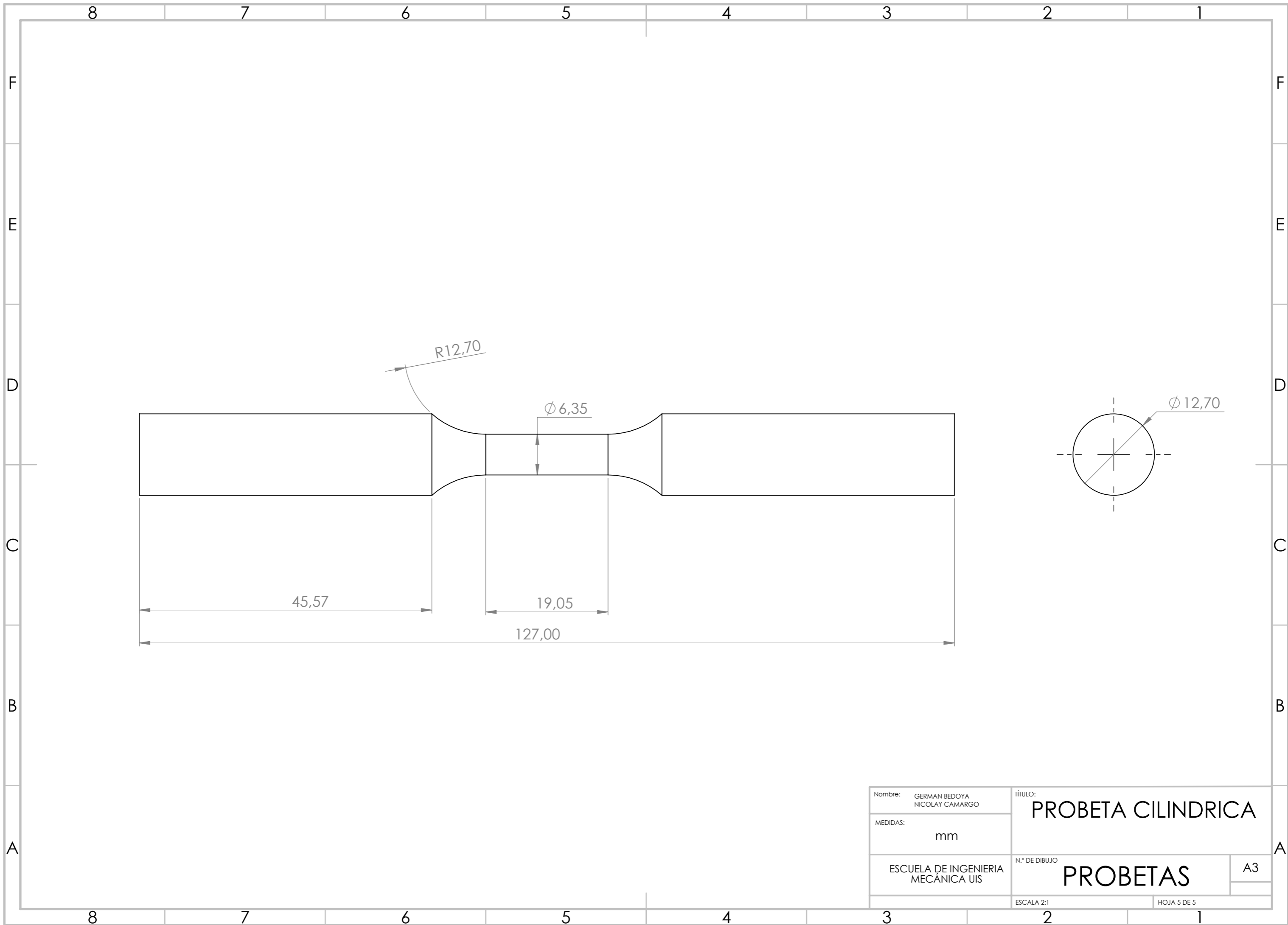
Nombre:	GERMAN BEDOYA NICOLAY CAMARGO	TÍTULO:	ENSAMBLE CON PROBETA PLANA	
MEDIDAS:	mm	N.º DE DIBUJO	ENSAMBLE 1	A3
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA UIS		ESCALA 2:1	HOJA 2 DE 5	



Nombre:	GERMAN BEDOYA NICOLAY CAMARGO	TÍTULO:	ENSAMBLE CON PROBETA CILINDRICA	
MEDIDAS:	mm	N.º DE DIBUJO	ENSAMBLE 1	
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA UIS		ESCALA 2:1	HOJA 3 DE 5	
			A3	



Nombre: GERMAN BEDOYA NICOLAY CAMARGO	TÍTULO: PROBETA PLANA	
MEDIDAS: mm		
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA UIS	N.º DE DIBUJO PROBETAS	A3
	ESCALA 2:1	HOJA 4 DE 5



Nombre:	GERMAN BEDOYA NICOLAY CAMARGO	TÍTULO:		PROBETA CILINDRICA
MEDIDAS:	mm	N.º DE DIBUJO		A3
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA UIS		ESCALA 2:1		HOJA 5 DE 5
		PROBETAS		