



Trabajo Fin de Grado

Estudio del comportamiento mecánico de
espumas de poliestireno

Study of the mechanical behaviour of
polyestyrene foams

Autor/es

María Segura Guillén

Director/es

Ramón Miralbés Buil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2018



**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) _____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo:

Resumen

El objetivo de este trabajo se centra en la caracterización mecánica de diversas espumas de poliestireno (EPS) de alta densidad utilizadas en cascos de protección por sus destacadas cualidades de ligereza y sus altas capacidades de absorber energía frente a impactos.

En el estudio del comportamiento mecánico, se ejecutan diferentes ensayos destructivos para conocer hasta qué nivel de cargas y esfuerzos puede estar sometido sin sufrir deformaciones y roturas.

Para su realización, se ha estudiado la normativa de los métodos de ensayo y se han diseñado diversos sistemas de amarre que permiten realizar ensayos mediante la máquina universal de ensayos INSTRON teniendo en cuenta el proceso de fabricación. Estos amarres permiten ensayar el material frente a ensayos de tracción, compresión, cizalla (mediante dos métodos) y esfuerzos compuestos (tracción y cizalla; compresión y cizalla).

Tras la fabricación de los amarres y probetas, se han realizado los ensayos de tracción y compresión planteados. Al analizar los datos obtenidos en los ensayos y obtenido las curvas de propiedades, se percibe que al aumentar la densidad en las muestras aumenta el módulo de elasticidad en tracción y compresión, y, se observa que las dimensiones de la probeta a ensayar es un factor de elevada importancia en la obtención de los resultados.

Abstract

The objective of this project is the mechanical characterization of different high-density polystyrene foams used in protective helmets. Outstanding for their lightness qualities and their high capacity to absorb energy from impacts.

In the study of the mechanical behaviour, different destructive tests were carried out to know the level of loads and stresses that can be supported by the high-density polystyrene foams without suffering deformations and breakdowns.

For the study implementation, the regulations of the test methods have been studied and considering the manufacturing process various clamp systems that allow testing by the INSTRON universal testing machine have been designed. These clamps allow the material to be tested against tensile, compression, shear tests (by two different methods) and compound stresses (traction and shear, compression and shear).

When the clamps and test pieces were manufactured, the tensile and compression tests have been carried out. After analysing the data obtained in the tests and plotting the properties curves, it is perceived that with the increase of the density in the samples, the modulus of elasticity in tensile and compression increases, and it is observed that the size of the specimen is a factor of high influence in the results.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO Y ALCANCE.....	1
2. CARACTERIZACIÓN	3
2.1 EL POLIESTIRENO (PS).....	3
2.1.1 Historia	3
2.1.2 Estructura y proceso de fabricación.....	3
2.1.3 Tipos de poliestireno.....	4
2.1.4 Métodos de transformación	5
2.2 EL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS).....	8
2.2.1 Obtención del EPS	8
2.2.2 Cualidades y aplicaciones del EPS	9
2.2.3 Impacto ambiental	11
3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS.....	13
3.1 MATERIAL.....	13
3.1.1 Densidad.....	13
3.1.2 Tamaño de grano	13
3.2 EQUIPO	15
3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN	16
3.3.1 Fundamento teórico.....	16
3.3.2 Norma UNE-ISO 1926: 2015	18
3.3.3 Diseño de probetas y amarres	18
3.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN	20
3.4.1 Fundamento teórico.....	20
3.4.2 Norma UNE EN-ISO 844: 2015.....	22
3.4.3 Diseño de probetas y amarres	22
3.5 ENSAYO DE CIZALLADURA O ESFUERZO CORTANTE.....	24
3.5.1 Fundamento teórico.....	24

3.5.2	Diseño de probetas y utilajes	25
3.6	ENSAYO MIXTO.....	27
4.	RESULTADOS	29
4.1	ENSAYO DE TRACCIÓN	29
4.2	ENSAYO DE COMPRESIÓN	32
5.	CONCLUSIONES	34
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	35
7.	ANEXOS.....	37
7.1	ANEXO I: Planos de amarres de los ensayos planteados	37

Índice de figuras

Figura 1. Unidad repetitiva de estireno conformando el poliestireno [2].....	4
Figura 2. Estructuras del poliestireno sindioatáctico y atáctico [5].	5
Figura 3. Esquema del moldeo por inyección [6].....	6
Figura 4. Esquema del moldeo por extrusión [6].....	6
Figura 5. Esquema del moldeo por extrusión – soplado [6].....	7
Figura 6. Etapas del moldeo por extrusión – soplado [6].....	7
Figura 7. Esquema de transformación del EPS [7]	8
Figura 8. Evolución de los gránulos de EPS en cada etapa de transformación.	9
Figura 9. Estructura de un casco de poliestireno expandido	11
Figura 10. Código de identificación del poliestireno (PS).....	11
Figura 11. Procedimientos de reciclado mecánico de EPS [7]	12
Figura 12. Estructura de las muestras de EPS de 60, 75, 80, 100 y 120 kg/m ³	14
Figura 13. Esquema del ensayo de tracción.....	16
Figura 14. Diagrama tensión – deformación materiales frágiles.....	16
Figura 15. Probeta para el ensayo de tracción	19
Figura 16. Amarre del ensayo de tracción.	19
Figura 17. Esquema del ensayo de compresión.....	20
Figura 18. Diagrama tensión – deformación en el esfuerzo de compresión [14]	22
Figura 19. Probetas para el ensayo de compresión	23
Figura 20. Amarre ensayo de compresión.	23
Figura 21. Esquema del ensayo de cizallamiento	24
Figura 22. Ensayo de corte doble.....	24
Figura 23. Dimensiones de la probeta para el modelo de utilaje 1 de cizalladura	25
Figura 24. Modelo de utilaje 1 para ensayo de cizalladura	26
Figura 25. Dimensiones de la probeta para el modelo de utilaje 2 de cizalladura	26
Figura 26. Modelo de utilaje 2 para ensayo de cizalladura	27
Figura 27. Elementos del utilaje para ensayo combinado	28
Figura 28. Utilaje para ensayo combinado.....	28
Figura 29. Modelo 1 de probetas en densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m ³ tras el ensayo de tracción.....	29
Figura 30. Diagrama tensión – deformación obtenido mediante el ensayo de tracción del modelo de probeta 1 en densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m ³	29

Figura 31. Modelo 2 de probetas en densidades de 60, 80 y 100 kg/m ³ tras el ensayo de tracción.....	30
Figura 32. Diagrama tensión – deformación obtenido mediante el ensayo de tracción del modelo de probeta 2 en densidades de 60 y 100 kg/m ³	30
Figura 33. Probeta de densidad 75 kg/m ³ tras el ensayo de compresión	32
Figura 34. Relación entre la tensión de compresión y la deformación del EPS.....	32
Figura 35. Relación entre la tensión de compresión y la deformación del EPS al 10%	32
Figura 36. Efecto de la densidad sobre los módulos de elasticidad y tensiones de rotura.....	33

Índice de tablas

Tabla 1. Características de las espumas.....	13
Tabla 2. Tamaño de grano de las muestras (mm).....	14
Tabla 3. Características de la máquina de ensayos INSTRON 8032	15
Tabla 4. Dimensiones de las probetas para tracción.	19
Tabla 5. Dimensiones de las probetas del ensayo de compresión.....	23
Tabla 6. Datos obtenidos mediante el ensayo mecánico de tracción en el modelo de probeta 1.	
.....	31
Tabla 7. Datos obtenidos mediante el ensayo mecánico de tracción en el modelo de probeta 2.	
.....	31
Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de compresión del EPS.....	33

Lista de símbolos

- σ_t : Esfuerzo a tracción [N/mm²]
 $\sigma_{máx}$: tensión máxima [N/mm²]
 σ_R : tensión de rotura [N/mm²]
 F : fuerza [N]
 $F_{máx}$: fuerza máxima [N]
 F_R : Fuerza de rotura [N]
 A_o : superficie inicial [mm²]
 A_f : superficie final [mm²]
 E_t : módulo de elasticidad o módulo de Young [N/mm²]
 ε_y : deformación en el límite elástico
 $\varepsilon_{máx}$: deformación en la tensión máxima
 ε_R : deformación en el límite de rotura
 L_o : Longitud inicial [mm]
 L_f : Longitud final [mm]
 μ : coeficiente de poisson
 σ_m : esfuerzo de compresión [N/mm²]
 σ_y : tensión límite de fluencia[N/mm²]
 ε_m : deformación relativa
 h_l : altura final [mm]
 h_o : altura inicial [mm]
 E_i : módulo de elasticidad en compresión [N/mm²]
 E_p : módulo de plasticidad [N/mm²]
 $\sigma_{10\%}$: tensión de compresión al 10% de deformación [N/mm²]
 τ : esfuerzo cortante [N/mm²]
 τ_R : tensión de rotura [N/mm²]
 G : módulo de elasticidad transversal [N/mm²]

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, las espumas de poliestireno son unos materiales utilizados en una amplia variedad de sectores. Los principales campos de aplicación son el de la construcción y el del envase y embalaje, por sus excelentes cualidades como absorbedor de energía y sus propiedades de aislamiento térmico, ligereza, larga vida útil, resistencia mecánica y versatilidad para adaptarse sin dificultad a las necesidades requeridas. Las espumas de poliestireno ofrecen una cantidad ilimitada de aplicaciones que hace que abarque todos los sectores de la vida humana.

Debido a su destacada cualidad para absorber impactos, es un material muy utilizado en la fabricación de productos ligeros de alta protección como son los cascos protectores de ciclistas y motoristas.

A la hora de elegir un material para cumplir una función determinada, es imprescindible conocer las propiedades físicas y técnicas que tiene. Para ello es necesario conocer hasta qué nivel de cargas y esfuerzos puede estar sometido sin sufrir deformaciones y roturas.

1.1 OBJETIVO Y ALCANCE

El presente trabajo tiene como finalidad la realización de un estudio del comportamiento mecánico de diversas espumas de poliestireno de elevadas densidades (más de 60 kg/m³) utilizadas para absorber energía en aplicaciones como cascos de protección. El desarrollo del trabajo se realiza con la colaboración del departamento de ingeniería de diseño de fabricación (área de expresión gráfica en ingeniería) y el laboratorio de ingeniería mecánica.

La caracterización mecánica de las espumas se va a realizar mediante una serie de ensayos destructivos en diversas probetas de diferentes densidades. Se van a plantear ensayos de tracción, compresión, mixtos y de cizalladura.

Para alcanzar el propósito final del trabajo, la metodología de ha basado inicialmente en el estudio de la normativa de los ensayos acorde al tipo de material a estudiar. Posteriormente, en el diseño de amarres y probetas para su posterior mecanizado en el taller y, finalmente, la

realización de alguno de los ensayos planteados y el análisis de los datos obtenidos para obtener resultados y conclusiones.

Se definieron los siguientes objetivos para alcanzar este propósito final:

- Estudio del material a ensayar y **del estado del arte y de la normativa** de los métodos de ensayo tanto genérico como específico de las espumas.
- A partir de los acoplos de dos tipos de máquinas de ensayo tipo INSTRON, se realiza el **diseño de diversos tipos de mordazas y amarres** que permiten realizar los ensayos planteados, teniendo en cuenta el proceso de fabricación. Estos amarres permiten ensayar este tipo de materiales frente a tracción, compresión, cizalla (mediante distintos métodos) y esfuerzos compuestos (tracción y cizalla; compresión y cizalla).
- **Diseño y mecanizado de múltiples probetas** de espumas de poliestireno de distintas densidades para la realización de los ensayos.
- **Realización de los ensayos de tracción y compresión** planteados.
- **Análisis de los datos** obtenidos en los ensayos y **obtención de las curvas de propiedades mecánicas características**.
- **Análisis de los resultados** y obtención de conclusiones.

2. CARACTERIZACIÓN

2.1 EL POLIESTIRENO (PS)

2.1.1 Historia

El descubrimiento del poliestireno se le atribuye a un boticario alemán llamado Eduard Simon en el año 1839. Simon aisló la sustancia de una resina natural, sin saber lo que acababa de descubrir [1].

No fue hasta el año 1922, cuando el químico orgánico Hermann Staudinger revisó el descubrimiento anterior y se percató de que comprendía un compuesto de largas cadenas de moléculas de estireno y que se trataba de un polímero plástico. Staudinger publicó sus teorías sobre polímeros declarando que los cauchos naturales estaban formados por cadenas repetitivas de monómeros dando su elasticidad al material e indicó que los materiales fabricados por el tratamiento térmico del estireno eran similares al caucho. A pesar de causar una gran controversia y rechazo en la comunidad científica de la época, fue recompensado por su trabajo ganando el Premio Nobel de Química en 1953 [1].

Posteriormente en el 1930, la empresa alemana BASF desarrolló una forma de fabricar comercialmente poliestireno en forma de gránulos. En 1937, la compañía Dow Chemical introdujo productos de poliestireno en el mercado estadounidense [1].

A finales de los 50, bajo la iniciativa del DR. Fritz Stastny, la firma BASF desarrolla e inicia la producción del poliestireno expandible [1].

2.1.2 Estructura y proceso de fabricación

El poliestireno es un plástico que se produce a través de un proceso denominado polimerización, que consiste en la unión de muchas moléculas pequeñas para lograr moléculas

de elevado tamaño. La sustancia obtenida es un polímero y los compuestos sencillos de los que se obtienen se denominan monómeros [2].

Estructuralmente, es una larga cadena de carbono e hidrógeno, con un grupo fenilo unido cada dos átomos de carbono distribuido a un lado u otro de la cadena central, sin ningún orden en particular (Figura 1). Por ello se trata de un polímero completamente amorfico, no cristalino. El monómero utilizado para su obtención es el estireno (vinilbenceno): C₆H₅ – CH = CH₂ [2].

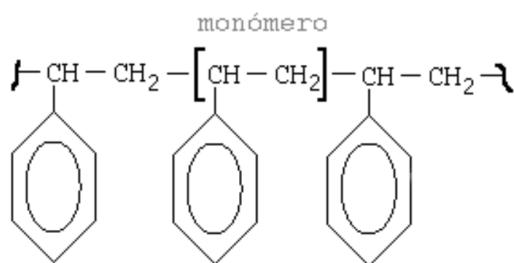


Figura 1. Unidad repetitiva de estireno conformando el poliestireno [2]

En los polímeros termoplásticos, las fuerzas intermoleculares son muy débiles y al calentar las cadenas pueden moverse unas respecto a otras y el polímero puede moldearse. Cuando se enfria, vuelven a establecerse las fuerzas intermoleculares entre átomos diferentes, cambiándose la ordenación de las cadenas. Generalmente, el poliestireno presenta elasticidad, cierta resistencia al ataque químico, alta resistencia mecánica, térmica, eléctrica y baja densidad [3].

Para su obtención, se calienta el etilbenceno en presencia de un catalizador para obtener el estireno. Una pequeña cantidad de un iniciador es necesaria para la polimerización del estireno, entre los que se encuentran los peróxidos, que opera rompiéndose para generar un radical libre. Este se une a una molécula de monómero, formando así otro radical libre más grande, que a su vez se une a otra molécula de monómero y así sucesivamente. Finalmente se termina la cadena por reacciones tales como la unión de dos radicales, las cuales consumen, pero no generan radicales [2].

2.1.3 Tipos de poliestireno

Se puede diferenciar entre cuatro tipos principales de poliestireno [4]:

- **PS cristal** (GPPS, General Purpose Polystyrene), es totalmente transparente, duro y quebradizo. Se obtiene de la polimerización del poliestireno puro.
- **Poliestireno de alto impacto o de choque** (HIPS, High Impact Polystyrene), más resistente, no quebradizo y opaco. Se obtiene de la polimerización del estireno con un elastómero, generalmente con caucho butadieno como modificador de impacto, confiriendo buen rendimiento ante impactos, pero perdiendo transparencia.
- **Poliestireno expandido** (EPS, Expanded Polystyrene), muy ligero. Es creado mediante un 95% en peso de poliestireno y 5% de un gas, este gas hace que se formen burbujas que reducen la densidad del material.
- **Poliestireno extrusionado** (XPS, Extruded Polystyrene), una espuma rígida obtenida de la inyección de gas en poliestireno cristal, es muy similar al expandido, pero más denso e impermeable.

En las últimas décadas se ha descubierto otro tipo de poliestireno llamado poliestireno sindiotáctico. En este tipo, los grupos fenilos de la cadena polimérica están unidos alternativamente a ambos lados de esta, a diferencia de los otros tipos que no tienen ningún orden en particular (Figura 2). El poliestireno sindiotáctico es cristalino y se funde a 270°C. Es costoso y sólo se utiliza en aplicaciones de mayor valor [5].

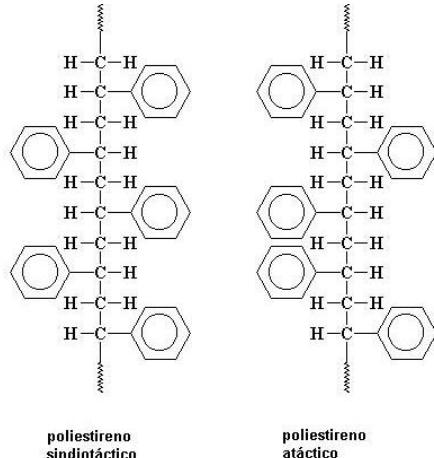


Figura 2. Estructuras del poliestireno sindioatáctico y atáctico [5].

2.1.4 Métodos de transformación

Los métodos más utilizados en la transformación de poliestireno en productos acabados son:

- **Moldeo por inyección:** el polímero en forma de gránulos es alimentado a través de una tolva a una máquina de inyección y mediante un émbolo es arrastrado a un compartimento donde se calienta hasta su fusión. Mediante el movimiento del émbolo y

por medio de un pistón se desemboca a través de una boquilla en el molde cerrado (Figura 3) [6].

Ventajas: reducidos costes de mano de obra, buenos acabados superficiales, facilidad de automatización, altas velocidades de producción y formas complicadas.

Desventajas: altos costes de maquinaria, riguroso control de proceso.

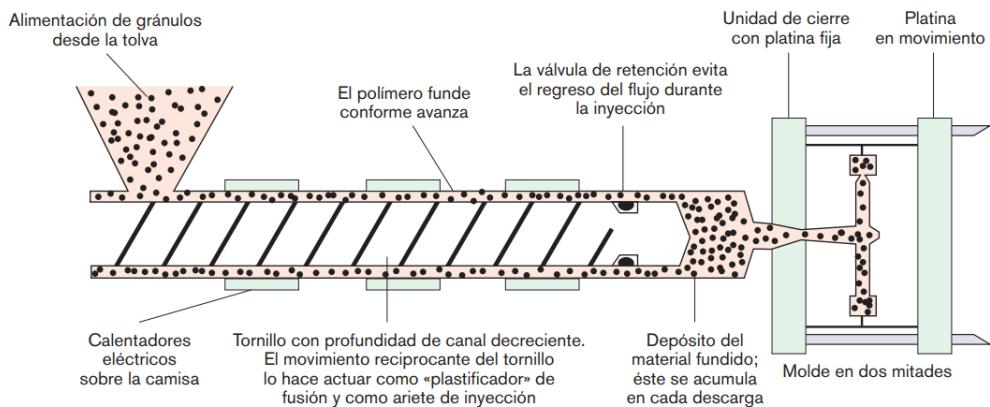


Figura 3. Esquema del moldeo por inyección [6].

- **Moldeo por extrusión:** El polímero granuloso es cargado a través de la tolva en la máquina de extrusión y entra a una cámara cilíndrica donde es compactado, fundido e impulsado por un tornillo sin fin cuando ya se encuentra en estado de fluido viscoso. El tornillo fuerza a pasar la masa a través de un orificio con diferentes formas (Figura 4) [6].

Se obtienen piezas de larga longitud con secciones transversales constantes como tubos, barras, varillas, láminas y filamentos.

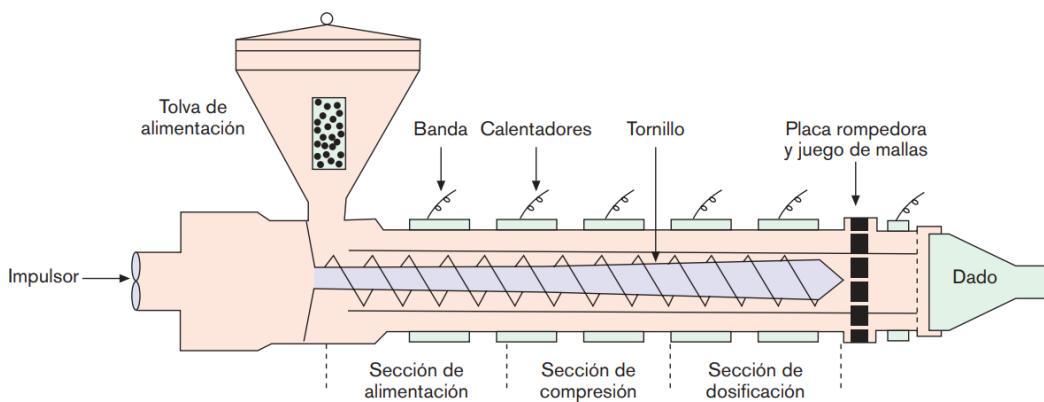


Figura 4. Esquema del moldeo por extrusión [6].

- **Moldeo por soplado y termoconformado:** se sitúa un cilindro o un tubo de plástico, procedente de la extrusora, a elevada temperatura entre las mordazas de un molde (Figuras 5 y 6). Se cierra el molde y se insufla aire comprimido o vapor de agua a presión para forzar el material contra las paredes del molde y que adhiera su forma. En el caso del termoconformado, se fuerza una lámina de plástico previamente calentada contra las paredes del molde por presión, aire comprimido o vacío [6].

Estos tipos de moldeo se utilizan para la producción de botellas y otros contenedores que son fundamentalmente formas huecas simples.

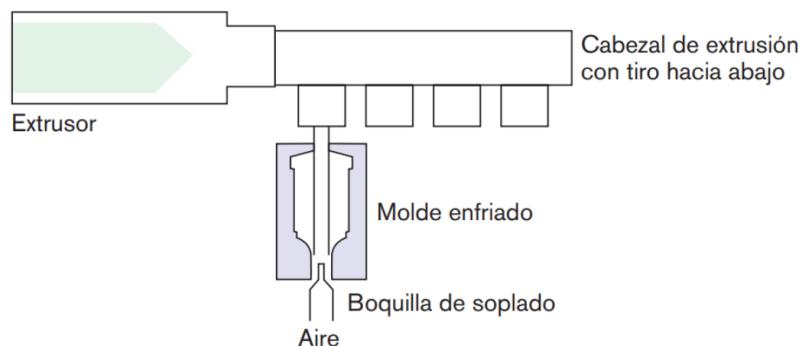


Figura 5. Esquema del moldeo por extrusión – soplado [6].

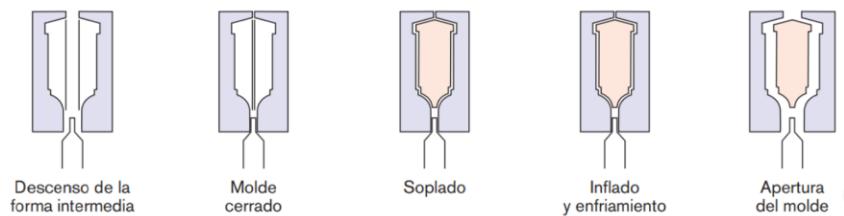


Figura 6. Etapas del moldeo por extrusión – soplado [6].

2.2 EL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

El trabajo se va a centrar en la caracterización mecánica de espumas de poliestireno o poliestireno expandido (EPS) de alta densidad.

2.2.1 Obtención del EPS

Como ya se ha nombrado anteriormente, el poliestireno expandible es un derivado del poliestireno que se utiliza para la fabricación de productos de poliestireno expandido. Se trata de un hidrocarburo de cadena larga formado por un 95% de poliestireno y un 5% de gas pentano que actúa como agente de expansión.

Su proceso de transformación para elaborar los productos acabados transcurre en tres etapas: una etapa de pre-expansión, seguida de una de reposo intermedio y estabilización, finalizando con una de expansión y moldeo final (Figura 7 y 8) [7]:

- Pre-expansión:** el poliestireno expandible granulado se calienta con vapor de agua a temperaturas entre 80 y 110°C, provocando la dilatación del pentano y la pre-expansión de las perlas, haciendo que el volumen aumente hasta 50 veces el volumen original. Durante esta etapa los granos son agitados continuamente. La densidad final del EPS es determinada en función de la temperatura y del tiempo de exposición. Después de la pre-expansión, los granos son enfriados y secados [7].
- Reposo intermedio y estabilización:** los granos pre-expandidos son estabilizados durante varias horas. Al enfriarse las partículas recién expandidas se crea un vacío interior que es preciso compensar con la penetración de aire por difusión. De este modo las perlas alcanzan una mayor estabilidad mecánica y mejoran su capacidad de expansión. Simultáneamente

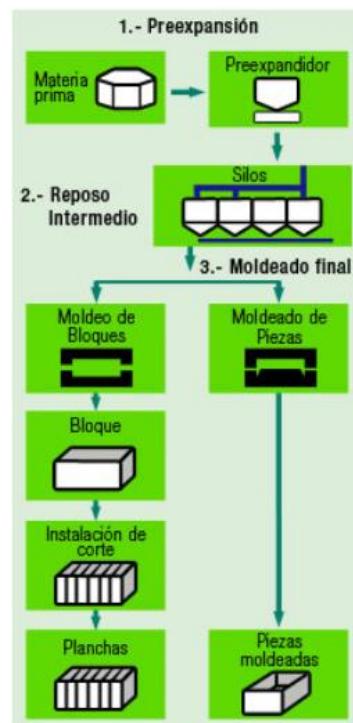


Figura 7. Esquema de transformación del EPS [7].

se libera la humedad mejorándose el transporte de las perlas y facilitando el llenado de los moldes y se elimina el exceso de agente de expansión por difusión [7].

3. **Expansión y moldeo final:** las perlas pre-expandidas y estabilizadas se transportan a unos moldes donde nuevamente se les inyecta vapor de agua produciéndose una segunda expansión y la soldadura de las perlas entre sí. De esta forma se pueden obtener grandes bloques (que posteriormente se cortan en las formas deseadas como planchas, moldes, cilindros, etc.), o productos conformados con su acabado definitivo [7].

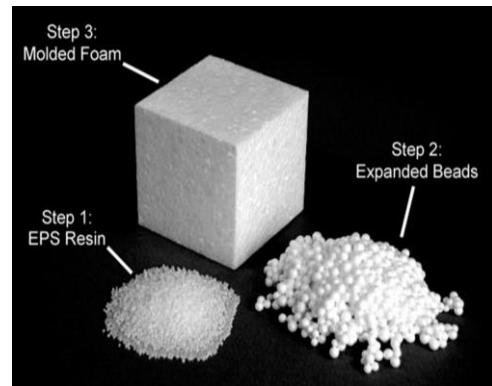


Figura 8. Evolución de los gránulos de EPS en cada etapa de transformación.

2.2.2 Cualidades y aplicaciones del EPS

Las principales cualidades que otorga la particular composición del poliestireno expandido son [7]:

- **Ligereza:** debido a su baja densidad se caracteriza por un material extremadamente ligero pero resistente.
- **Amortiguador de impactos:** presenta un elevado índice de absorción de energía en caso de caída o impacto.
- **Resistencia mecánica:** a pesar de ser ligero tiene una alta resistencia mecánica y resistencia a la compresión pudiendo soportar elevadas cargas. Este factor varía respecto a la densidad.
- **Aislamiento térmico y acústico:** a causa de su estructura de células cerradas y llenas de aire que dificultan el paso del calor o del frío muestra una alta capacidad de aislamiento térmico. Este factor varía respecto a la densidad.
- **Resistente a la humedad y baja absorción de agua:** no se trata de un material higroscópico, es decir, que no atrae las moléculas de agua. Sumergiendo el material en agua, sus niveles

de absorción oscilan entre el 1 y 3%. En el caso del vapor de agua, sí que puede difundirse en la estructura celular del EPS.

- **Estabilidad frente a la temperatura y los factores atmosféricos:** su límite de temperaturas de uso se sitúa en 100°C para actividades de corta duración y en 80°C de larga duración. No presenta limitaciones inferiores que modifiquen sus propiedades (excepto las dimensiones por compresión). Se vuelve frágil y amarillento bajo la acción prolongada de la luz ultravioleta. Puede evitarse mediante pinturas, revestimientos y recubrimientos.
- **Propiedades biológicas:** material inocuo, no se pudre, no se enmohece, no se descompone. No tiene una influencia medioambiental perjudicial ni es perjudicial para las aguas.
- **Versatilidad y facilidad de conformado:** puede presentarse en formas y tamaños muy variados según las necesidades requeridas.
- **Resistencia al envejecimiento:** todas las propiedades se mantienen durante la vida útil del material.
- **Facilidad de manipulación e instalación.**

El poliestireno expandido es un material que debido a sus características y propiedades es destinado a un campo muy amplio de aplicaciones. Las principales son las relacionadas con la resistencia mecánica y el aislamiento térmico.

Las aplicaciones pueden agruparse en tres grandes campos:

- **Como material de envase y embalaje:** para todo tipo de productos durante su distribución y transporte, por la capacidad de mantener la temperatura e higiene, la amortiguación de impactos y su versatilidad de formas. Envases y embalajes en alimentación, electrónica, juguetes, farmacia y cosmética, horticultura y jardinería y en bricolaje y construcción.
- **Como material de construcción:** sus aplicaciones están relacionadas con características como el aislamiento térmico y acústico. Aislamiento de fachadas, suelos y cubiertas y en múltiples aplicaciones de obra civil.

- **Aplicaciones diversas:** el EPS ofrece una cantidad ilimitada de aplicaciones que hace que abarque todos los sectores de la vida humana. Sus características, sobre todo las de las espumas de alta densidad, permiten la realización de productos ligeros de alta protección como son los **cascos protectores** de ciclistas y motoristas (Figura 9).

La energía del impacto es absorbida y convertida en forma de calor cuando se comprime la estructura rígida de la espuma hasta su grueso mínimo. Cuando las paredes celulares son aplastadas, no rebotan en la parte inferior empeorando el impacto, pero cuando alcanzan su límite de aplastamiento, pasan el resto de la energía del impacto directamente a la cabeza.

Uno de los parámetros de diseño de los cascos es la especificación de la densidad de la espuma. Las de alta densidad soportan impactos más duros y las de baja densidad hacen que el golpe sea más suave, pero con la posibilidad de que no llegue a absorber toda la energía si el golpe es fuerte y así transmitirlo a la cabeza.

El casco debe ser reemplazado después de un solo impacto, puesto que, al aplastarse las paredes celulares de la espuma, éstas ya no vuelven a absorber los impactos de igual manera. Las espumas pueden recuperar su grosor a lo largo de varias horas, pero no su capacidad de absorber los impactos [18].



Figura 9. Estructura de un casco de poliestireno expandido

2.2.3 Impacto ambiental

El código con el que se identifica si el material está fabricado con poliestireno es el número 6 contenido dentro de un símbolo triangular de tres flechas sucesivas y las siglas PS (Figura 10). El símbolo indica que el tipo de plástico puede ser reciclado para obtener nuevos productos.



El EPS no daña la capa de ozono al no utilizar en sus procesos de fabricación gases de la familia de los CFCs, HCFCs,

Figura 10. Código de identificación del poliestireno (PS).

ni ningún otro compuesto organoclorado. Además, su proceso de transformación consume poca energía y no genera residuos. Por ser insoluble en el agua, el EPS no emite sustancias hidrosolubles que puedan contaminar las aguas subterráneas [7].

Los residuos Sólidos Urbanos de EPS producidos en España representan una parte muy pequeña (0,1%). Su incidencia en el conjunto de los residuos que genera nuestra sociedad es mínima [7].

A pesar de que su fabricación y utilización no supone un riesgo para las personas ni para el medio ambiente, el poliestireno expandido puede tardar más de 1000 años en degradarse. Al tratarse de un plástico muy ligero y voluminoso, una mala gestión del residuo a nivel industrial/municipal provoca importantes costes logísticos y altas tasas de vertedero a quienes lo generan. Al reciclarlo se evitan estos elevados costes [7].

El EPS es 100% recicitable y existen numerosas aplicaciones para los materiales recuperados. En la Figura 11 se pueden observar los procedimientos de reciclado mecánico de EPS [7].

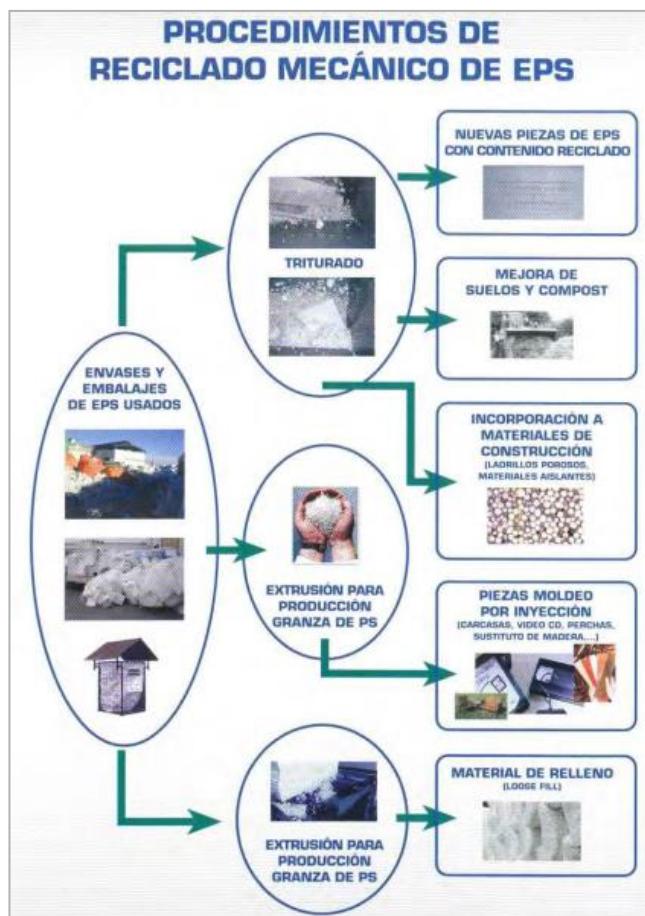


Figura 11. Procedimientos de reciclado mecánico de EPS [7].

3. METODOLOGÍA DE ENSAYOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Densidad

Se analizan cinco tipos de espumas de poliestireno (EPS) de alta densidad. En la tabla 1 muestra las diversas densidades comerciales y las densidades reales obtenidas mediante pesado de diversas muestras de poliestireno expandido que han sido previamente moldeadas mediante inyección.

Tabla 1. Características de las espumas.

Muestras	Densidad Comercial (kg/m ³)	Dimensiones (mm)	Peso (gr)	Densidad Real (kg/m ³)
EPS 60	60	100x100x26	16,7	64,79
EPS 75	75	d90xh29	13,3	73,10
EPS 80	80	100x100x26	20,8	80,69
EPS 100	100	100x100x26	26	100,87
EPS 120	120	100x100x26	31,7	122,98

3.1.2 Tamaño de grano

Los granos en un bloque de menor densidad que otro, tendrán mayor tamaño de grano ya que existe mayor volumen de aire en el interior de sus celdas. Este tamaño, dependerá de la temperatura y el tiempo que se ha utilizado en la fusión en los procesos de pre-expansión y expansión [16].

En la figura 12 se aprecia la estructura característica del poliestireno expandido. En ellas se puede observar los diversos tamaños de grano de las diferentes densidades.

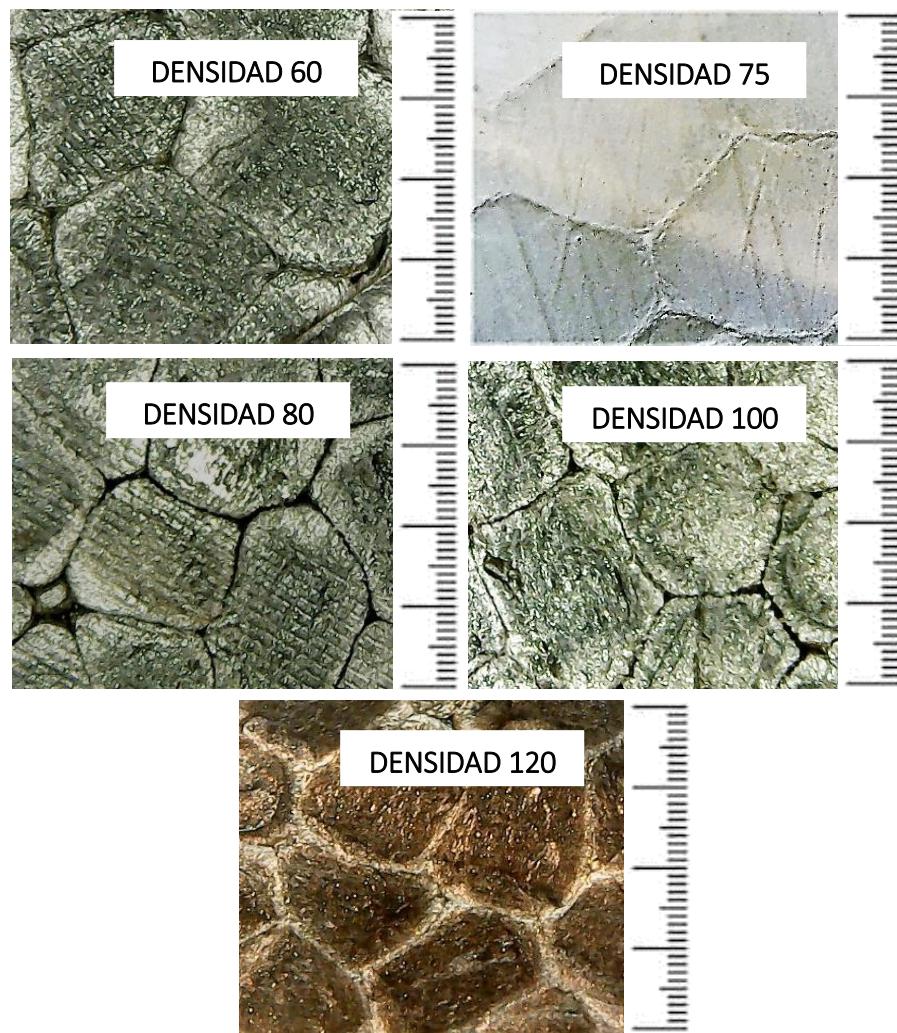


Figura 12. Estructura de las muestras de EPS de 60, 75, 80, 100 y 120 kg/m³

El EPS presenta estructura de poro cerrado poco uniforme, constituido por esferas expandidas no homogéneas, en cuyo interior se aprecia la estructura celular poligonal. Las zonas externas están compactas con pequeños tamaños de poro, y las internas, presentan celdas de mayor tamaño y menor densidad [16]. En la tabla 2 se observan los valores del tamaño de grano promedio de las muestras medidas mediante un microscopio digital.

Tabla 2. Tamaño de grano de las muestras (mm).

Muestras	EPS 60	EPS 75	EPS 80	EPS 100	EPS 120
Tamaño de grano (mm)	2,53	3,14	2,15	1,95	1,55

3.2 EQUIPO

Se han diseñado amarres para dos tipos de máquinas universales, la máquina de ensayos INSTRON 8032 y la Máquina de prueba uniaxial INSTRON con video extensómetro 5548. En la siguiente tabla se detallan las características de la máquina con la que se han realizado los ensayos, la INSTRON 8032:

Tabla 3. Características de la máquina de ensayos INSTRON 8032

Tipo	INSTRON 8032
Capacidad de carga	100 kN ensayo dinámico 100 kN ensayo estático
Frecuencia máxima	15 Hz
Equipo auxiliar	<ul style="list-style-type: none"> - Mordazas hidráulicas tracción-compresión hasta 200 bar. - Mordazas manuales para ensayos estáticos. - Utilaje para ensayos de flexión de tres y cuatro puntos - Utilaje Klevis. - Utilaje para ensayos de pandeo lateral de sándwiches. - Utilaje ITRI, Celanese, Flatwise y Edgewise para ensayos de compresión. - Utilaje para ensayos de paneles sándwich. - Célula de carga de hasta 5 kN. - Utilaje para ensayo de cortadura de sandwiches y espumas rígidas. - Platos para ensayos de crash. - Ordenador de control: HP 9000/300 procesador MC86010, disco duro de 40 Mb, tarjetas HP 98624, HP 98644 e interfaces HPIB - RS 232. - Impresora HP Think Jet. - Ordenador compatible Multitech 386 (25 MHz) con tarjeta de adquisición de datos. - Equipo informatizado de extensometría con capacidad para 300 canales.

3.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

3.3.1 Fundamento teórico

El ensayo de tracción consiste en estirar una probeta de sección uniforme y conocida desde sus extremos en dirección axial hasta producir su rotura (Figura 13) registrando continuamente la carga aplicada y la deformación producida. Los parámetros básicos a determinar son el módulo de elasticidad, la resistencia y el alargamiento a rotura.

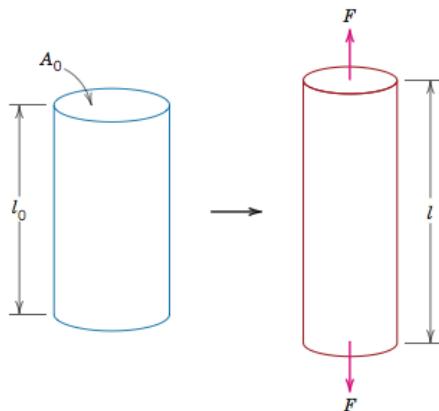


Figura 13. Esquema del ensayo de tracción.

Con el diagrama tensión deformación se observa simultáneamente la carga y el alargamiento producido en la probeta. En las ordenadas se representa las fuerzas o cargas y en las abscisas los alargamientos o deformaciones.

El poliestireno expandido es un material resistente y poco dúctil, en estos materiales la tensión máxima es la misma que la de rotura y la deformación unitaria en el punto de fractura es mucho menor que en los materiales dúctiles. La fractura se presenta en una superficie perpendicular a la carga. En los materiales frágiles como el poliestireno expandido prácticamente solo existe zona elástica (figura 14).

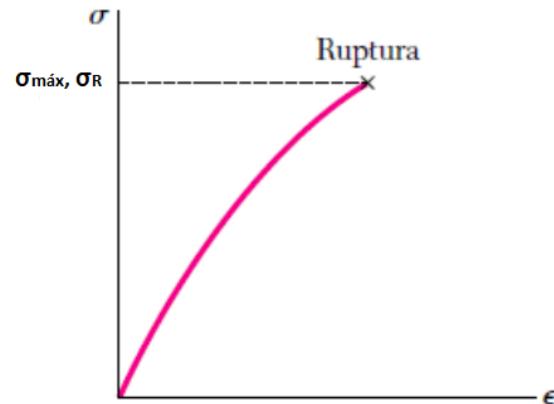


Figura 14. Diagrama tensión – deformación de materiales frágiles.

Las principales propiedades mecánicas que se determinan con el ensayo de tracción en el EPS son:

- **Tensión de tracción ingenieril (σ_t):** se calcula a partir de la fuerza de tracción sometida por la probeta dividida por su sección transversal. Generalmente se calcula la tensión máxima a la que es sometida la probeta ($\sigma_{máx}$) y la tensión de rotura (σ_R). Para los materiales frágiles no existe diferencia entre estas dos tensiones.

$$\sigma = F / Ao$$

- **Límite de proporcionalidad:** valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada [9].
- **Límite de elasticidad o límite elástico:** Es la máxima tensión aplicable sin que se produzcan deformaciones permanentes en el material, a partir de él, el material no recupera totalmente su forma al ser descargado, sino que queda con una deformación residual llamada deformación permanente. Entre el límite de proporcionalidad y el de elasticidad el diagrama no tiene forma de recta perfecta, aunque el material sea elástico [9].
- **Módulo de elasticidad o módulo de Young (Et):** es un valor constante que indica la capacidad de resistencia a la deformación. Se obtiene mediante la relación entre la tensión realizada y la deformación adquirida en el tramo lineal de la curva tensión-deformación (región elástica).

$$Et = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

- **Deformación unitaria ingenieril (ε):** indica la ductilidad del material, es decir, la capacidad que tiene el material para deformarse antes de llegar al punto de ruptura de este [8]. Generalmente se calculan tres deformaciones: deformación en el límite elástico (ε_y), deformación al esfuerzo máximo (ε_m) y deformación a la rotura (ε_R).

$$\% \varepsilon = ((L_f - L_o) / L_o) * 100$$

- **Porcentaje de reducción de área:** la ductilidad también puede expresarse en términos de reducción de área que sufre el material durante la prueba [8].

$$\% A = ((A_f - A_o) / A_o) * 100$$

3.3.2 Norma UNE-ISO 1926: 2015

La normativa buscada se ha centrado en la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). La norma UNE-ISO 1926: 2015 [10] es idéntica a la Norma Internacional ISO 1926:2009.

La norma se aplica a materiales plásticos celulares que poseen una resistencia a la compresión suficiente como para permitir una sujeción adecuada de las probetas a las mordazas, de tal modo que no causen desgarros, deformaciones o roturas de los extremos. La relación entre el tamaño de celda y el tamaño de tal forma que el ensayo sea realista.

Las probetas deben acondicionarse durante un mínimo de 6h a (23 5) °C y (50 10) % de humedad relativa. El ensayo debe llevarse a cabo sobre, al menos, cinco probetas.

En el caso de necesitar adhesivo para fijar las probetas a los amarres, debe ser tal que la resistencia a la cizalla de la película adhesiva sea mayor que la del material celular a ensayar. El alargamiento de la película debe de ser despreciable en la determinación del alargamiento de la probeta.

En el procedimiento operatorio, se aplica la fuerza a ejercer sobre la probeta de tal manera que se distribuya uniformemente mediante una mordaza móvil. La velocidad de desplazamiento de ésta debe ser de 5 mm/min - 1 mm/min.

3.3.3 Diseño de probetas y amarres

La fabricación de las probetas se ha basado en la norma UNE-EN ISO 20753 [11]. Se preparan dos modelos de probetas mecanizadas a partir de bloques moldeados por inyección. Debido a las limitaciones de material existentes ya que se dispone de muy pocas muestras, en el primer modelo se utiliza la probeta pequeña tipo 1BA, la cual es una reducción proporcional del tipo 1B con un factor de reducción de 1:2 a excepción del espesor. Para el segundo modelo se ha diseñado una probeta no normalizada de mayores dimensiones (tabla 4).

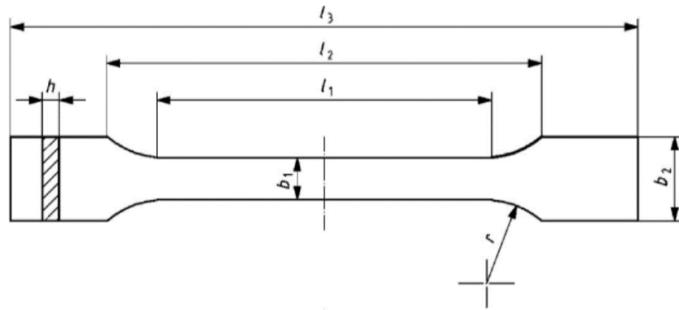


Figura 15. Probeta para el ensayo de tracción

Tabla 4. Dimensiones de las probetas para tracción.

	L3 (mm)	L2 (mm)	L1 (mm)	b1 (mm)	b2 (mm)	r (mm)	h (mm)	So (mm ²)
Modelo 1 (1BA)	75	58	30	5	10	40	26	130
Modelo 2 (no normalizado)	100	70	40	30	60	15	26	780

Para la realización del ensayo de tracción, la máquina debe disponer de dispositivos de sujeción para fijar las probetas de manera que aseguren una suficiente sujeción de las caras de la probeta, de tal forma que se evite el deslizamiento y que no ejerza, en ninguno de los extremos de la probeta, una presión localizada que pudiera causar desgarro, deformación o rotura en los extremos [10].

Para ello, se diseñan unos amarres que consisten en unas placas metálicas a las cuales se unen las probetas por medio de un adhesivo (Anexo 1, plano_1 y plano_2). Este adhesivo no debe reforzar o dañar las capas superficiales del producto. Debe ser tal que la resistencia a la cizalla de la película adhesiva sea mayor que la del material celular a ensayar y que el alargamiento del adhesivo sea despreciable en la determinación del alargamiento de la probeta. Además, no debe modificar apreciablemente las características del material a ensayar [10]. Para ello se utiliza un pegamento bicomponente de la marca comercial Araldite.



Figura 16. Amarre del ensayo de tracción.

El diseño (figura 16) radica en un par de placas idénticas metálicas (pieza 7), a las que se adhiere los extremos de la probeta, de dimensiones 60x26x5 mm unidas mediante un cordón de soldadura a otras dos placas de dimensiones 40x26x5mm. Las segundas placas contienen un agujero pasante de 13mm de diámetro con el que el que se acopla este amarre al diseñado para el segundo tipo de máquina INSTRON (Pieza1, Pieza 2).

3.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN

3.4.1 Fundamento teórico

El objetivo del ensayo de compresión es determinar la resistencia de un material o su deformación frente a fuerzas o cargas estáticas en la dirección de su eje longitudinal, acortándolo hasta la rotura o suspensión del ensayo (figura 17).

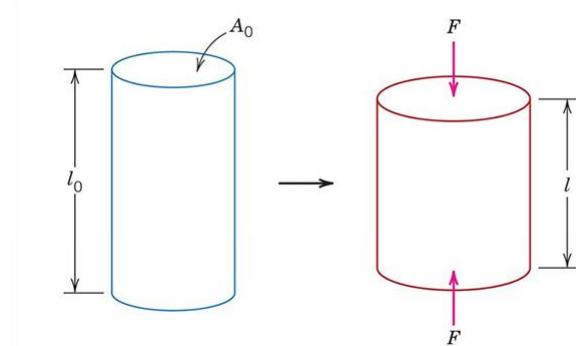


Figura 17. Esquema del ensayo de compresión.

El poliestireno expandido experimenta grandes deformaciones con la aplicación de una fuerza de compresión. La energía que absorbe por la fuerza es disipada mediante la flexión o pandeo y rompiendo las paredes de las celdas que conforman la estructura celular cerrada, y por la compresión y expulsión de aire ocluido al interior de cada celda [12].

Mediante el ensayo de compresión se determina la resistencia a la compresión y la deformación relativa correspondiente, el esfuerzo de compresión a un porcentaje requerido de deformación relativa y el módulo de compresión:

- **Resistencia a la compresión ingenieril (σ_m):** es el cociente entre la fuerza alcanzada y la sección transversal inicial de la probeta. Se puede determinar la tensión límite de fluencia (σ_y), que es donde ya finaliza el comportamiento elástico lineal.

$$\sigma_m = Fm/Ao$$

- **Deformación relativa ingenieril (ε_m):** relación de reducción del espesor de la probeta.

$$\varepsilon_m = ((hl - ho)/ho) * 100$$

- **Módulo de elasticidad en compresión (Ei):** es el esfuerzo de compresión dividido por la deformación relativa correspondiente por debajo del límite proporcional, es decir, cuando la relación es lineal.

$$Ei = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$$

La curva esfuerzo-deformación de los materiales celulares como el poliestireno expandido se divide en 3 zonas diferenciadas (figura 18):

1. **Zona elástica:** la estructura de celdas cerradas del EPS satisface la ley de Hook presentando un comportamiento elástico lineal. Esta etapa suele efectuarse a pequeñas deformaciones dependiendo principalmente de la densidad del material a ensayar. La energía absorbida es disipada mediante flexión o pandeo y la compresión del aire atrapado dentro de la estructura. Estas deformaciones son reversibles [12].
2. **Zona plástica:** su inicio está definido por el esfuerzo de fluencia (σ_y) y se extiende hasta valores de deformación elevados. Presenta una pendiente E_p definida como módulo de plasticidad. En esta etapa colapsa la estructura celular cerrada, se flexionan las paredes de las celdas formando pandeo. El aire atrapado es comprimido y comienza a traspasar las paredes de poliestireno, provocando la rotura de algunas e iniciando el colapso de la estructura. Estas deformaciones son irreversibles, se aprecia una reducción del volumen de la muestra [12].
3. **Zona de densificación:** tras el colapso de la estructura celular, el material continúa disipando energía a través de la expulsión del aire. La estructura del material pasa de ser celular a ser prácticamente sólida. Es notoriamente visible la pérdida de volumen del material [12].

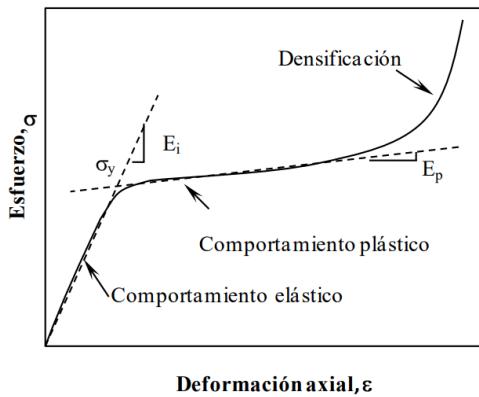


Figura 18. Diagrama tensión – deformación en el esfuerzo de compresión [14]

3.4.2 Norma UNE EN-ISO 844: 2015

La norma UNE EN-ISO 844: 2015 [13] especifica un método para determinar la resistencia a la compresión y la deformación relativa, el esfuerzo de compresión al 10% de deformación relativa y el módulo de compresión en plásticos celulares rígidos.

Se utiliza un aparato adecuado al intervalo de fuerza y desplazamiento que se vaya a medir que conste de dos placas paralelas planas cuadradas o circulares, que no puedan ser deformadas y que tengan una longitud de lado de al menos 10 com.

En el caso de la probeta, el espesor mínimo debe ser de 10 mm o más y el espesor máximo no debe ser mayor del ancho o del diámetro de la probeta. La base debe ser cuadrada o circular, con área mínima de 25 cm^2 y máxima de 230 cm^2 . Es recomendada la geometría y dimensiones de un prisma recto con una base de $(100 \pm 1) \text{ mm} \times (100 \pm 1) \text{ mm}$. Dado que puede tener influencia en los resultados, se recomienda comparar resultados sólo si se obtienen de probetas ensayadas que tengan la misma geometría y dimensiones. Las probetas deben acondicionarse durante un mínimo de 6h a $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ y $(50 \pm 10)\%$ de humedad relativa.

3.4.3 Diseño de probetas y amarres

Se han diseñado diversas probetas (figura 19) prismáticas de densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m³ y una cilíndrica de densidad 75 kg/m³ en diferentes dimensiones (Tabla 5).

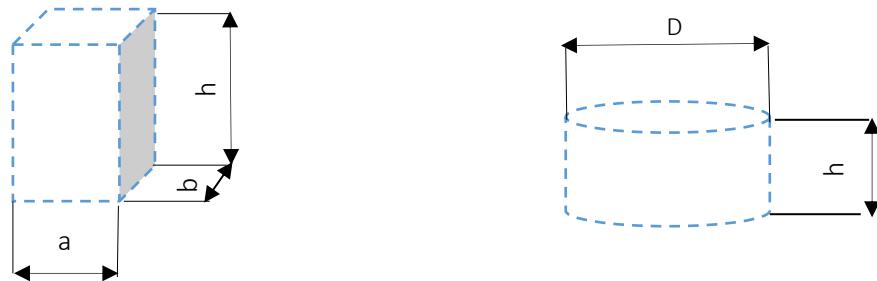


Figura 19. Probetas para el ensayo de compresión

Tabla 5. Dimensiones de las probetas del ensayo de compresión.

Muestra	D	h	So
PS75	90	30	6361,73

Muestra	a	b	h	So
PS60	8,2	25,3	15,8	129,56
PS80	8,9	25,3	15,8	140,62
PS100	9,2	25	15,3	140,76
PS100'	8,7	24,8	14,9	129,63
PS120	9,9	25,3	14,9	147,51

Para el ensayo de compresión, según la norma, se utiliza un aparato que consta de dos placas paralelas planas cuadradas o circulares pulidas, que no puedan ser deformadas y que tengan una longitud de lado o de diámetro de al menos 10 cm. Una de las placas debe estar fija y la otra móvil [13].

El diseño (Anexo 1, plano_2, plano_3) reside en dos discos (pieza 4) de diámetro 150 mm y espesor de 5 mm, soldados a dos amarres roscados de sujeción inferior (Pieza 5) y superior (Pieza 6) (figura 20).

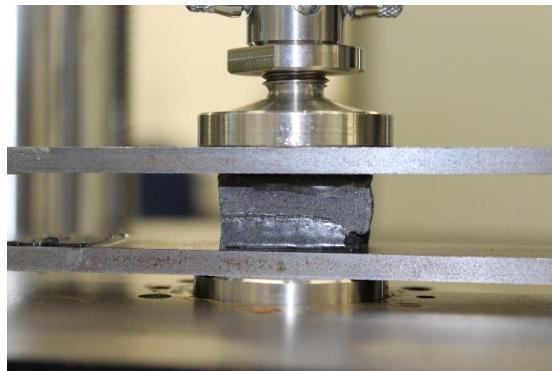


Figura 20. Amarre ensayo de compresión.

3.5 ENSAYO DE CIZALLADURA O ESFUERZO CORTANTE

3.5.1 Fundamento teórico

El ensayo de cizalladura o esfuerzo cortante consiste en someter a un material a esfuerzos cortantes hasta llegar a la rotura. Se aplican fuerzas transversales, crecientes y progresivas para determinar la cantidad de fuerza horizontal que el material es capaz de soportar antes de romperse (figura 21).

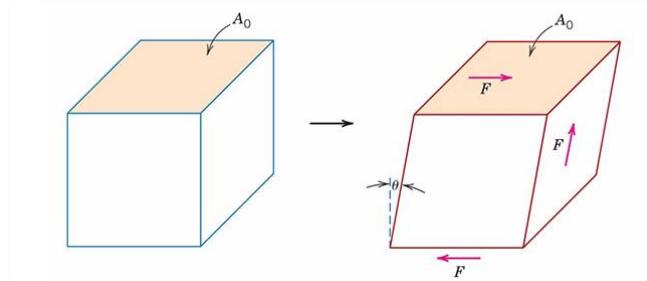


Figura 21. Esquema del ensayo de cizallamiento

La resistencia de un material frente al esfuerzo de cizallamiento se puede determinar con ayuda de dos procedimientos; el procedimiento de ensayo de corte simple y el de corte doble (figura 22). En el procedimiento de corte doble, se realizan dos cortes transversales en las probetas; en el procedimiento de corte simple, solo se realiza un corte en la probeta. El cálculo de la resistencia de cizallamiento en ambos procedimientos se diferencia en el área de sección transversal aplicable [14].

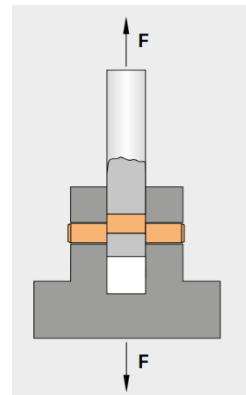


Figura 22. Ensayo de corte doble

El objetivo del ensayo es determinar el esfuerzo cortante y el módulo de cizalla del material [15]:

- **Esfuerzo cortante (τ):** definido como la relación entre la fuerza tangencial al área de la cara sobre la que se aplica (Figura 20).

$$\tau = F / A_o$$

- **Módulo de elasticidad transversal (G):** relación entre el esfuerzo y la deformación por cizallamiento definida como la razón $\Delta x/h$, donde Δx es la distancia horizontal que se desplaza la cara sobre la que se aplica la fuerza y h la altura del cuerpo.

$$G = \frac{F/Ao}{\Delta x/h} = \frac{F/Ao}{\theta}$$

- **Tensión de rotura (τ_R):**

SIMPLE $\tau_R = F / Ao$

DOBLE $\tau_R = F / (2 * Ao)$

El diagrama tensión deformación se aplica de la misma manera que en el de tracción. En el caso del ensayo de cizalladura no existe un periodo plástico.

3.5.2 Diseño de probetas y utilajes

Tras realizar diversos ensayos de cizalladura en el poliestireno expandido mediante diferentes métodos de uso general y no lograr obtener resultados debido a su estructura celular, se han diseñado dos modelos de utilaje para el desarrollo de la prueba. Éstos dos utilajes son muy diferentes respecto al diseño de probeta, la forma con la que se aplica la carga a la muestra y, en consecuencia, el tipo de resultados que se obtendrían.

El primer modelo (figura 24) se ha basado en el de la norma ASTM D7078 "V-Notched Rail Shear Method". Este método utiliza una distintiva probeta con una muesca en V (figura 23) que sirve para crear una zona de tensión de corte uniforme localizada entre las muestras. En este procedimiento, la cara de la muestra es sujetada en ambos extremos, por lo que es un agarre fuerte y rígido [19].

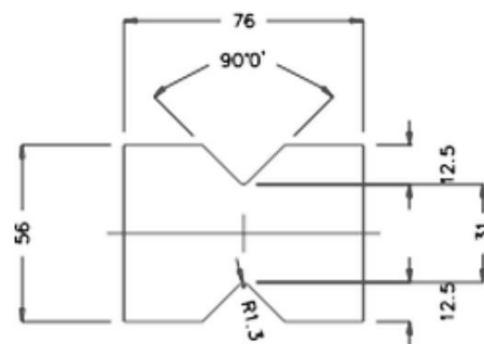


Figura 23. Dimensiones de la probeta para el modelo de utilaje 1 de cizalladura

Una vez configurada la probeta, los tornillos de sujeción en cada mitad del utilaje están provistos tanto en la parte delantera como en la parte posterior para que las mordazas de sujeción se puedan centrar correctamente dependiendo del grosor de la muestra [19].

El diseño del utilaje (Anexo 1, plano_3 y plano_3.01) consiste en unos soportes inferior y superior (piezas 1 y 3) dotados de un hueco cuadrado de dimensiones 58x36mm donde se ajustaría la probeta mediante unas plaquitas (pieza 2) y unos tornillos de ajuste de M8. La probeta podría tener un espesor de hasta 24mm. Los soportes están unidos a unos amarres superior e inferior (piezas 4 y 5) por medio de una rosca.

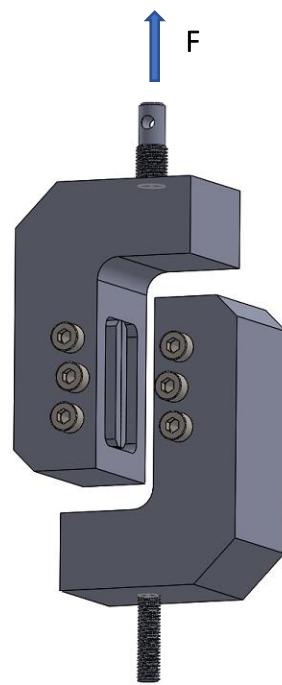


Figura 24. Modelo de utilaje 1 para ensayo de cizalladura

El segundo modelo (figura 26) se ha basado en el de la norma ASTM D5379 “V-Notched Beam Method”. La tensión de corte se introduce a través de la sujeción en el borde de la muestra. La longitud de corte de la muestra es más pequeña en comparación con el anterior modelo (figura 25).

La clave de este modelo es el posicionamiento correcto de la probeta. La carga debe aplicarse con precisión para no inducir a fuerzas no cortantes sobre la probeta. Los movimientos en todos los demás ejes deben quedar totalmente restringidos. Para ello se utiliza la ayuda de una herramienta de lineación asegurando solo el movimiento vertical.

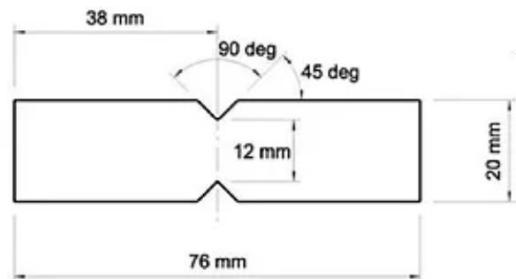


Figura 25. Dimensiones de la probeta para el modelo de utilaje 2 de cizalladura

El diseño del utilaje (Anexo1, plano 4 y plano 4.01) consiste en una placa base (pieza 6) de 154x63mm al que se le unen mediante cordones de soldadura el soporte inferior y un cilindro (piezas 1 y 5). El soporte superior (pieza 2) es el que aplica la carga en sentido vertical. Los soportes contienen unas piezas de ajuste para la correcta colocación de las probetas.

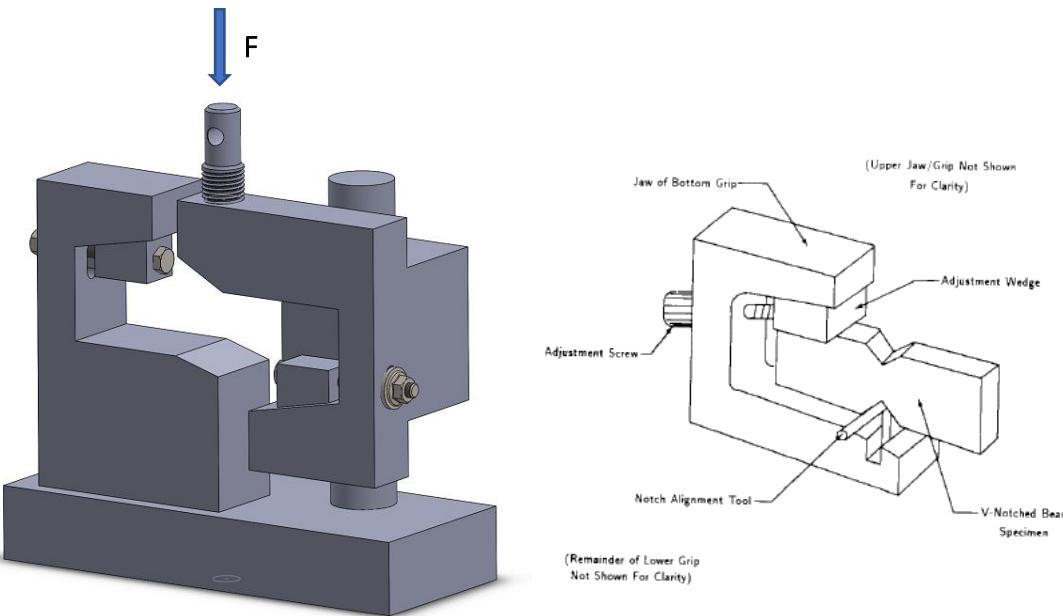


Figura 26. Modelo de utillaje 2 para ensayo de cizalladura

3.6 ENSAYO MIXTO

Se ha realizado el diseño de un utillaje (figura 27) que combina esfuerzos de tracción con cizallado y esfuerzos de compresión con cizallado. La probeta de ensayo a utilizar posee una forma cúbica de 38 mm de lado.

El diseño (anexo1, plano_5, plano_5.01, plano_5.02) consiste en dos semidiscos (pieza 1) planos de 10 milímetros de espesor (figura 28). Estos semidiscos son unidos mediante unos tornillos a un amarre inferior y otro superior (piezas 5 y 6), los cuales se incorporan a la máquina universal de ensayos. Los semidiscos poseen unos soportes (pieza 2) unidos mediante un cordón de soldadura. Los soportes contienen unas chapas metálicas (Pieza 3), a la que se adhieren mediante un pegamento que no refuerce ni dañe la superficie del material. Los soportes están sujetos mediante unas pletinas (pieza 4) de sujeción y unos tornillos.

El conjunto de orificios situados en los semidiscos permite que éstos se unan a los amarres en diferentes orientaciones. De esta manera, se permite un rango de valores del ángulo de carga, entre el plano de la muestra y la dirección de la carga [20]. Con 90º se realizaría un ensayo de compresión o tracción puro, con 0º de cizalladura pura, y ángulo entre 0 y 90º ensayos combinados de ambos ensayos.

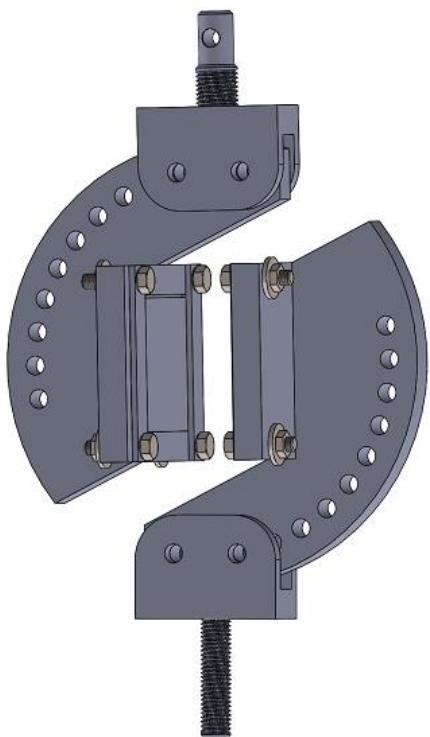


Figura 28. Utillaje para ensayo combinado



Figura 27. Elementos del utillaje para ensayo combinado

4. RESULTADOS

4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

La curva tensión vs deformación obtenida del ensayo de tracción del modelo de probeta 1 se muestran en la figura 30. Se ha realizado en probetas de densidades 60, 80, 100 y 120 kg/m³ (figura 29) a una velocidad de deformación de 1 mm/min.



Figura 29. Modelo 1 de probetas en densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m³ tras el ensayo de tracción.

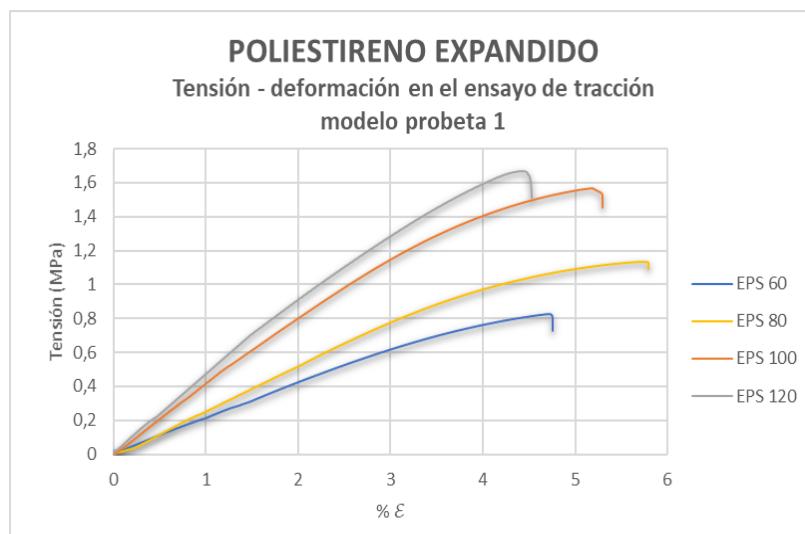


Figura 30. Diagrama tensión – deformación obtenido mediante el ensayo de tracción del modelo de probeta 1 en densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m³.

En la figura 32 se muestra la curva tensión vs deformación obtenida para el modelo de probeta 2. Se aplicó a densidades de 60, 80, 100 y 120 kg/m³ a una velocidad de 1mm/min. Alcanzaron la rotura las muestras de 60 y 100 kg/m³, las otras dos se despegaron antes de producirse la rotura (Figura 31).



Figura 31. Modelo 2 de probetas en densidades de 60, 80 y 100 kg/m³ tras el ensayo de tracción.

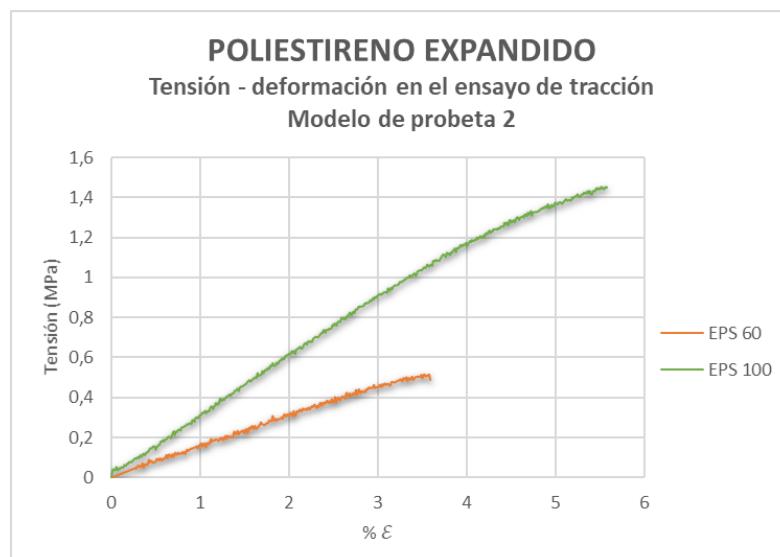


Figura 32. Diagrama tensión – deformación obtenido mediante el ensayo de tracción del modelo de probeta 2 en densidades de 60 y 100 kg/m³.

En las tablas 6 y 7 se observan los valores de la tensión y deformación en el punto de rotura y el módulo de Young para cada una de las diversas muestras y modelos de probeta ensayados.

Tabla 6. Datos obtenidos mediante el ensayo mecánico de tracción en el modelo de probeta 1.

MUESTRA PROBETA 1	σ_R	ε_R	E_t
	(MPa)	(%)	(MPa)
EPS 60	0,8247	4,72	20,24
EPS 80	1,1349	5,73	26,77
EPS 100	1,5693	5,18	39,47
EPS 120	1,6704	4,43	45,85

Tabla 7. Datos obtenidos mediante el ensayo mecánico de tracción en el modelo de probeta 2.

MUESTRA PROBETA 2	σ_R	ε_R	E_t
	(MPa)	(%)	(MPa)
EPS 60	0,51613077	3,516	15,22
EPS 100	1,45511538	5,557	30,04

Al analizar los datos obtenidos con el ensayo y desarrollado las curvas de tensión vs deformación, se ha observado que el módulo de Young es ligeramente superior en el modelo 1 que en el 2 y las tensiones de rotura y deformación menores.

Las curvas obtenidas del modelo de probeta 1 eran muy inestables y se crearon muchos puntos débiles. Esto podría producirse debido al tamaño de grano del material, ya que el espesor y la anchura de la probeta debería ser 10 veces mayor que el tamaño de grano para que no se produzcan estas zonas débiles. Los resultados obtenidos en el modelo de muestra 2 son más aproximados a los obtenidos por otros autores.

Se puede observar en los resultados obtenidos, que, con el aumento de la densidad en las diversas muestras, aumenta el módulo de elasticidad o módulo de Young (E_t). Esto indica que, a mayor densidad en las espumas, mayor resistencia a la deformación se tiene. Cuanto mayor es la densidad, mayor es la rigidez del material.

4.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

El ensayo de compresión se ha realizado en muestras de EPS de 60, 75 (Figura 33), 80, 100 y 120 kg/m³.

En las figuras 34 y 35 se han obtenido los diagramas de la relación entre la tensión de compresión y la deformación del poliestireno expandido.



Figura 33. Probeta de densidad 75 kg/m³ tras el ensayo de compresión.

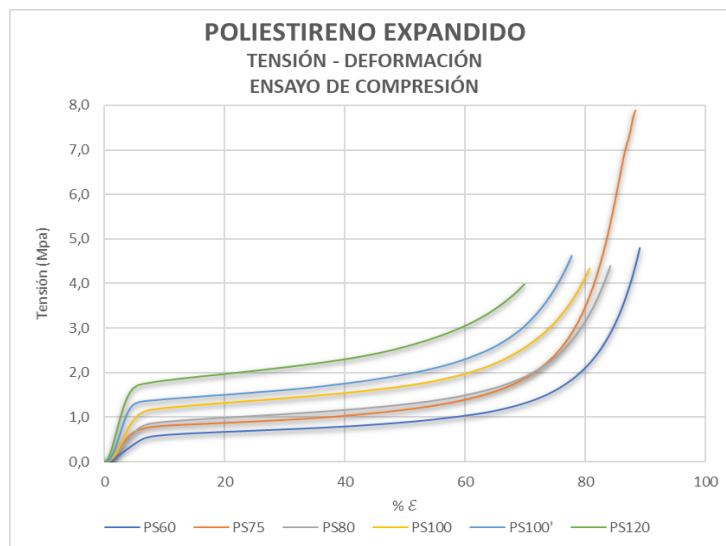


Figura 34. Relación entre la tensión de compresión y la deformación del EPS.

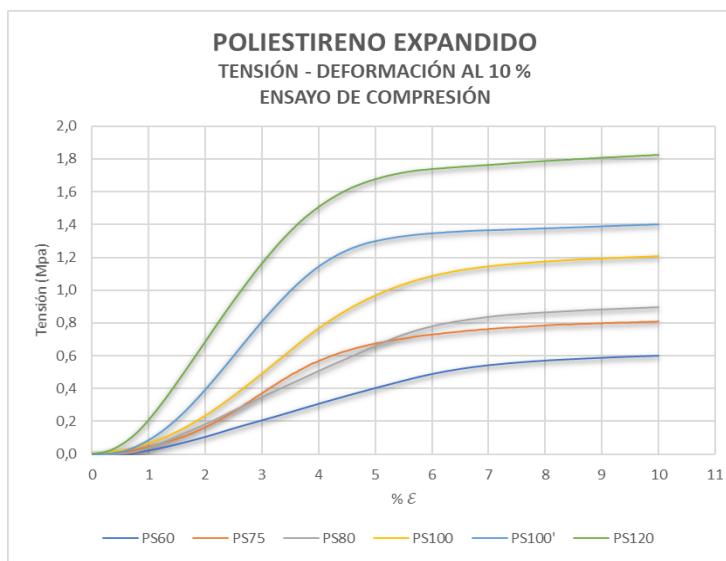


Figura 35. Relación entre la tensión de compresión y la deformación del EPS al 10%

Se han obtenido los valores de la tensión de fluencia (σ_y), la deformación en el punto de fluencia (ε_y), la tensión a una deformación del 10% ($\sigma_{10\%}$), el módulo de compresibilidad (E_y) y el módulo de plasticidad (E_p).

Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de compresión del EPS

MUESTRA	σ_y	ε_y	E_y	E_p	$\sigma_{10\%}$
	(MPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
EPS 60	0,5481	7,181	9,24	0,638	0,601
EPS 75	0,6687	4,89	11,868	0,768	0,812
EPS 80	0,818	6,59	15,007	0,907	0,89
EPS 100	1,091	6,054	21,134	1,158	1,208
EPS 100'	1,279	4,695	34,884	1,137	1,404
EPS 120	1,6164	4,5409	46,912	1,522	1,823

Se observa en los valores obtenidos un aumento del módulo de compresibilidad y del módulo de plasticidad al aumentar la densidad en el material. Una espuma más densa que otra tendrá una resistencia a la compresión mayor, por lo que sufrirá menos deformaciones bajo una misma carga.

En la siguiente figura 36 se ilustra el efecto de la densidad relativa sobre los módulos de compresibilidad, de elasticidad en tracción y las tensiones de rotura para los dos modelos de probeta. Se aprecia la línea de tendencia que siguen los parámetros al aumentar la densidad.

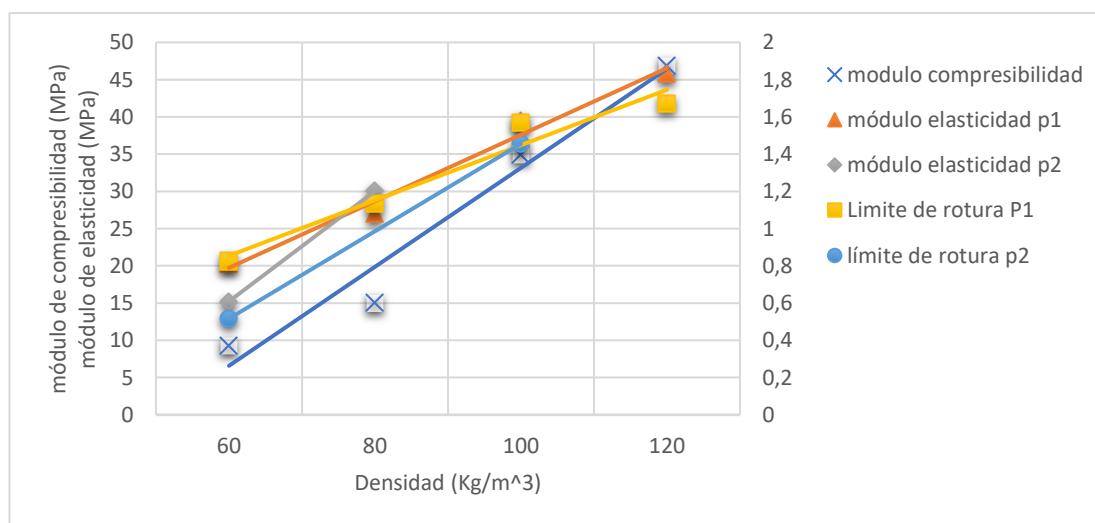


Figura 36. Efecto de la densidad sobre los módulos de elasticidad y tensiones de rotura.

5. CONCLUSIONES

En la realización de los ensayos de tracción y compresión, se ha podido observar un aumento en los módulos de compresibilidad y módulos elásticos en tracción al aumentar la densidad de las diversas muestras. Por lo tanto, una espuma con una densidad relativa mayor que otra soportará menores deformaciones bajo una misma carga de tracción o compresión. El material será más resistente frente a estos esfuerzos.

Debido a las limitaciones de muestras de poliestireno expandido existentes, se han realizado probetas de dimensiones reducidas. Estas probetas en el ensayo de tracción han dado lugar a curvas de esfuerzo vs deformación muy inestables creando multitud de puntos débiles en comparación con las de mayor tamaño. Las curvas obtenidas de los dos modelos de probeta para idénticas muestras difieren ligeramente en los resultados. Esto es debido a que el espesor de la probeta debe de ser como mínimo, 10 veces el diámetro máximo de grano del material para obtener resultados más exactos sin la aparición de estos puntos débiles.

Tras el diseño de los amarres, el trabajo se ha centrado únicamente en la realización experimental de los ensayos de tracción y compresión. El proyecto podría continuar con la mejora y fabricación del resto de sistemas de amarre diseñados. De este modo, completar el estudio del comportamiento mecánico de las espumas frente a otras fuerzas, como la de cizallado y fuerzas combinadas de cizalla y tracción, y, cizalla y compresión.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] John Scheirs. "Historical Overview of Styrenic Polymers". En John SCHEIRS y Duane PRIDDY. Modern Styrenic Polymers). Wiley. (3-4) (2003)
- [2] A. Cañamero. "El poliestireno". <http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/Curiosid/Rc-38/RC-38.html> (2002) [web]
- [3] Textos científicos. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/poliestireno> (2006) [web]
- [4] Materiales de uso técnico. <https://villalbaestano.wordpress.com/el-poliestireno/> [Web]
- [5] Disenhoplantasquimicas, <https://disenhoplantasquimicas.wordpress.com/datos-generales/poliestireno/> [web]
- [6] Vanessa T.D., Ramón O.P. y Francesc E.C. "Fabricación y conformado de poliestireno de alto impacto". Técnica industrial 266. (2006) [web]
- [7] ANAPE (Asociación Nacional de Poliestireno Expandido). <http://www.anape.es> [web]
- [8] Antonio Galbantín. "Ensayos y propiedades mecánicas de los materiales". Dicis. (2016) [web]
- [9] EnCabeCeraFormación. <http://encabeceraformacion.blogspot.com/2015/09/analisis-de-materiales-diagramas.html> [web]
- [10] Norma UNE-ISO 1926 "Plásticos celulares rígidos. determinación de las propiedades de tracción" (2015)
- [11] Norma UNE-EN ISO 20753 "Plásticos. Probetas". (2015)
- [12] Vaitkus, S., Laukaitis, A., Gnipas I., Kersulis, V., Vejelis, S. "Assessment of Strength under Compression of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs", Vol. 10, No. 4., pp 326-329. (2004)
- [13] Norma UNE EN-ISO 844 "Materiales plásticos celulares rígidos. Determinación de las características de compresión" (2015)

- [14] Gunt, Hamburg. https://www.gunt.de/images/download/Mtodos-de-ensayo-mecnicos-conocimientos-bsicos_spanish.pdf [web]
- [15] Campusvirtual, Ciencia de materiales. <http://campusvirtual.edu.uy/archivos/mecanica-general/ENSAYOS%20DE%20MATERIALES/RESUMEN%20DE%20TIPOS%20DE%20ENSAYOS..pdf> [web]
- [16] P. Arrué, A.C. Cárcel, A.M. Romero y B. Cárcel. “Comportamiento mecánico de espumas aislantes de EPS y XPS: efectos de la estructura celular”.
- [17] Liang Cui, Stephen Kiernan, Michael D.Gilchrist. “Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials” Dublín. (2008)
- [18] Helmets, <https://helmets.org/liners.htm> [web]
- [19] Instron ,<http://www.instron.us/~media/literature-library/products/2014/08/vnotch-shear-fixtures-astm-d-5379--d-7078.pdf?la=en>
- [20] Zhiwei Zhou; Zhihua Wang; Longmao Zhao; Xuefeng Shu, “Experimental investigation on the yield behavior of Nomex honeycombs under combined shear-compression” (2012) [web]

7. ANEXOS

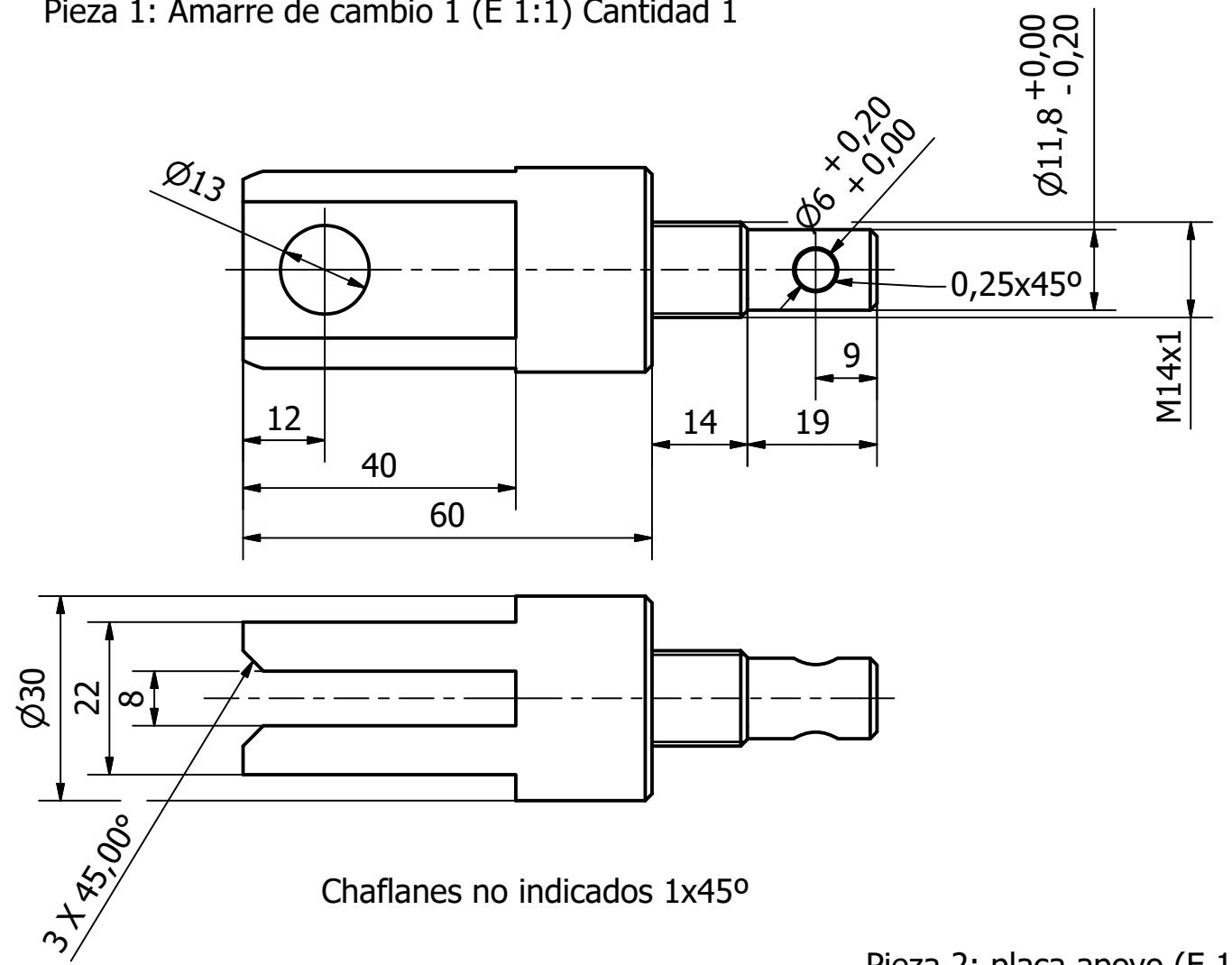
7.1 ANEXO I: Planos de amarres de los ensayos planteados

A continuación, se muestran los diversos planos de los diseños de amarres y mordazas de los diferentes ensayos planteados.

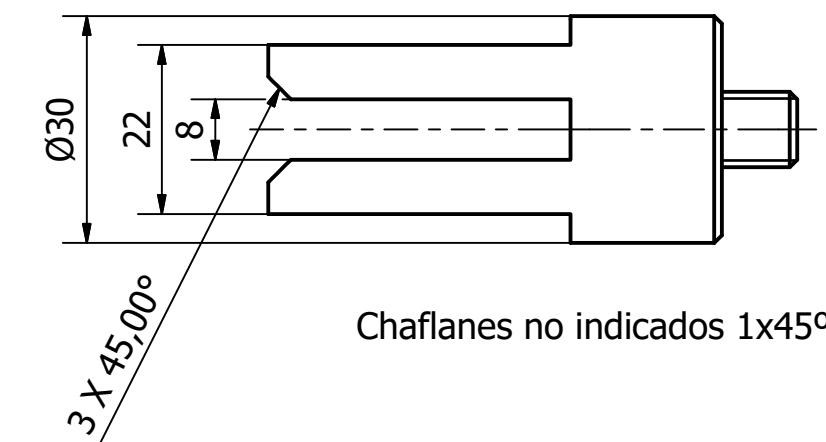
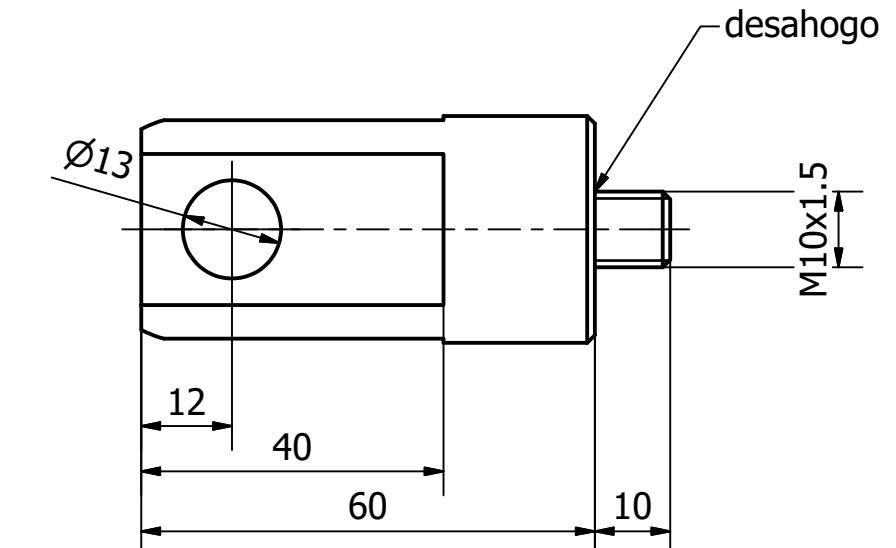
- Ensayos de tracción y compresión: plano_1, plano_2.
- Ensayo de cizalladura modelo 1: plano_3, plano_3.01.
- Ensayo de cizalladura modelo 2: plano_4, plano_4.01.
- Ensayo mixto: plano_5, plano_5.01, plano_5.02

6 5 4 3 2 1

Pieza 1: Amarre de cambio 1 (E 1:1) Cantidad 1

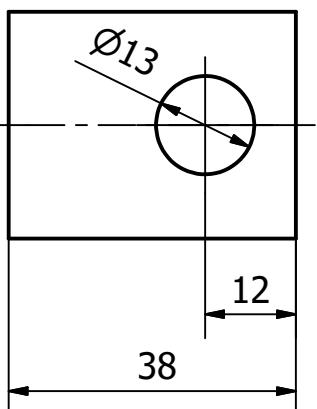


Pieza 3: Amarre inferior (E 1:1) Cantidad 1

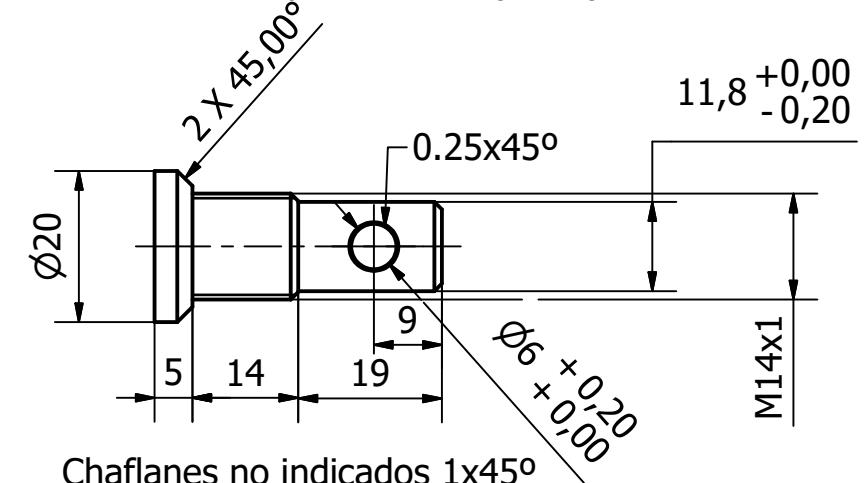


Chafanes no indicados 1x45°

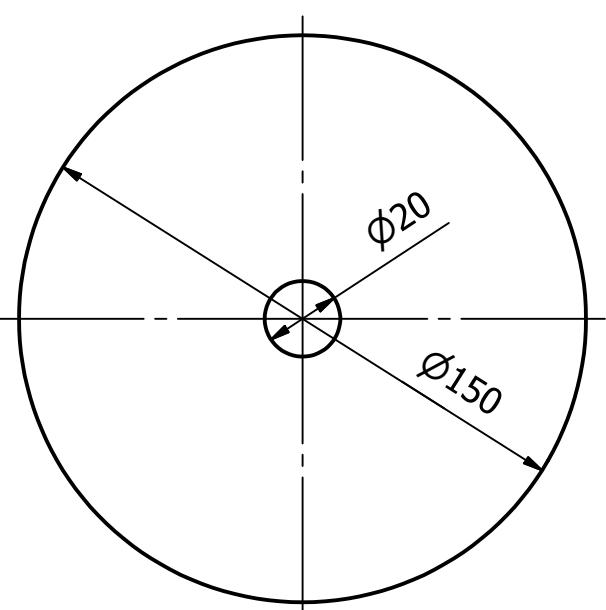
Pieza 2: placa apoyo (E 1:1) **Cantidad 2**
Espesor: 3 mm



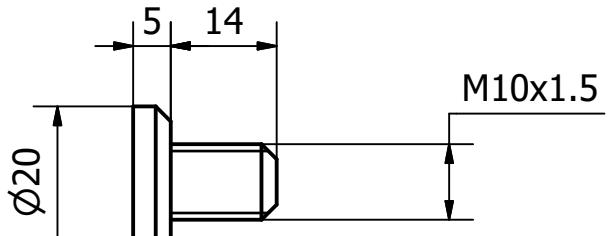
Pieza 6: Amarre superior Disco (E 1:1) Cantidad 1



Pieza 4: Disco (E 1:2) **Cantidad 2**
Espesor: 5 mm



Pieza 5: Amarre inferior disco (E 1:1) Cantidad 1



Diseño de Ramon	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 08/03/2018
plano_1			Edición	Hoja 1 / 1

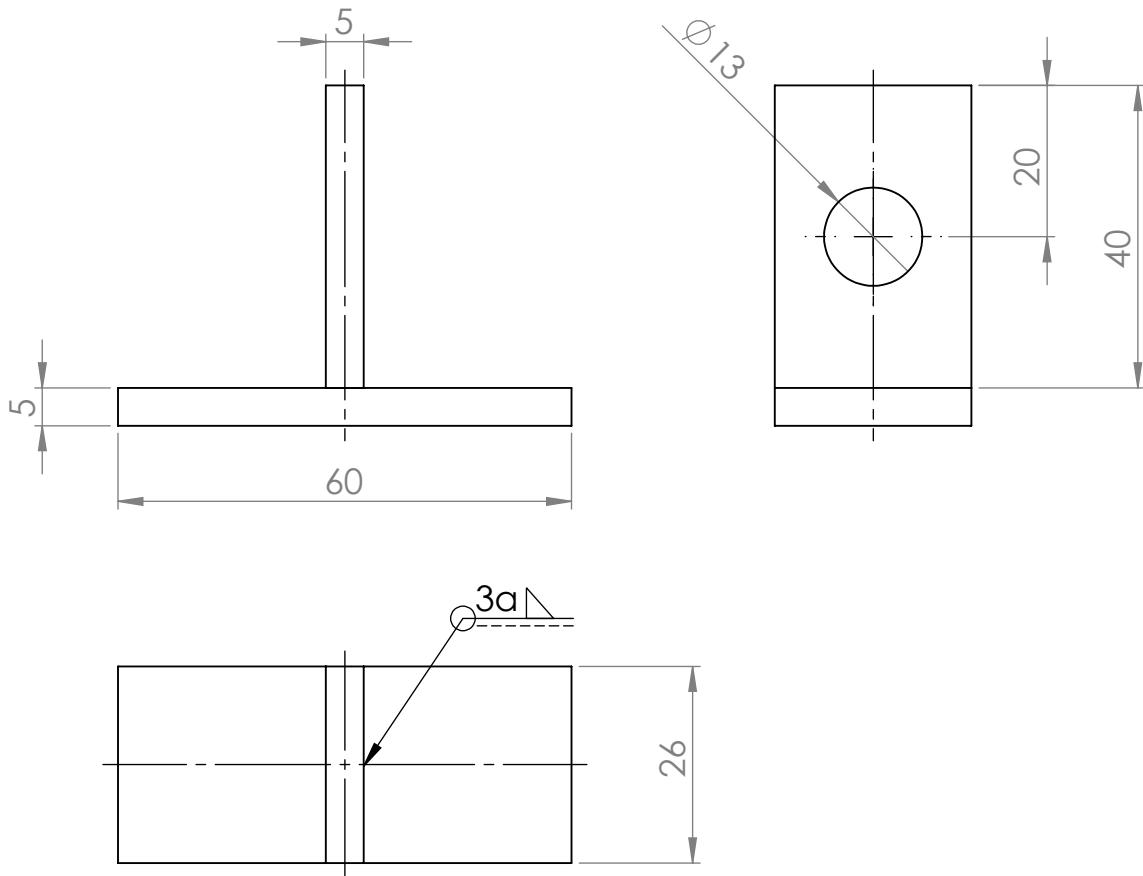
4

3

2

1

F Pieza 7: (E 1:1) cantidad 6



C

B

A

F

E

D

C

B

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
					Plano_2
				PESO:	A4

4

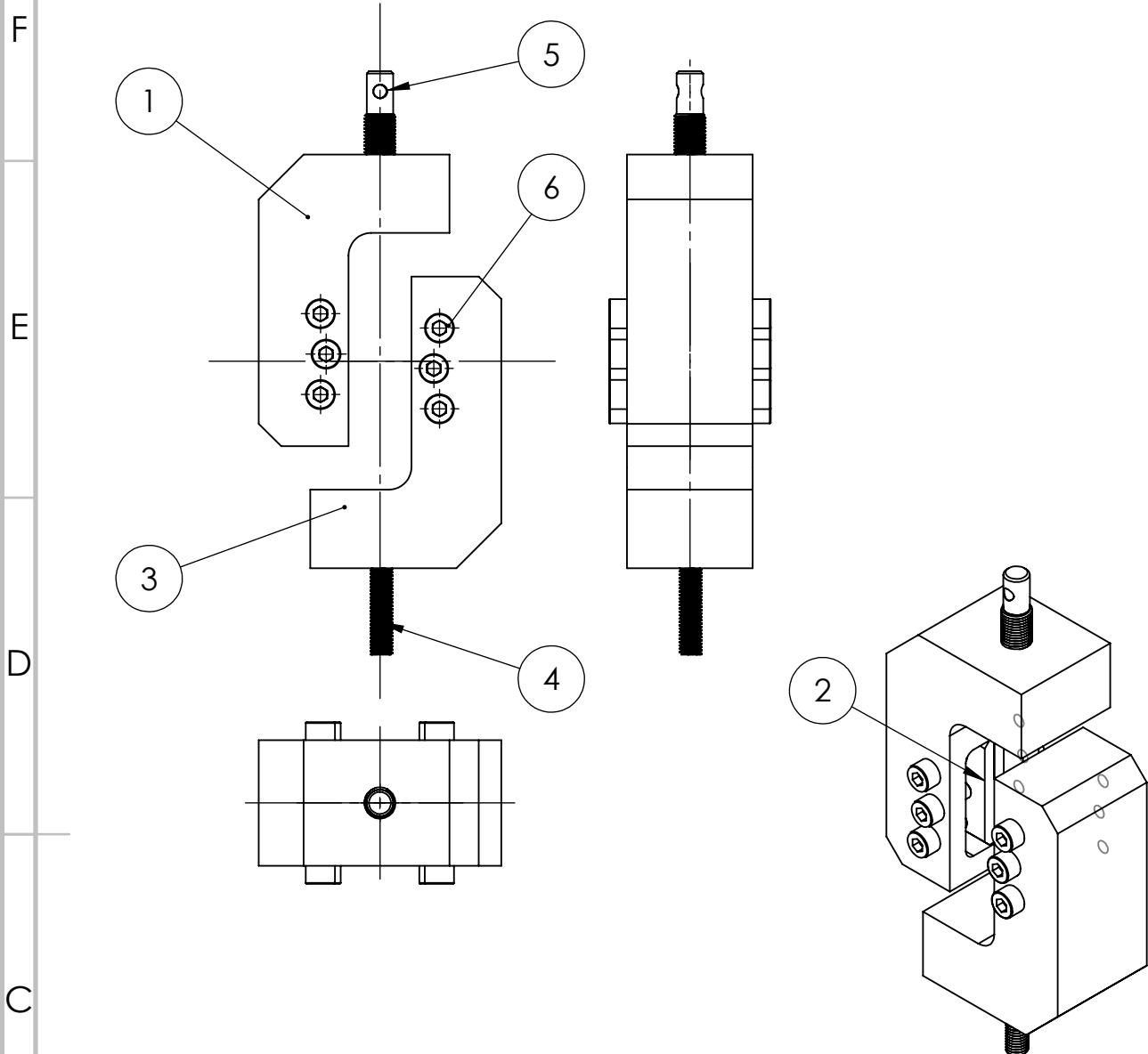
3

2

1

4 3 2 1

Plano de conjunto (E 1:3)



N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Soporte superior	1
2	Placa	4
3	Soporte inferior	1
4	Amarre inferior	1
5	Amarre superior	1
6	ISO 4762 M8 x 20 - 20N	12

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO: **Utilaje ensayo cizallamiento 1**

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO: **Plano_3**

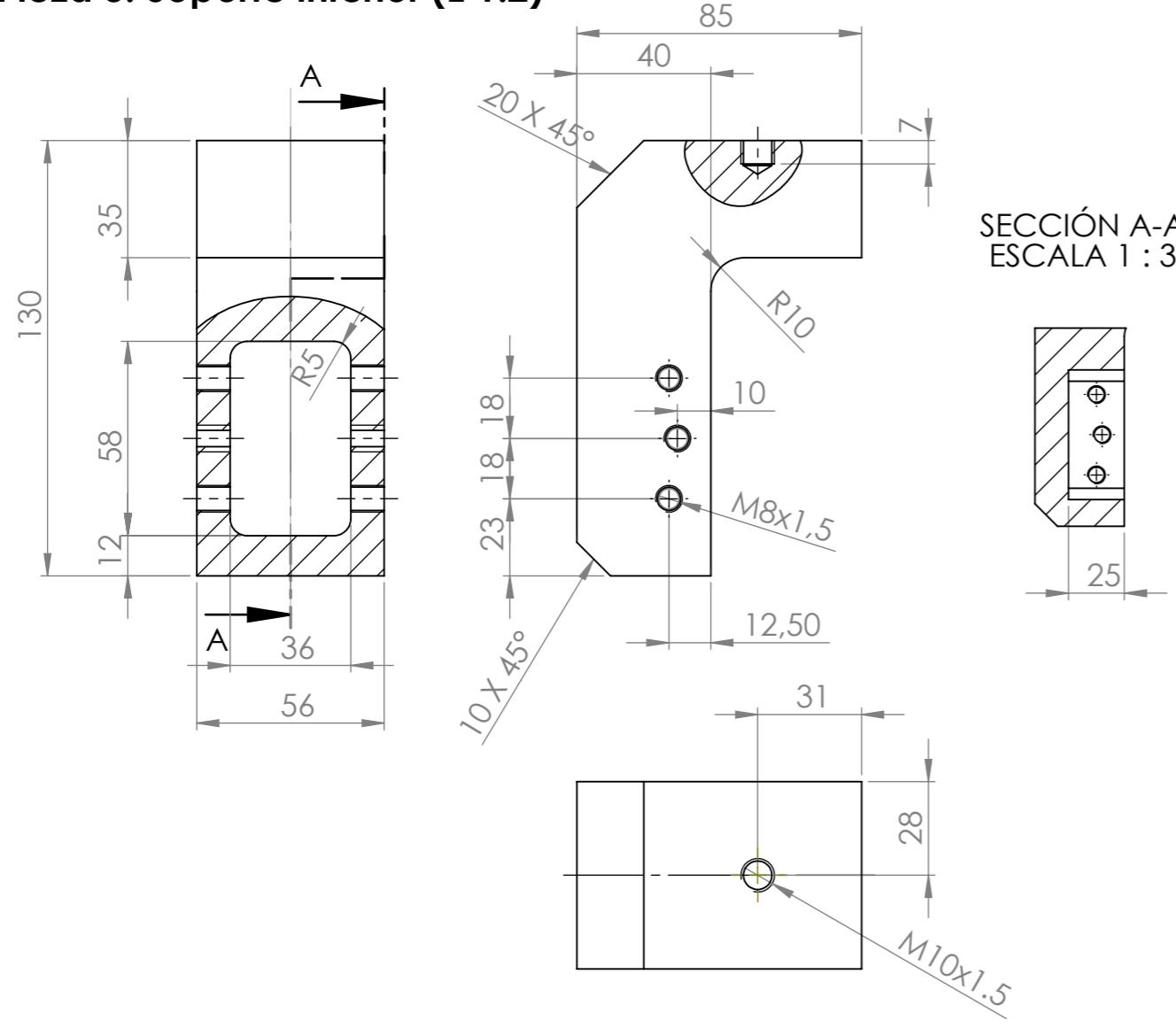
ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1

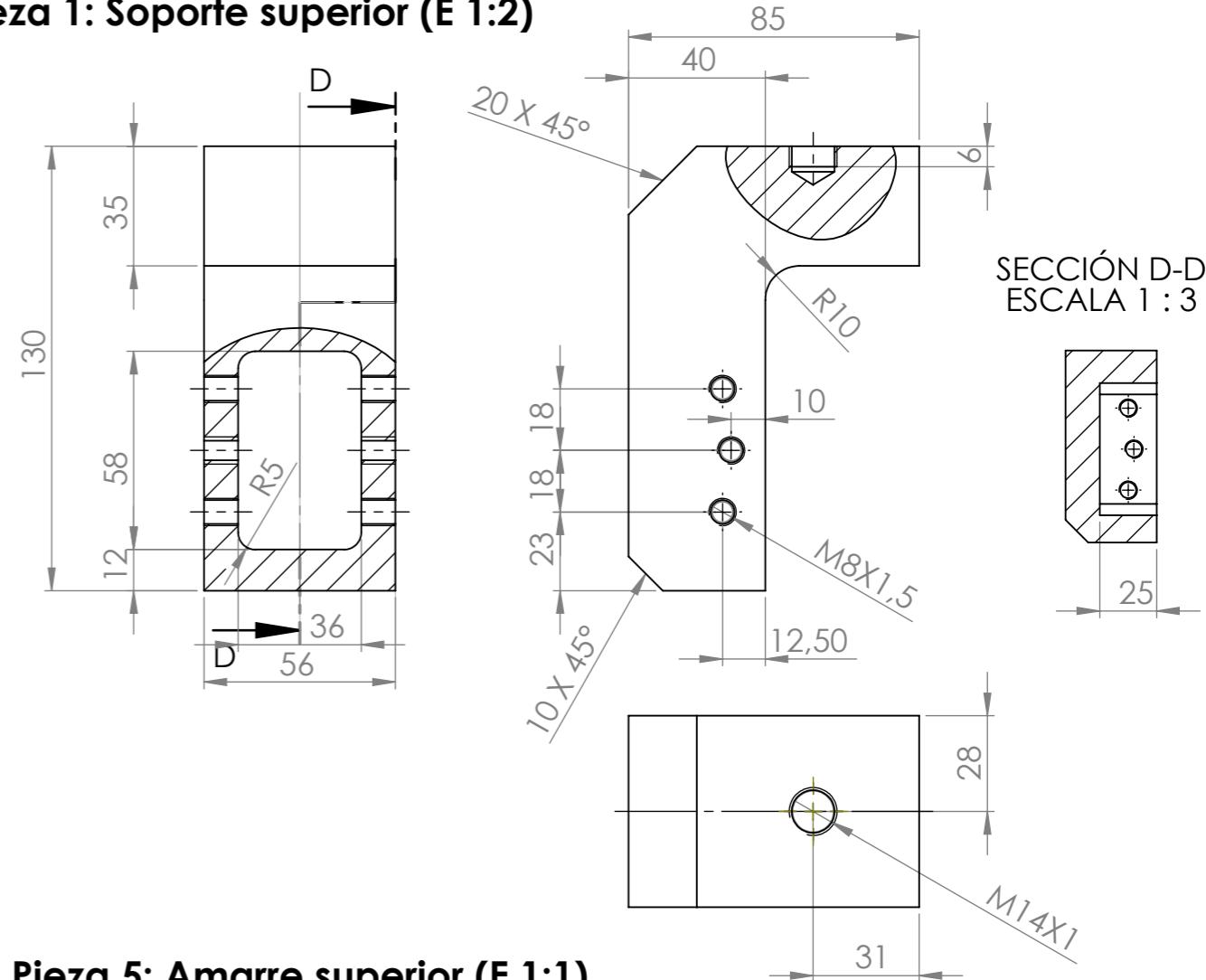
A4

4 3 2 1

Pieza 3: Soporte inferior (E 1:2)

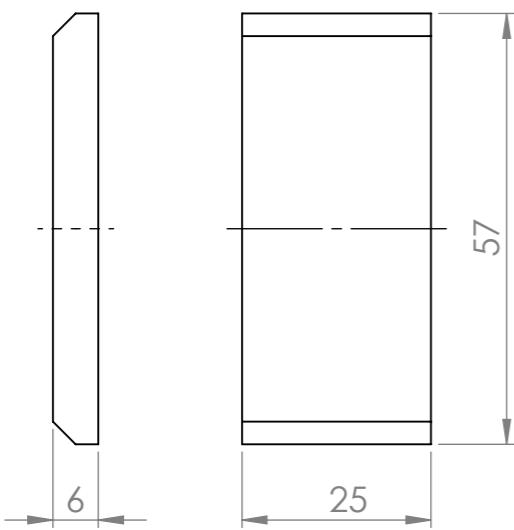


Pieza 1: Soporte superior (E 1:2)



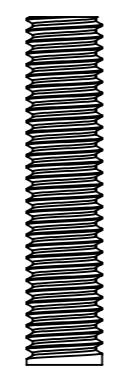
Pieza 2: Placa (E 1:1)

chaflanes no indicados 3x 45°



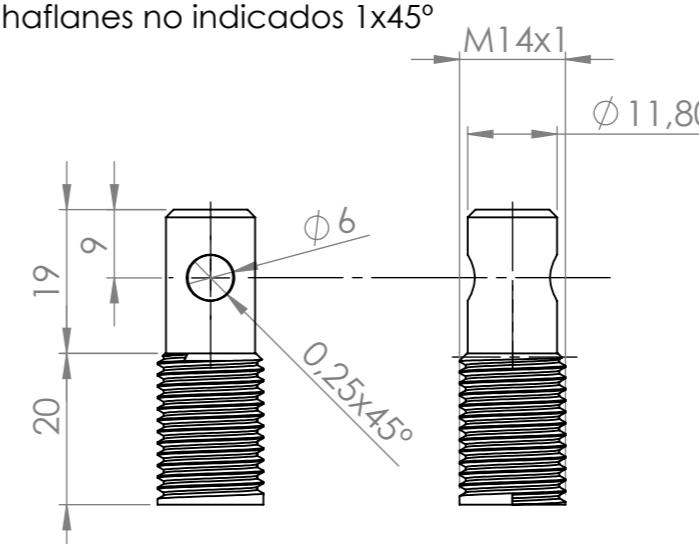
Pieza 4 Amarre inferior (E 1:1)

Cilindro roscado M10X1,5
Longitud 46mm



Pieza 5: Amarre superior (E 1:1)

chaflanes no indicados 1x 45°



DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VERIF.				
APROB.				
FABR.				MATERIAL:
CALID.				N.º DE DIBUJO: Plano_3.01
				A3
				HOJA 1 DE 1
				PESO:

**Elementos utilaje
cizallamiento 1**

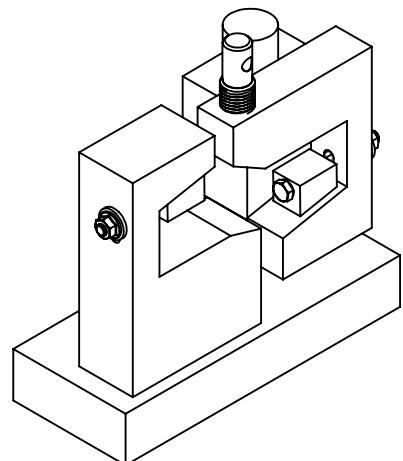
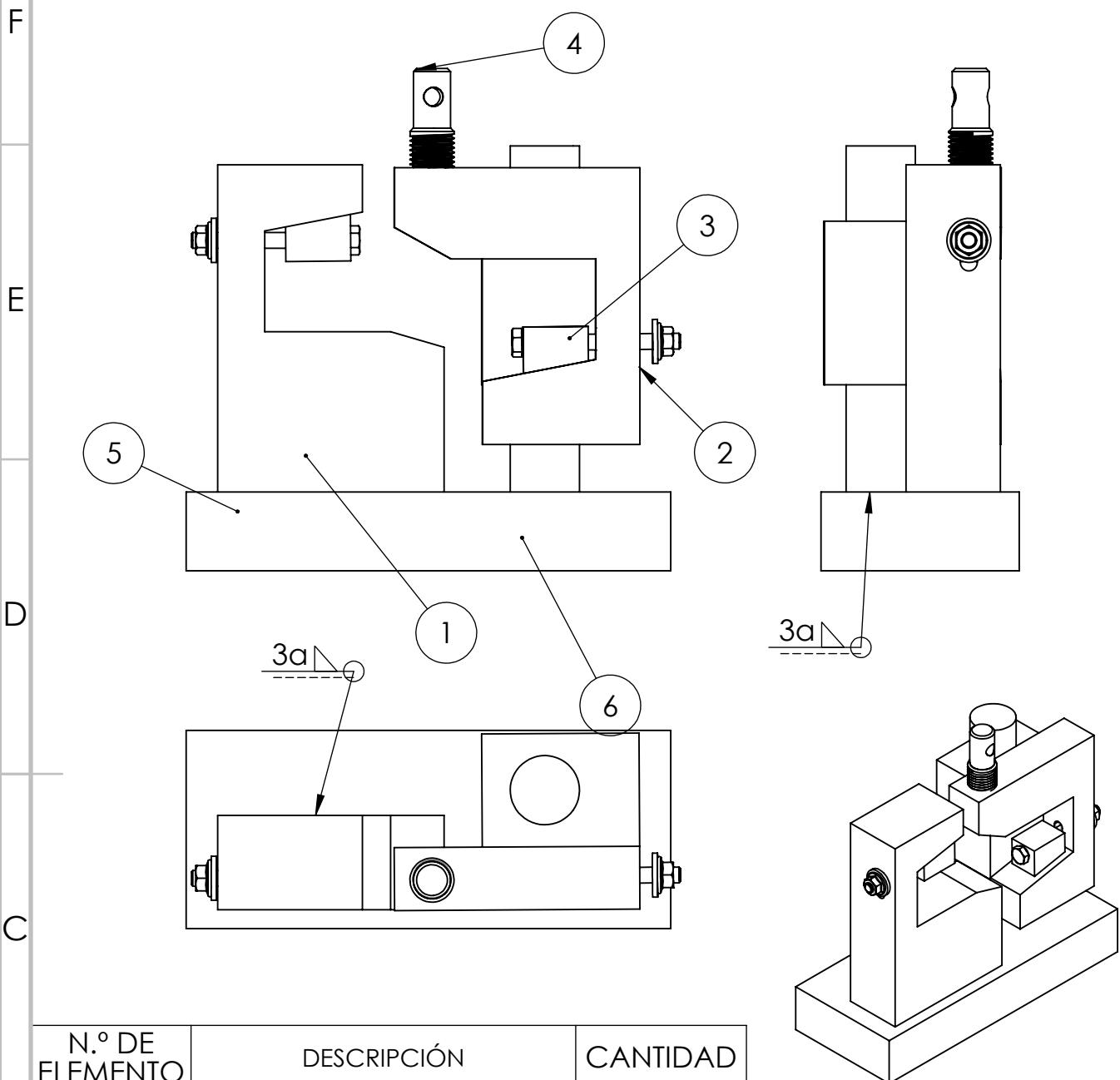
4

3

2

1

Plano de conjunto (E 1:2)



N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Soporte inferior	1
2	Soporte superior	1
3	Pieza de ajuste	2
4	Amarre superior	1
5	Base	1
6	Cilindro	1
7	ISO 4014 - M5 x 50 x 50-C	2
8	ISO 10669-5.4-N	2
9	ISO - 4161 - M5 - N	2

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	MATERIAL: PESO:	TÍTULO: Utilaje ensayo de cizallamiento 2	N.º DE DIBUJO Plano_4	A4
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CALID.							

4

3

2

1

8

7

6

5

4

3

2

1

F

E

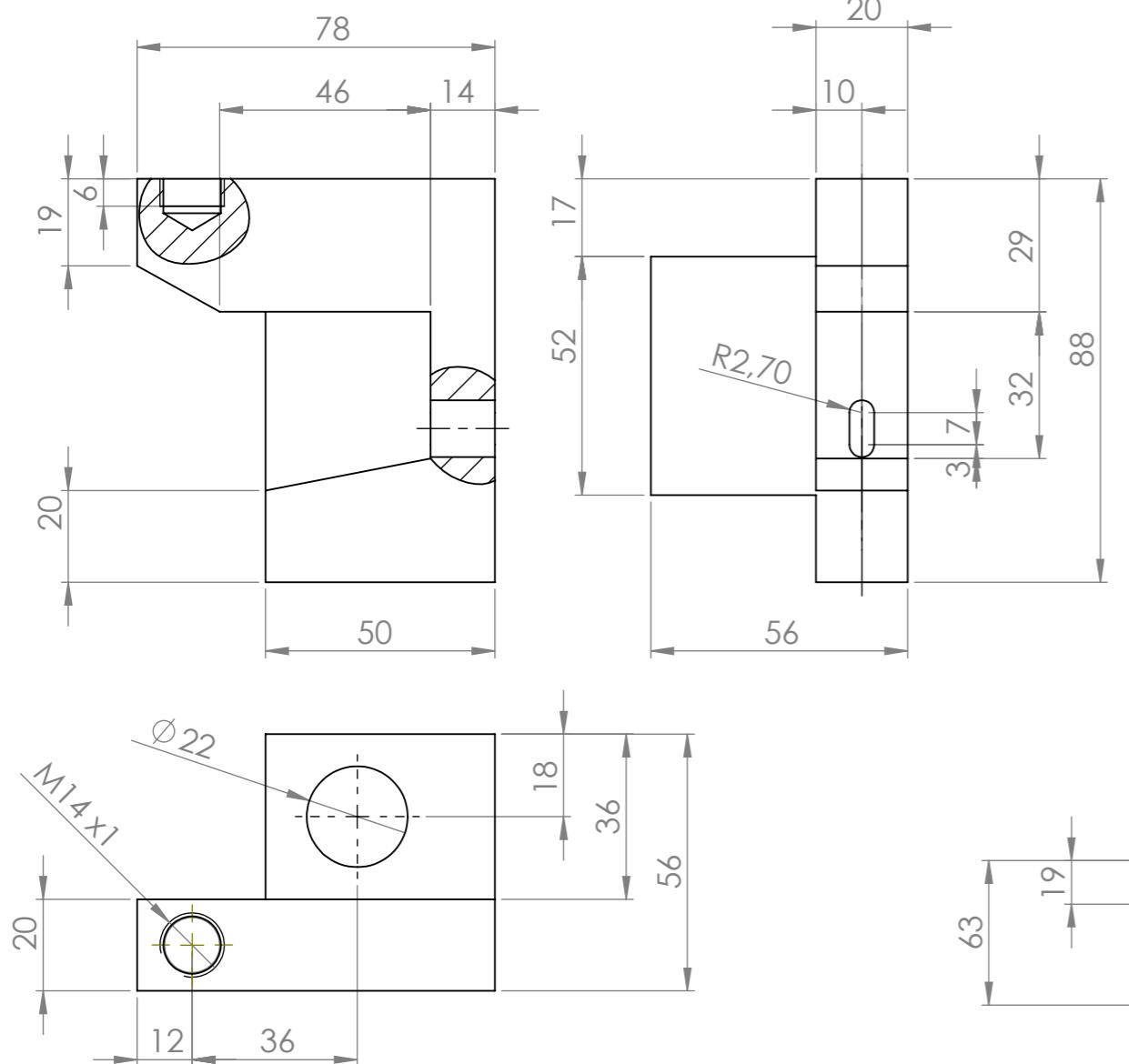
D

C

B

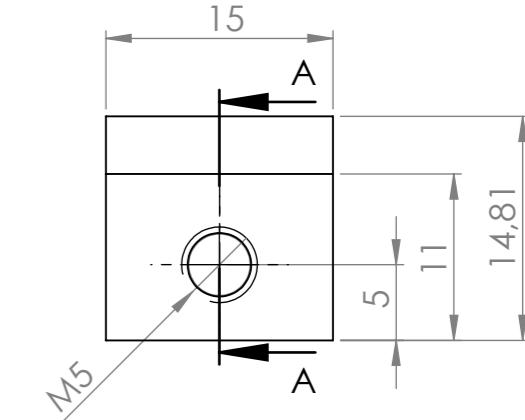
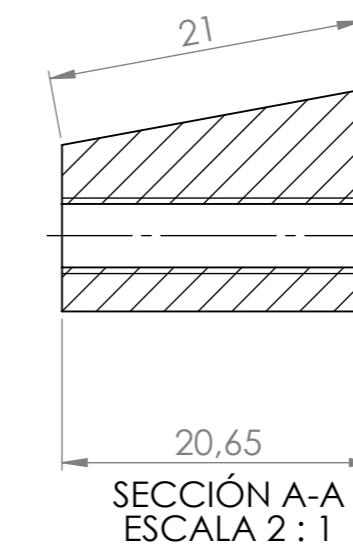
A

PIEZA 2: Soporte superior (E 1:1)

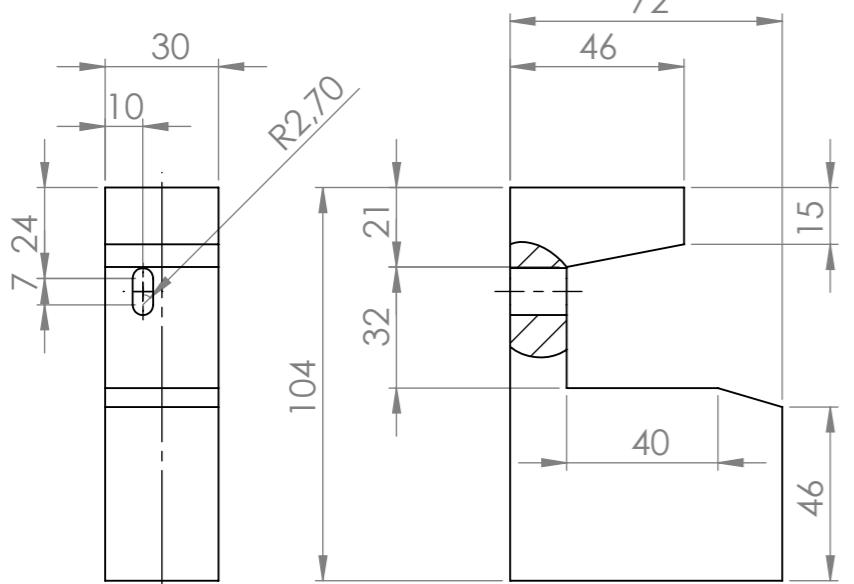


PIEZA 3: Pieza de ajuste (E 2:1)

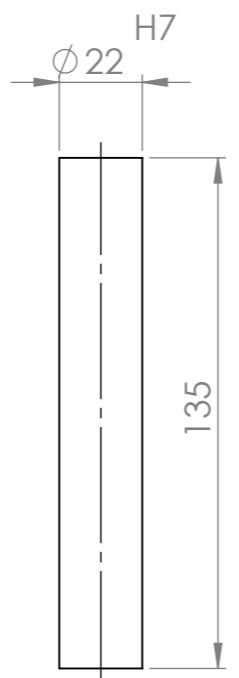
Agujero roscado profundidad 7 mm



PIEZA 1: Soporte inferior (E 1:2)

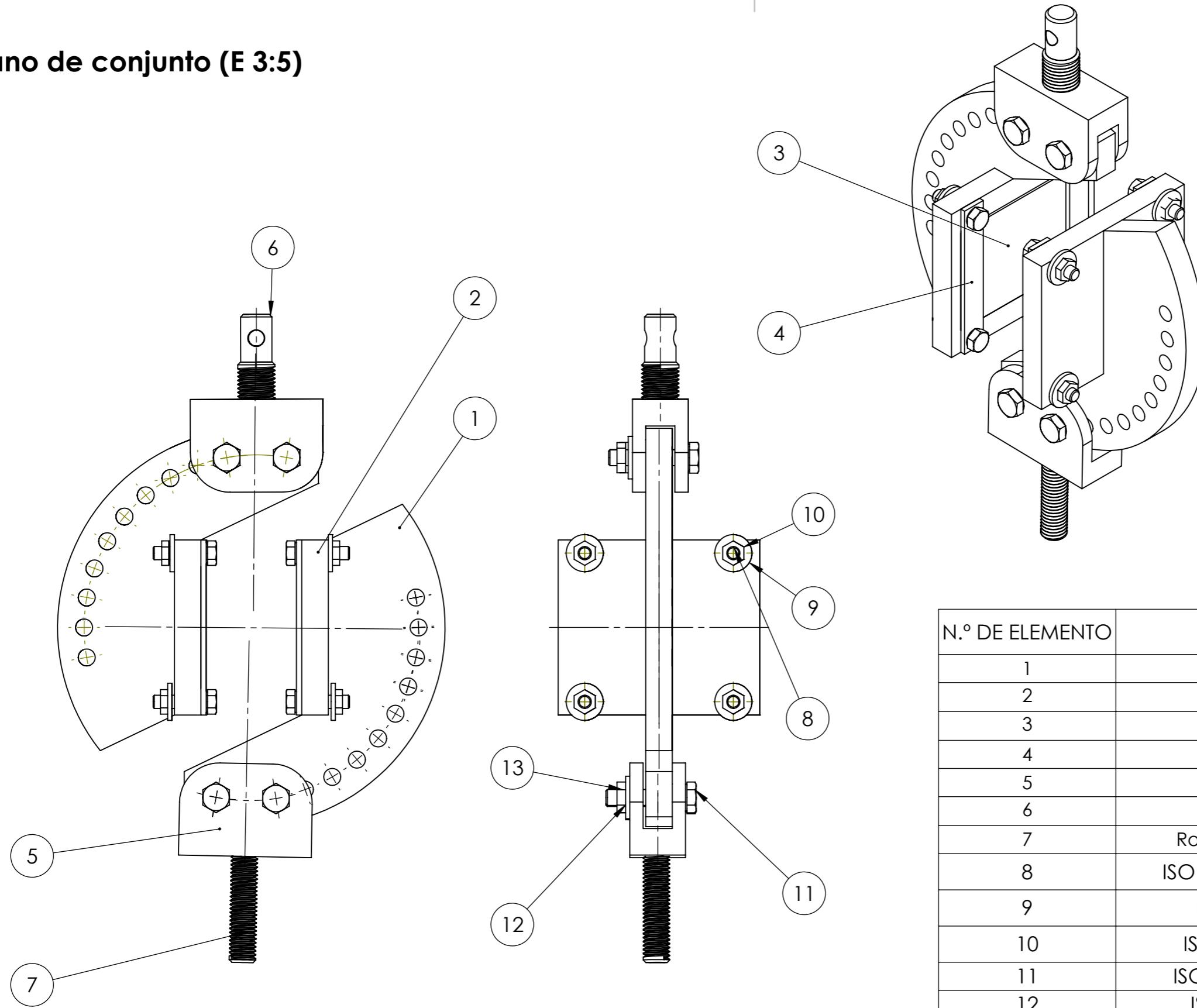


PIEZA 5: Cilindro (E 1:2)



NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.			Elementos utilaje
VERIF.			cizallamiento 2
APROB.			
FABR.			
CALID.			
			MATERIAL:
			N.º DE DIBUJO
			Plano_4.01
			PESO:
			A3

Plano de conjunto (E 3:5)



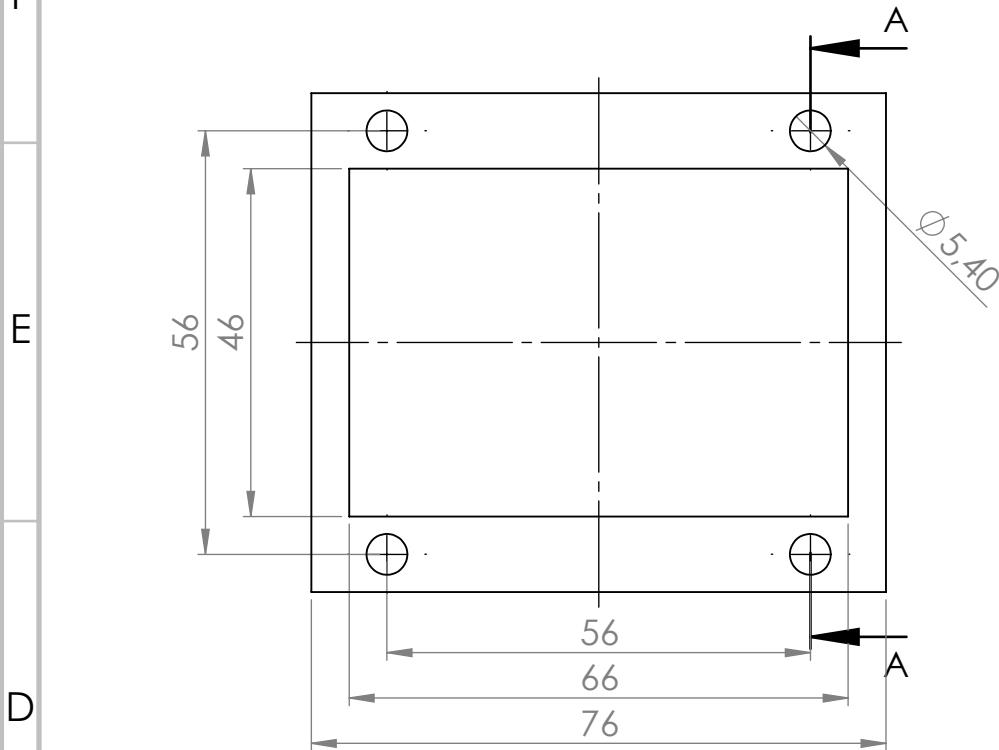
N.º DE ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Semidisco	2
2	Soporte	2
3	Chapa	8
4	Pletina	4
5	Amarre inferior	1
6	Amarre Superior	1
7	Rosca amarre inferior	1
8	ISO 4018 - M5 x 20-WC	8
9	ISO 10669-5.4-N	8
10	ISO - 4036 - M5 - N	8
11	ISO 4017 - M6 x 30-N	4
12	ISO 10669-7.15-N	4
13	ISO - 4036 - M6 - N	4

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:
DIBUJ.					Utilaje ensayo mixto
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO Plano_5	A3
		PESO:		ESCALA:3:5	

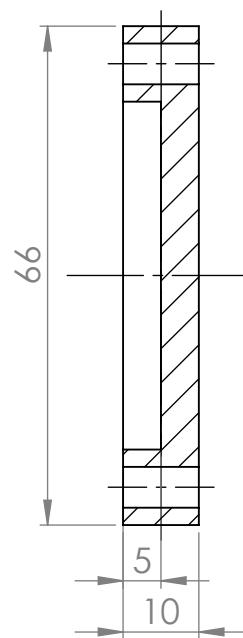
Uillaje ensayo mixto

4 3 2 1

PIEZA 2 : Soporte(E 1:1)

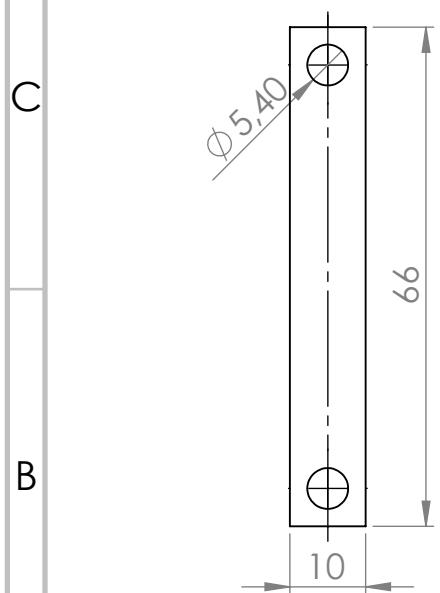


SECCIÓN A-A



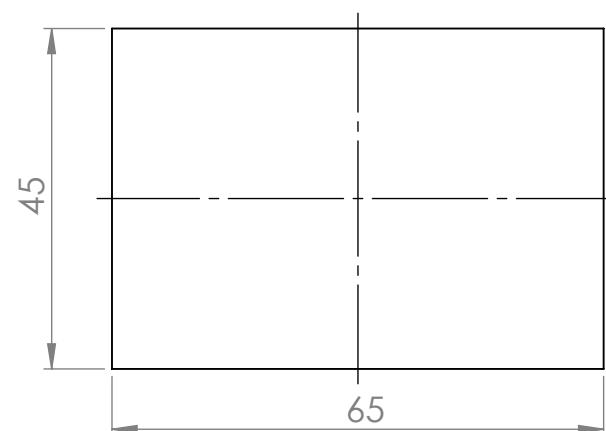
PIEZA 4: Pletina (E 1:1)

Espesor: 3mm



PIEZA 3: Chapa (E 1:1)

Espesor: 5mm

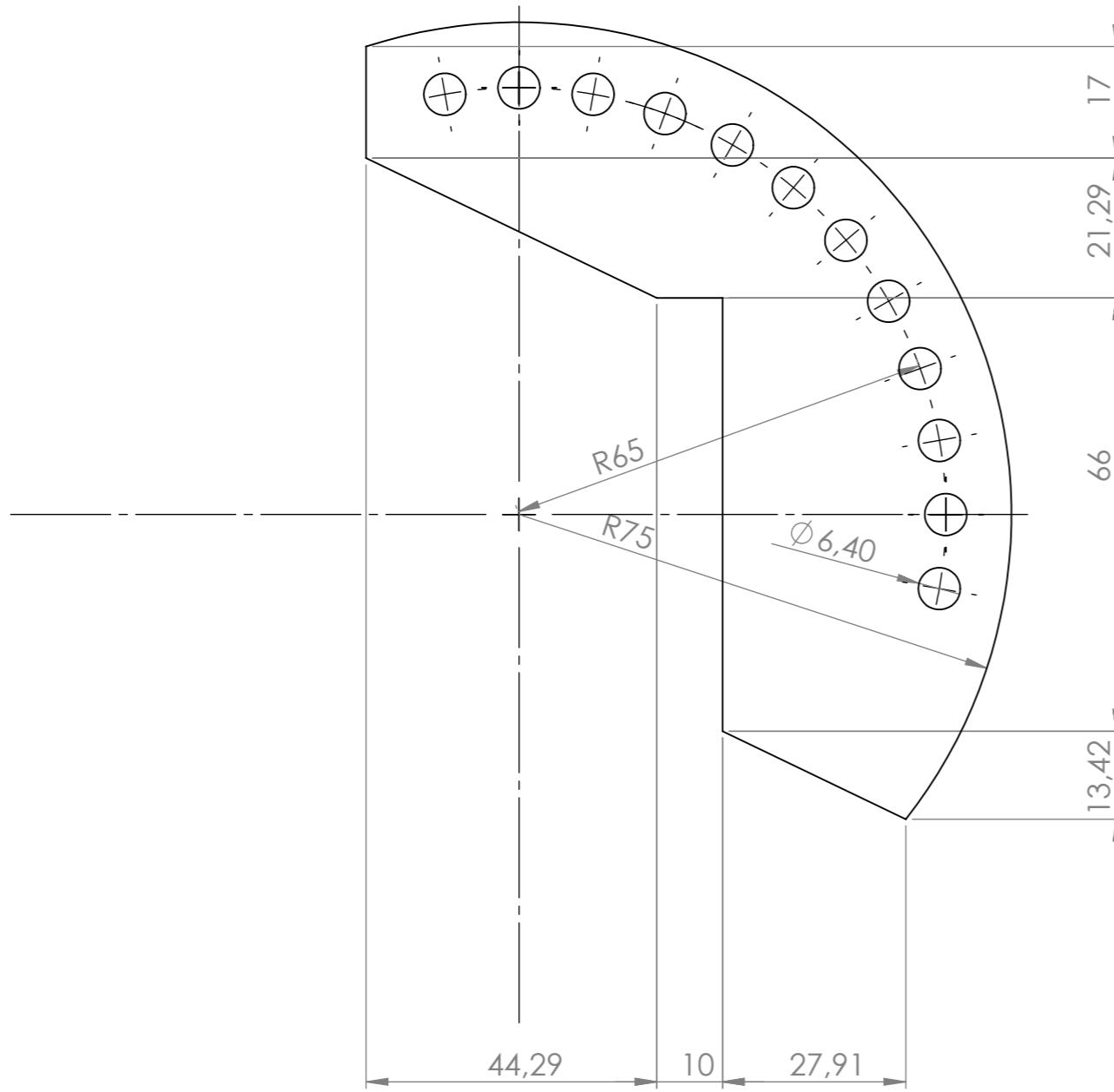


A	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:
Elementos ensayo
mixto
MATERIAL:
N.º DE DIBUJO
Plano_5.01
PESO:
A4

PIEZA 1: Semidisco (E 1:1)

Espesor 10mm
Arco entre agujeros 10°

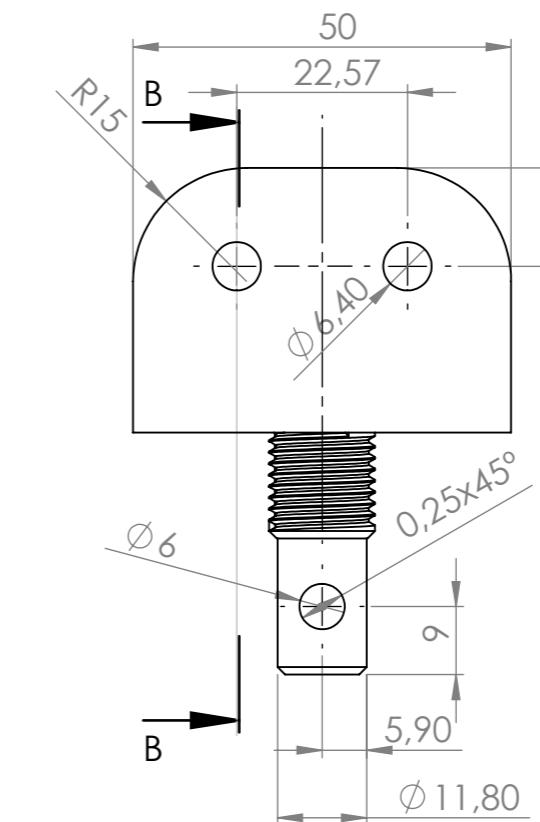


PIEZA 7:: Rosca amarre inferior

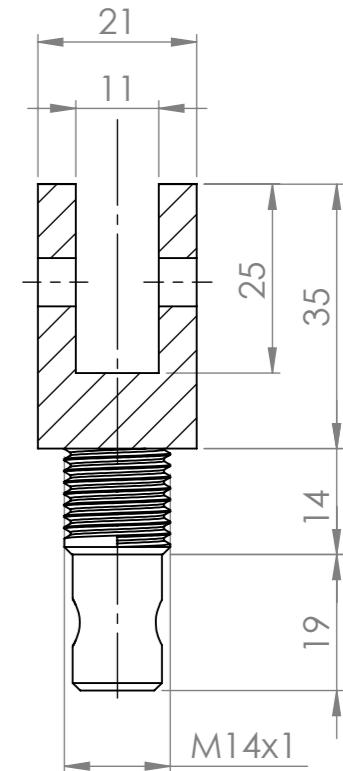
Cilindro roscado M10x1,5
Longitud 46mm

PIEZA 6: Amarre superior (E 1:1)

chaflanes no indicados 1x45°

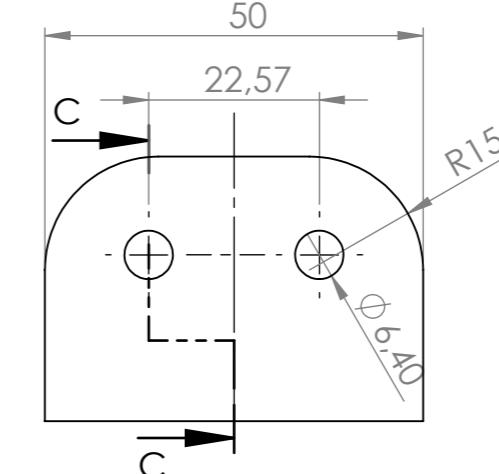


ECCIÓN B-B

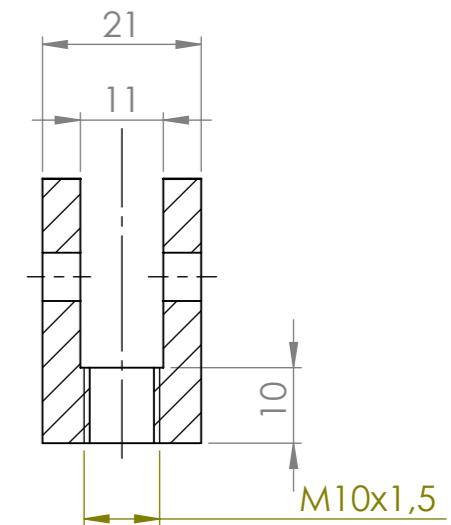


PIEZA 5: Amarre inferior (E 1:1)

chaflanes no indicados 1x45



SECCIÓN C-C



	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:
DIBUJ.						Elementos ensayo
VERIF.						mixto
APROB.						
FABR.						
CALID.			MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	
					Plano_5.02	A3
			PESO:			

TÍTULO:
**Elementos ensayo
mixto**