

MOLDEADO DE UNA PALA DE PÁDEL

Autor: Alonso Brizuela, Marcos

Tutor: Sinovas Herrarte, Carolina





Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Moldeado de una Pala de Pádel

Autor:

Alonso Brizuela, Marcos

Tutor:

Sinovas Herrarte, Carolina

Departamento:

**CMEIM, Expresión Gráfica en la
Ingeniería, ICGM, IM e Ingeniería de
los Procesos de Fabricación**

Área:

**Ingeniería de los Procesos de
Fabricación**

Valladolid, Mayo 2025



En primer lugar, agradecer a mi madre, que tiene más ganas de entregar este proyecto que yo. Gracias por tu incansable persistencia e incondicional apoyo, te quiero.

A mi hermana, mi padre, mi tía y mi abuela. Gracias por confiar en mí desde el principio y estar siempre orgullosos de mí, os quiero.

A mis amigos cercanos y mis compañeros de piso. Gracias por estar para cualquier cosa.

Y por supuesto, agradecimientos sinceros a Carolina, mi tutora, por hacer esto posible. Gracias por tu enorme paciencia y colaboración en todo momento.

Gracias de corazón a todo el que me ha acompañado en esta aventura. Sin vosotros no lo hubiera conseguido.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



RESUMEN

El presente proyecto aborda el desarrollo integral de una pala de pádel de alta gama orientada al segmento profesional, prestando especial atención al diseño y optimización del molde de fabricación. El proyecto incluye un análisis técnico del mercado, caracterización y selección avanzada de materiales compuestos, y modelado paramétrico de la pala en entorno CAD mediante CATIA V5. Se realiza una evaluación estructural detallada mediante Análisis de Elementos Finitos, lo que permite validar el comportamiento mecánico del conjunto. Asimismo, se propone un molde de fabricación optimizado desde el punto de vista geométrico, térmico y funcional, garantizando precisión dimensional, repetibilidad del proceso y eficiencia productiva. Se contempla además la viabilidad económica y el impacto ambiental del proceso.

El resultado es una solución técnicamente viable, alineada con los estándares de calidad y sostenibilidad del sector industrial del equipamiento deportivo.

PALABRAS CLAVE

Pala de Pádel
Pádel Profesional
Ingeniería de Materiales
Molde de Fabricación
Diseño CAD

ABSTRACT

The present project addresses the comprehensive development of a high-performance padel racket designed for professional use, with a strong emphasis on the design and optimization of the manufacturing mold. The study includes a technical market analysis, advanced characterization and selection of composite materials, and parametric modeling using CATIA V5. A detailed structural assessment through Finite Element Analysis validates the mechanical performance of the system. Furthermore, an optimized mold is proposed, considering geometric, thermal, and functional constraints to ensure dimensional accuracy, process repeatability, and production efficiency. Economic feasibility and environmental impact are also addressed.

The outcome is a technically and industrially viable solution, aligned with the quality and sustainability standards of the professional sports equipment industry.

KEY WORDS

Padel Racket
Professional Padel
Materials Engineering
Manufacturing Mold
CAD Design



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Historia del Pádel	1
1.1.1. El Inicio en México	1
1.1.2. La Expansión en España	2
1.1.3. El Auge en Argentina	2
1.1.4. Regulación y Profesionalización.....	3
1.1.5. Actualidad y Futuro	3
1.2. La Ingeniería del Pádel.....	4
1.2.1. Diseño y Construcción de Pistas.....	4
1.2.2. Innovación en Equipamiento.....	4
1.2.3. Tecnología Digital y Análisis de Rendimiento.....	5
1.2.4. Ingeniería y Pádel.....	5
1.3. Objeto del Proyecto	6
2. INFRAESTRUCTURA.....	8
2.1. Dimensiones de la pista.....	8
2.2. Red	9
2.3. Cerramientos	10
2.3.1. Fondos	10
2.3.2. Laterales	10
2.4. Suelo.....	12
2.5. Accesos	12
2.6. Zona de Seguridad y Juego Exterior	13
2.7. Iluminación	13
2.8. Orientación.....	14
3. PALA DE PÁDEL	15
3.1. Dimensiones Reglamentarias	15
3.2. Partes de la Pala.....	16
3.2.1. Cabeza	16
3.2.2. Marco	17
3.2.3. Puente.....	18
3.2.4. Puño	20



3.3. Tipos de Palas.....	21
3.3.1. Clasificación en función de la forma	21
3.3.2. Clasificación en función del estilo de juego	22
3.4. Factores de Influencia en la Pala	23
4. ESTUDIO DE MERCADO	25
4.1. Principales Fabricantes.....	25
4.2. Fabricantes Emergentes	39
4.3. Fabricantes Sostenibles.....	44
4.4. Conclusiones del estudio	46
4.4.1. Geometría	46
4.4.2. Materiales.....	47
4.4.3. Tecnologías.....	47
5. MATERIALES.....	48
5.1. Materiales del Núcleo	48
5.1.1. Etil vinil acetato	48
5.1.2. Espuma de Polietileno	52
5.2. Materiales del Perfil y Marco	56
5.2.1. Fibra de Carbono.....	56
5.2.2. Fibra de Vidrio	62
5.2.3. Fibra de Aramida (KEVLAR)	67
5.2.4. Fibra de Basalto	71
5.2.5. Grafeno	76
5.2.6. Fibra de Lino.....	80
5.2.7. Resinas Epoxi	84
6. FASE DE DISEÑO.....	92
6.1. PALA DE PÁDEL.....	92
6.1.1. Geometría	94
6.1.2. Dimensiones.....	94
6.1.3. Materiales.....	96
6.1.4. Tecnologías.....	99
6.2. MOLDE DE FABRICACIÓN.....	105
6.2.1 Geometría	105



6.2.2. Material.....	108
6.2.3. Elemento de acople para aberturas laterales.....	109
6.2.4. Ensamblado.....	112
7. PROCESOS DE FABRICACIÓN.....	117
7.1. Fabricación del Molde.....	117
7.2. Fabricación de la Pala de Pádel.....	118
7.2.1 Preparación de los materiales.....	118
7.2.2. Preparación del molde.....	118
7.2.3. Colocación de los materiales.....	119
7.2.4. Curado.....	120
7.2.5. Extracción del molde.....	121
7.2.6. Acabado superficial.....	121
7.2.7. Taladrado.....	122
7.2.8. Ensamblaje de la empuñadura.....	123
7.2.9. Control de calidad.....	124
8. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS.....	125
8.1. Condiciones de contorno.....	125
8.1.1. Material.....	125
8.1.2. Fuerza aplicada.....	128
8.2. Análisis de Elementos Finitos.....	132
8.3. Discusión de los resultados.....	140
9. PRESUPUESTO.....	141
10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	144
PLANOS.....	146
REFERENCIAS.....	161



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Primera pista de Pádel de la historia, Las Brisas, México.	1
Ilustración 2. Dimensiones reglamentarias de una pista de Pádel.....	8
Ilustración 3. Altura mínima libre de obstáculos reglamentaria en una pista de Pádel.	9
Ilustración 4. Condiciones y dimensiones reglamentarias de la red.....	9
Ilustración 5. Dimensiones reglamentarias de los fondos de una pista de Pádel.	10
Ilustración 6. Variante 1 de cerramientos laterales de cristal.....	11
Ilustración 7. Variante 2 de cerramientos laterales de cristal.....	11
Ilustración 8. Dimensiones reglamentarias para un único acceso lateral a la pista de Pádel.....	12
Ilustración 9. Dimensiones reglamentarias para dos accesos laterales a la pista de Pádel.....	13
Ilustración 10. Dimensiones reglamentarias de la zona de seguridad y juego exterior.	13
Ilustración 11. Altura mínima reglamentaria hasta los proyectores.	14
Ilustración 12. Ejemplo de pala con puente abierto, puente cerrado, puente con difusor y puente con pieza adherida.	19
Ilustración 13. Partes que componen una pala de Pádel.....	20
Ilustración 14. Ejemplo de pala con formato redondo, híbrido y diamante. ...	22
Ilustración 15. Punto Dulce y Balance en función de la geometría de la pala.	23
Ilustración 16. Aplicaciones de la Goma EVA en la actualidad.	51
Ilustración 17. Aplicaciones de la Espuma de PE en la actualidad.....	55
Ilustración 18. Aplicaciones de la fibra de carbono en la actualidad.	61
Ilustración 19. Aplicaciones de la fibra de vidrio en la actualidad.....	66
Ilustración 20. Aplicaciones del Kevlar en la actualidad.	71
Ilustración 21. Etapas en el proceso de obtención de la fibra de basalto.	74
Ilustración 22. Aplicaciones de la fibra de basalto en la actualidad.....	75
Ilustración 23. Aplicaciones del grafeno en la actualidad.	79
Ilustración 24. Planta Linum Usitatissimum, de la familia de las Lináceas. ...	80
Ilustración 25. Aplicaciones de la fibra de lino en la actualidad.	83
Ilustración 26. Recubrimiento con resina epoxi.	84
Ilustración 27. Aplicaciones de las resinas epoxi en la actualidad.	91
Ilustración 28. Alzado y Perfil del diseño propuesto para la pala de pádel.....	92
Ilustración 29. Vista Isométrica del diseño propuesto para la pala de pádel.	93
Ilustración 30. Dimensiones generales de la pala diseñada.....	95
Ilustración 31. Disposición del laminado de la cabeza de la pala.	98
Ilustración 32. Alzado y perfil derecho del diseño propuesto para la placa inferior del molde.	106



Ilustración 33. Vista isométrica del diseño propuesto para la placa inferior del molde.	107
Ilustración 34. Alzado, perfil y planta de la pieza de acople.....	110
Ilustración 35. Vista isométrica de la pieza de acople.....	110
Ilustración 36. Vista isométrica de la placa inferior del molde con las piezas de acople incorporadas.	111
Ilustración 37. Ejemplo de Filete Inserto HELICOIL.	112
Ilustración 38. Ejemplo horno prensa para curado de palas de pádel.	113
Ilustración 39. Vistas de la columna guía y tornillos M4.....	114
Ilustración 40. Vista isométrica de la unión columna con tornillos M4.....	114
Ilustración 41. Vista isométrica del molde superior.	115
Ilustración 42. Ensamblado del conjunto. Placa superior sobre placa inferior del molde.	116
Ilustración 43. Operación de troquelado del núcleo de la pala.....	118
Ilustración 44. Aplicación de agente desmoldeante sobre la superficie del molde.	119
Ilustración 45. Malla tubular del marco de la pala.....	119
Ilustración 46. Colocación del núcleo troquelado en el molde.....	120
Ilustración 47. Presurizado de los tubos de aire dentro de la malla tubular.	120
Ilustración 48. Operación de rebardado para eliminar el material sobrante.	121
Ilustración 49. Proceso de secado en la cámara de calor previo a pintura.	122
Ilustración 50. Operación de aplicación de pintura y colocación de calcas.	122
Ilustración 51. Operación de taladrado del patrón de agujereado.	123
Ilustración 52. Plástico termo-retráctil de la empuñadura.	123
Ilustración 53. Puntos propuestos de estudio para el análisis de elementos finitos.	132
Ilustración 54. Tamaño de la malla. Generative Structural Analysis.	133
Ilustración 55. Propiedades del material promedio equivalente. Generative Structural Analysis.	133
Ilustración 56. Fuerza equivalente al impacto de la pelota con la pala. Generative Structural Analysis.	134
Ilustración 57. Elementos fijos de la pala. Generative Structural Analysis. .	134



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química del Etileno Vinil Acetato.	48
Figura 2. Estructura química del Polietileno.	52
Figura 3. Estructura atómica de la fibra de carbono.	56
Figura 4. Formación de anillos de las respectivas unidades PAN.	57
Figura 5. Unión de las cadenas de anillos piridínicos.	57
Figura 6. Desprendimiento de átomos de nitrógeno e hidrógeno por acción del calor.	58
Figura 7. Etapas en la síntesis de la fibra de carbono.	58
Figura 8. Estructura química del vidrio.	62
Figura 9. Estructura química de un vidrio a base de sílice.	63
Figura 10. Estructura química de un monómero de Kevlar.	67
Figura 11. Reacción de polimerización del Kevlar.	68
Figura 12. Estructura química simplificada del piroxeno, olivino, anfíbol y feldespato.	72
Figura 13. Estructura molecular del grafeno.	76
Figura 14. Reducción química de óxido de grafeno.	77
Figura 15. Grupo Epoxi u oxirano [37].	85
Figura 16. Reacción entre compuesto con hidrógeno activo y la epiclorhidrina, y la posterior deshidrohalogenación.	85
Figura 17. Reacción de olefinas con peroxiácidos orgánicos [37].	85
Figura 18. Resinas epoxi a base de bisfenol A (DGEBA) [37].	86
Figura 19. Resinas epoxi a base de bisfenol F [37].	86
Figura 20. Resinas epoxi novolacas [37].	87
Figura 21. Bases epoxi a partir de compuestos nitrogenados [37].	87
Figura 22. Bases epoxi cicloalifáticas [37].	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los copolímeros EVA en función del contenido en VA (Boletín Técnico Repsol, 1995).....	49
Tabla 2. Influencia de la estructura molecular sobre las propiedades de los distintos tipos de PE (orientativo).	53
Tabla 3. Composición de los diferentes tipos de vidrio fibrado [26].....	64
Tabla 4. Propiedades típicas del Kevlar29 y 49 producido por DuPont [28]. .	69
Tabla 5. Composición química porcentual del basalto.	72
Tabla 6. Composición porcentual de los principales componentes de la fibra de lino.	81
Tabla 7. Materiales que conforman el laminado de la cabeza de la pala y su espesor.	97
Tabla 8. Tecnología 1: Aerosweep Contour.	99
Tabla 9. Tecnología 2: Multiflow Holes.....	100
Tabla 10. Tecnología 3: Powerbridge Core.....	101
Tabla 11. Tecnología 4: Ventcore Dynamic.....	102
Tabla 12. Tecnología 5: Shockguard Handle.	103
Tabla 13. Tecnología 6: Spinmax Surface.	104
Tabla 14. Clasificación de las aleaciones de aluminio. UNE-EN 573-1 2005[39].	108
Tabla 15. Propiedades de los materiales de la cabeza de la pala.....	127
Tabla 16. Propiedades mecánicas del material homogéneo equivalente....	127
Tabla 17. Coste de los materiales de la pala de pádel.....	141
Tabla 18. Coste de los materiales del molde y sus piezas.	141
Tabla 19. Coste de la fabricación del molde y sus piezas.	142
Tabla 20. Coste de la fabricación de la pala de pádel.	142
Tabla 21. Cuadro de precios global de la producción de una pala de pádel.	142



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Módulo Elástico Equivalente	126
Ecuación 2. Densidad Equivalente	126
Ecuación 3. Coeficiente de Poisson Equivalente	126
Ecuación 4. Límite Elástico Equivalente.....	127
Ecuación 5. Segunda Ley de Newton	128
Ecuación 6. Segunda Ley de Newton (Diferencial).....	128
Ecuación 7. Segunda Ley de Newton (Integral)	128
Ecuación 8. Fuerza media equivalente en un intervalo de tiempo	128
Ecuación 9. Factor de conversión velocidad.....	129
Ecuación 10. Radio de Contacto Aproximado.....	130
Ecuación 11. Área de contacto	130
Ecuación 12. Presión	131

1. INTRODUCCIÓN

El pádel es una disciplina deportiva, que ha experimentado un tremendo auge durante los últimos años. Se trata de un deporte de raqueta, combinación entre el tenis y el squash, que se juega en parejas dentro de una pista cerrada por paredes, las cuales, generalmente de vidrio y malla metálica, forman parte del propio juego, permitiendo a la pelota rebotar en ellas para la continuación de los puntos.

En la actualidad, el pádel es un deporte en continuo crecimiento a nivel mundial, especialmente en Europa y América Latina, lo que resulta en una posibilidad de innovación tecnológica muy a tener en cuenta, tanto en el equipamiento para jugar, como en su infraestructura.

1.1. Historia del Pádel

El origen del pádel es singular y destacado, remontándose a mediados del siglo XX. Se le atribuye a Enrique Corcuera, un contratista de Acapulco, Méjico, quien, en 1969 [1], decidió adaptar un terreno de su propiedad en Las Brisas, dando lugar a este nuevo deporte.

1.1.1. El Inicio en México

Enrique Corcuera, poseía en su finca un terreno de 20 metros de largo por 10 metros de ancho, en el que practicaba habitualmente frontón, utilizando una pared de 3 metros de altura situada en un extremo del terreno. Enrique, enamorado de este deporte, pero cansado de que la pelota con la que jugaban se colara continuamente en la propiedad del vecino [2], decidió levantar una pared de unos 3 metros de altura en el extremo contrario del terreno, además de cerrar los laterales con paredes de altura media, consiguiendo de esta manera que la pelota se mantuviera en su propiedad, y evitando que la vegetación invadiera la pista.



Ilustración 1. Primera pista de Pádel de la historia, Las Brisas, México.



Enrique, observó que, tras las modificaciones realizadas, los jugadores esperaban el rebote de la pelota sobre el nuevo muro, antes de golpearla. Este hecho inspiró a Enrique a incorporar una red en el medio de la pista, creando así el concepto del Pádel como deporte.

Corcuera bautizó a este nuevo deporte como "Paddle-Tennis" y estableció reglas básicas similares a las del Tenis, con la novedad de que ahora las paredes forman parte del juego, permitiendo a la pelota rebotar sobre ellas.

De esta forma surgió el deporte que hoy en día se conoce como Pádel, haciendo de este un deporte de características únicas entre los demás deportes de raqueta.

1.1.2. La Expansión en España

El deporte se mantuvo como una curiosidad local hasta que un amigo español de Corcuera, Alfonso Hohenlohe [1], lo descubrió durante una visita a Acapulco. Hohenlohe quedó tan impresionado por el juego que decidió llevar la idea a España.

En 1974, tras adaptar algunas de las reglas y perfeccionar algún aspecto del juego, construyó las primeras pistas de pádel en el Marbella Club, un exclusivo club de la Costa del Sol, iniciando la expansión del nuevo deporte en España.

El pádel ganó rápidamente popularidad entre la élite social del país, especialmente en Marbella y otras zonas de la Costa del Sol. A medida que más personas lo jugaban y disfrutaban, comenzaron a construirse pistas en otros clubes y ciudades, y el pádel empezó a crecer rápidamente en diferentes localidades: Andalucía, Madrid, Barcelona, Galicia, País Vasco, etc.

1.1.3. El Auge en Argentina

El Pádel llegó a Argentina en 1975, cuando Julio Menditengui [1], un argentino adinerado frecuente de Marbella queda tan fascinado por el éxito de este deporte en la Costa del Sol, que apuesta por llevar el pádel a su país natal. Pero no fue hasta principios de los años 80 cuando este deporte causó sensación en el país, convirtiéndose el Pádel en un fenómeno social, y siendo Argentina un pilar fundamental para el desarrollo del deporte.

A pesar de que España y Argentina continúan siendo los epicentros de este deporte, su creciente popularidad se ha extendido por diferentes países alrededor del mundo, tales como Italia, Suecia, Francia y Méjico entre otros, llegando incluso a Asia y América del Norte.



1.1.4. Regulación y Profesionalización

A raíz del éxito y creciente popularidad del deporte, surgió la necesidad de estandarizar las reglas de este y regular su actividad profesional organizando competiciones.

En 1991 se creó en Madrid la Federación Internacional de Pádel (FIP) [1], al mando del español Julio Alegría Artiach, persona fundamental en la evolución del deporte, creador del primer circuito de encuentros internacionales, y de concretar un reglamento de juego internacional.

En 1993 el pádel da un enorme paso para su consolidación, siendo reconocido como modalidad deportiva por el Consejo Superior de Deportes.

Del mismo modo, posteriormente en 2005 nació el primer circuito de pádel profesional, el Pádel Pro Tour (PPT) [1], el cual se disputaba en España y Argentina. Para finalmente comenzar en 2013 el primer circuito World Pádel Tour, considerado como la principal competición profesional de Pádel a nivel mundial, que reúne a los mejores jugadores del mundo.

Sin embargo, en el año 2022 surge el Premier Pádel Tour, siendo este el principal competidor de WPT, el cual rápidamente se extendió a nivel global, acaparando la élite de los jugadores en el mundo, ganándose el reconocimiento de circuito oficial por parte de la FIP.

1.1.5. Actualidad y Futuro

El origen del pádel es un ejemplo fascinante de cómo un deporte puede nacer de la creatividad y adaptarse para crecer hasta convertirse en un fenómeno mundial. Desde su modesto comienzo en un jardín de Acapulco, el pádel ha recorrido un largo camino para convertirse en uno de los deportes de mayor crecimiento en el mundo.

Hoy en día, el Pádel tiene más de 30 millones de practicantes en todo el mundo [3], con más de 600.000 federados, de los cuales el 59 % se encuentra en Europa, seguido de un 23 % en Sudamérica, un 7 % en América del Norte y Central, otro 7 % en Asia y un 4 % en África.

El deporte se practica en 130 países, estimándose un número total de pistas cercano a 63.000, y con casi 20.000 clubes diferentes. Desde 2022 el número de clubes de Pádel asociados a federaciones nacionales ha aumentado en un 48 %, además de que el número de países en que se practicaba Pádel era de unos 90.

En definitiva, el Pádel es uno de los deportes actuales, con un crecimiento sin precedentes, y lleno de posibilidades desde el punto de vista de la ingeniería, y que trataremos en este Trabajo de Fin de Grado.



1.2. La Ingeniería del Pádel

La ingeniería toma un papel fundamental en el desarrollo y la evolución del Pádel, desde el diseño y construcción de las pistas de juego, hasta la continua innovación en el equipamiento y la integración de tecnologías punteras para mejorar el rendimiento y con ello la experiencia de los jugadores, siendo las principales áreas de influencia las mencionadas a continuación.

1.2.1. Diseño y Construcción de Pistas

Los materiales de la superficie juegan un factor clave, tanto en el movimiento de la pelota como en el desplazamiento de los jugadores, de forma que se han desarrollado superficies que ofrecen mejor agarre, amortiguación y resistencia, mejorando las prestaciones del juego.

De la misma manera, las paredes son una parte crucial del juego, comúnmente construidas de vidrio templado y malla metálica. La ingeniería de materiales permite el desarrollo de vidrios de mayor resistencia y durabilidad, capaces de soportar fuertes impactos, que proporcionen una buena visibilidad. Lo mismo ocurre con la optimización de la malla metálica.

Una correcta iluminación de la pista es fundamental, la cual gracias a la adopción de luces LED, ahora la visibilidad durante las horas nocturnas se ha visto mejorada, reduciendo el consumo de energía. Algunas pistas interiores, cuentan con sistemas de climatización que permiten el juego en condiciones de confort, pero suelen ser instalaciones de alto nivel.

1.2.2. Innovación en Equipamiento

Los materiales empleados en las palas de pádel están en continuo estudio y evolución, gracias al uso de materiales como fibra de carbono, fibra de vidrio, grafeno y otros compuestos, ha sido posible la creación de palas más ligeras, resistentes y con mejores propiedades mecánicas, que aportan mejores prestaciones al juego.

Así mismo el diseño de la pala es de gran importancia, ya que una buena optimización de la forma y distribución del peso son factores relevantes durante el partido. Mediante estudios aerodinámicos y estructurales, es posible mejorar la manejabilidad de esta y reducir el esfuerzo físico requerido por los jugadores.

Igual de importante son las condiciones en las que se encuentran las bolas de juego, las cuales están diseñadas para mantener una presión constante y una buena durabilidad. A través de nuevas tecnologías y materiales, se desarrollan bolas con mayor resistencia al desgaste.



1.2.3. Tecnología Digital y Análisis de Rendimiento

Gracias a la ingeniería, es posible la incorporación de sensores en las palas, permitiendo medir y analizar diversos aspectos del juego, como la velocidad del swing, la fuerza de golpeo, la ubicación de impacto en la pala, etc. Todos ellos de gran interés para los jugadores, sobre todo profesionales.

Así mismo existen equipaciones deportivas inteligentes, con sensores integrados que aportan información biomecánica del jugador, registrando datos como la postura, el movimiento y esfuerzo físico, ofreciendo a el jugador detalles sobre su rendimiento y áreas de mejora.

Estos datos recopilados por los sensores son procesados a través de softwares de análisis, programas que generan informes detallados del juego, útiles para jugadores y cuerpo técnico que pretendan mejorar su juego, analizando técnicas tácticas y errores.

1.2.4. Ingeniería y Pádel

La ingeniería ha sido y continuará siendo un motor clave en la evolución del pádel, mejorando todos los aspectos del deporte, desde la construcción de las pistas hasta el equipamiento y el análisis de rendimiento. Las innovaciones actuales y las que están por venir no solo hacen que el juego sea más emocionante y accesible, sino que también abren nuevas posibilidades para su expansión global y su adopción como un deporte altamente tecnificado y competitivo.



1.3. Objeto del Proyecto

Antes de comenzar con el desarrollo del proyecto, es imperativo determinar los objetivos básicos para una adecuada orientación de este. A continuación, se plantean las diferentes metas que se desean lograr.

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado resulta en un desarrollo de producto, en concreto una pala de pádel de alta gama y su correspondiente molde, enfocada para jugadores de nivel profesional, sin diferenciar por género.

Para alcanzar el éxito en cuanto a diseño y materiales, es importante conocer el producto ofertado en el mercado actualmente. Será necesario llevar a cabo un estudio a conciencia de aquellas palas con más demanda en el mercado y de mayor presencia en competiciones profesionales, para poder recopilar información acerca de las últimas tecnologías empleadas, de los materiales que aportan mejores prestaciones, así como de las preferencias del consumidor.

Una vez evaluado el mercado, y barajado la geometría deseada para el diseño de la pala, se desarrollará el diseño 3D de la misma, empleando en este caso el software de diseño CATIA V.5. Se desarrollarán los correspondientes planos asociados a la geometría diseñada.

Posteriormente, será de vital importancia realizar un estudio exhaustivo de los materiales a incorporar, comparando las propiedades que aportan cada uno de ellos y planteando diferentes combinaciones entre ellos. Se deberá concretar la funcionalidad que se quiere otorgar a la pala para emplear materiales que se adecuen a la forma de actuar deseada, además de orientarla hacia un tipo de jugador u otro.

Tras una correcta elección de materiales, habiendo atendido a varias posibilidades, se establecerá método de fabricación adaptado al diseño, a través de la creación del molde propio de la pala.

El reto será tratar de optimizar el sistema de fabricación presente en el mercado, con ánimo de obtener una pala de la mayor calidad posible, utilizando un proceso de fabricación sostenible, con un aprovechamiento óptimo de recursos materiales y humanos durante este. A su vez, se tendrá muy en cuenta las tolerancias geométricas y acabados superficiales del conjunto, con ánimo de conseguir un producto final de calidad técnica apropiada. Para ello se tratará de diseñar y optimizar, de nuevo a través de CATIA V.5, un molde de fabricación para la pala capaz de aportar los requerimientos mencionados.



También se llevará a cabo un análisis de elementos finitos para observar el comportamiento global de la pala, por medio de la herramienta Generative Structural Analysis disponible en el propio software CATIA V.5.

Para finalizar, se realizará el estudio de viabilidad de la pala. Atendiendo al coste de mecanizado del molde, así como el coste de los materiales empleados en la fabricación, y se realizará el presupuesto para la producción de una pala de pádel.

2. INFRAESTRUCTURA

Previamente se mencionó la estrecha relación de la ingeniería con el pádel, y como esta afecta con creces a la infraestructura que envuelve al deporte. El objetivo del proyecto se enfoca hacia el ámbito profesional, por ello, a continuación, se pone en conocimiento el reglamento vigente, aplicado a las diferentes partes que forman la infraestructura, para adecuar posteriormente las necesidades de la pala a dichas normas, todas ellas obtenidas del reglamento de juego de pádel, establecido por la Federación Internacional de Pádel en 2021 [4].

2.1. Dimensiones de la pista

El área de juego trata de un rectángulo de 10 metros de ancho por 20 metros de largo, siendo estas las medidas interiores, con una tolerancia de 0,5 %, el cual está cerrado por todos sus lados.

El rectángulo se encuentra dividido a su vez por una red situada en el medio. A ambos lados de ella, paralelas a la misma, y con una distancia de 6,95 metros, están las líneas de servicio. La zona presente entre red y líneas de servicio está dividida en su mitad con una línea perpendicular a estas, conocida como línea central de saque, la cual se prolonga 20 cm por detrás de la línea de servicio.

Es imperativo que las dos mitades del campo sean totalmente simétricas, tanto en superficies como en el trazado de líneas. Las líneas tendrán un trazado de 5 cm, y deben de ser de un color con contraste evidente con el color del suelo.

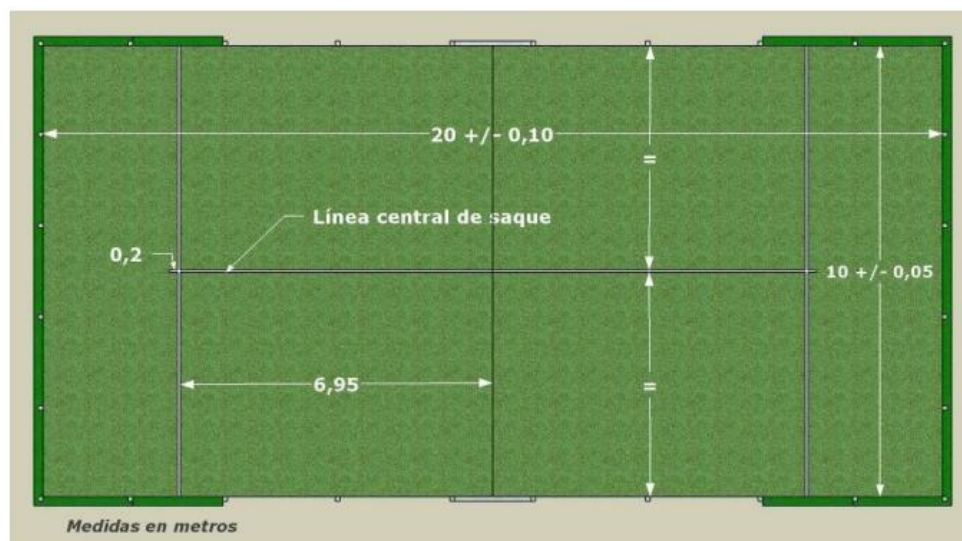


Ilustración 2. Dimensiones reglamentarias de una pista de Pádel.

La altura mínima libre obligatoria será de 6 metros en a lo largo de toda la pista, sin la presencia de ningún elemento que invada dicho espacio, incluyendo focos.



Ilustración 3. Altura mínima libre de obstáculos reglamentaria en una pista de Pádel.

2.2. Red

La red tendrá una longitud de 10 metros, con una altura de 0,88 metros en la parte central, y hasta un máximo de 0,92 metros en los extremos, siendo su tolerancia máxima de 0,005 metros.

Se encuentra suspendida por un cable metálico de máximo 0,01 metros de diámetro, cuyos extremos permanecen unidos a dos postes laterales de altura máxima 1,05 metros, los cuales tienen su cara exterior coincidiendo con los límites laterales de la pista. Además, poseen un dispositivo para aportar tensión al cable.

La zona superior de la red se remata con una banda superior blanca de anchura entre 5,0 y 6,3 cm, por el interior de la cual va el cable de sujeción de la red.

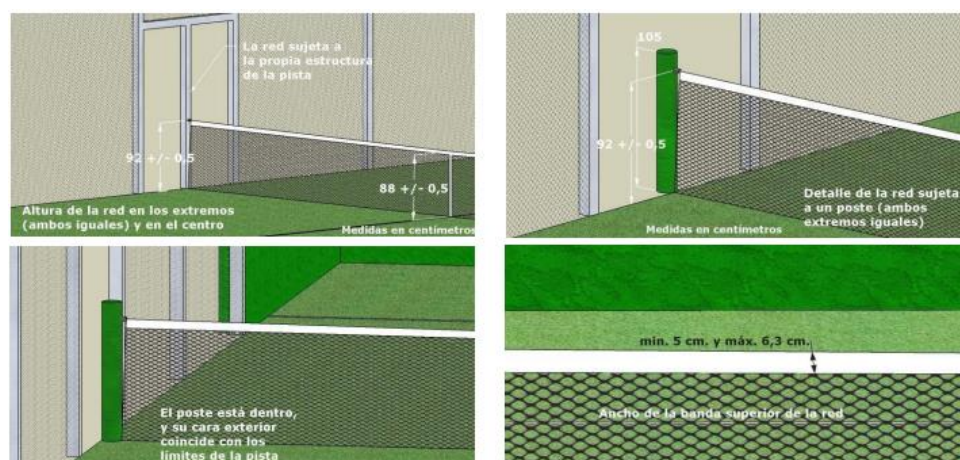


Ilustración 4. Condiciones y dimensiones reglamentarias de la red.

2.3. Cerramientos

El área de juego se encuentra cerrada en su totalidad, por fondos de 10 metros de longitud interior y por laterales de 20 metros de longitud interior.

En todos los cerramientos existen áreas construidas con materiales que garantizan un rebote regular de la pelota, junto con secciones de malla metálica donde la pelota rebota de forma irregular. Los cerramientos se dividen en fondo y laterales.

2.3.1. Fondos

Los cerramientos de fondo alcanzan una altura total de 4 metros, siendo los tres primeros metros una pared de cualquier material transparente u opaco (cristal, ladrillo, etc.), siempre que sus características cumplan con los requisitos exigidos en los laterales. El último metro restante, está compuesto de malla metálica.



Ilustración 5. Dimensiones reglamentarias de los fondos de una pista de Pádel.

2.3.2. Laterales

Reglamentariamente son posibles dos variantes en los cerramientos laterales. Actualmente el uso de cerramiento de cristal templado es muy mayoritario al ladrillo.

- Variante 1 Cristal: En ambos extremos zonas de pared de 3 metros de altura por 4 metros de longitud, sin escalón, con zona de malla metálica hasta 4 metros de altura en los dos extremos.

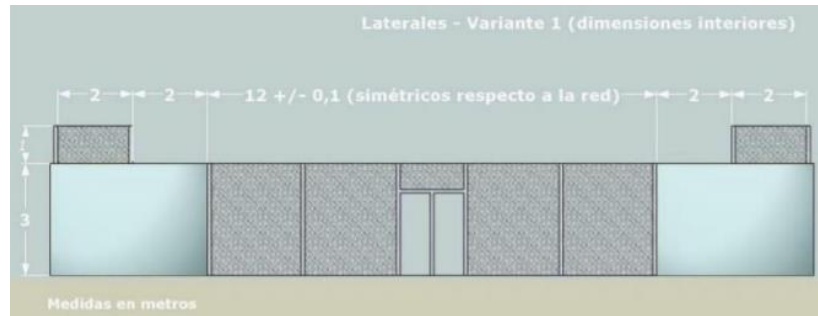


Ilustración 6. Variante 1 de cerramientos laterales de cristal.

- Variante 2 Cristal: La diferencia frente a la primera variante es que, ahora la zona de malla metálica completa hasta 4 metros de altura en toda la longitud del cerramiento.

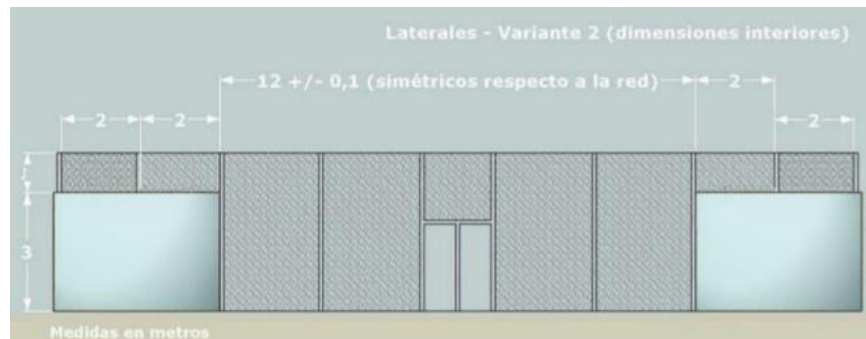


Ilustración 7. Variante 2 de cerramientos laterales de cristal.

Las dimensiones se muestran desde el interior de la pista.

La malla metálica se coloca alineada con la cara interior de las paredes, y deberá ser romboidal o cuadrada, pudiendo ser de torsión o electrosoldada, siempre que el tamaño de su abertura (medida de las diagonales) no esté por debajo de 5 cm ni por encima de 7,08 cm. Es obligatorio que la malla tenga una tensión la cual permita el rebote de la pelota sobre ella, para ello, el diámetro del hilo de acero empleado debe rondar entre 1,6 mm y 3 mm, permitiendo hasta un máximo de 4 mm.

Las paredes podrán ser de cualquier material transparente u opaco (cristal, ladrillo, etc.) siempre que cumplan con las correspondientes condiciones de consistencia y rebote de la pelota, siendo este regular y uniforme. Todo material deberá tener un acabado superficial uniforme, duro y liso sin presencia de rugosidades, que permita el contacto, roce y deslizamiento de pelotas, manos y cuerpos.

2.4. Suelo

La superficie de la pista será de cualquier material o mezcla de ellos, siempre que este permita el bote regular de la pelota, siendo las superficies más comunes de hormigón poroso, cemento, madera, materiales sintéticos, césped artificial, etc.

El color del suelo debe ser único, uniforme y claramente diferente del color de los cerramientos, y preferencialmente verde, azul o pardo-terroso en sus variantes de tonalidades. El color negro podrá ser aceptado solo en instalaciones interiores.

En caso de hierba artificial, se realiza un relleno de la superficie con arena, cumpliendo con los requisitos pertinentes.

2.5. Accesos

Los accesos a la pista pueden ubicarse en ambos laterales o en uno solo, y en cada uno de los laterales son simétricos en relación con su centro. Podrá haber una o dos aberturas por lateral, con o sin puerta. En cualquier caso, las dimensiones de las aberturas deben ser:

- Un solo acceso por lateral: El hueco libre de mínimo 1,05 x 2,00 metros, y un máximo de 2,00 x 2,20 metros.

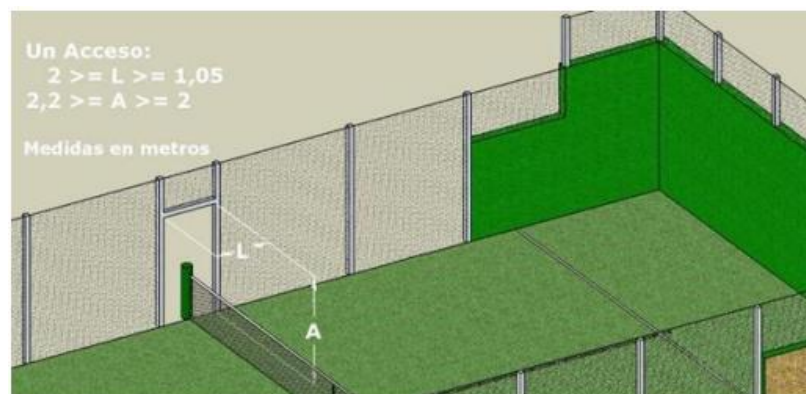


Ilustración 8. Dimensiones reglamentarias para un único acceso lateral a la pista de Pádel.

- Dos accesos por lateral: Cada hueco libre de mínimo 0,72 x 2,00 metros y un máximo de 1,00 x 2,20 metros.

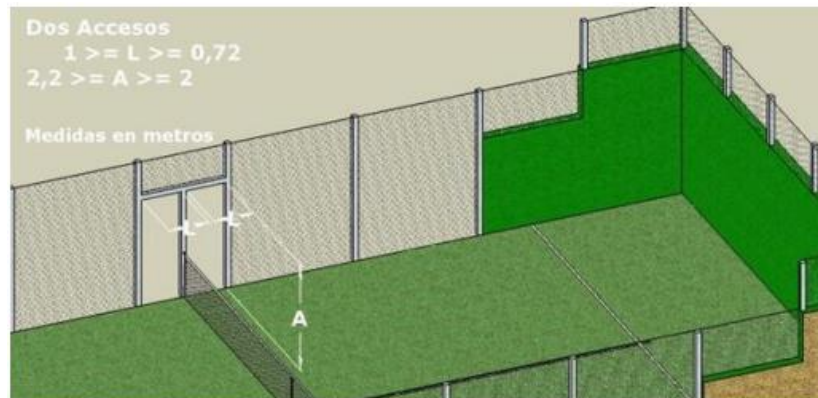


Ilustración 9. Dimensiones reglamentarias para dos accesos laterales a la pista de Pádel.

Si en el acceso existen puertas, las manillas se encontrarán en la parte exterior a la pista.

2.6. Zona de Seguridad y Juego Exterior

Ambos laterales de la pista deberán contar con aberturas de acceso, y no podrá existir ningún obstáculo físico que impida la salida de la pista o que esté situado fuera de ella en el espacio de mínima seguridad, de 2 metros de ancho, 4 metros de largo a cada lado, y 3 metros de altura, como se muestra en la figura a continuación.

Además, las aberturas se encontrarán protegidas en sus tres lados, laterales y superior, así como los postes de fijación, mediante un producto de amortiguación contra golpes, de un espesor no inferior a 2 cm.

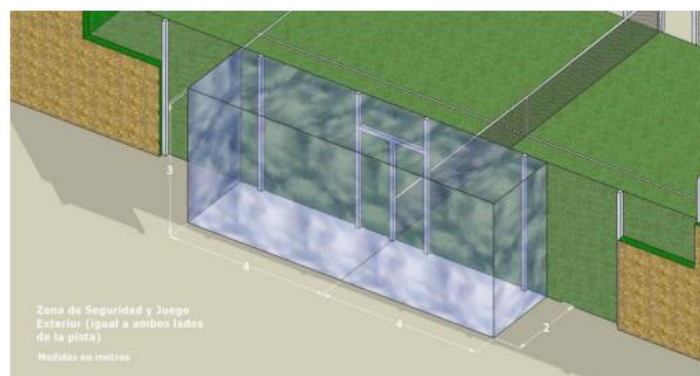


Ilustración 10. Dimensiones reglamentarias de la zona de seguridad y juego exterior.

2.7. Iluminación

La iluminación artificial deberá ser uniforme, sin dificultar la visión de los jugadores, del equipo arbitral o de los espectadores

Las columnas de iluminación están situadas fuera de la pista, en caso de encontrarse en la zona de seguridad, no se permitirá el juego exterior. Además, la altura mínima desde el suelo hasta la parte inferior de los focos deberá ser de 6 metros.

La iluminancia media sobre la pista en competiciones tiene que ser de mínimo 500 lux en instalaciones exteriores, y 750 lux en instalaciones interiores. Para competiciones retransmitidas por TV, se requerirá un nivel de iluminancia de al menos 1000 lux.

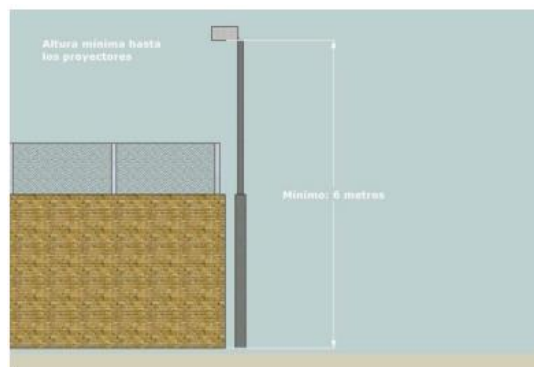


Ilustración 11. Altura mínima reglamentaria hasta los proyectores.

2.8. Orientación

Recomendable que el eje longitudinal del campo en instalaciones al aire libre sea Norte-Sur, admitiéndose también las variaciones Norte-Noreste y Norte-Noroeste.



3. PALA DE PÁDEL

Lo que hoy en día se conoce como una pala de pádel, consiste en un material compuesto por un núcleo de espuma polimérica cuya densidad puede variar, recubierto por fibras sintéticas de materiales compuestos, frecuentemente la fibra de carbono y la fibra de vidrio.

De tal manera que, la diferente combinación de los materiales que componen la pala será el factor determinante en la calidad y propiedades finales de esta. Sin embargo, existen múltiples factores influyentes en el comportamiento de una pala de pádel, los cuales se desarrollarán durante el proyecto.

3.1. Dimensiones Reglamentarias

Si bien, previamente se determinó que la pala de pádel a diseñar iba destinada a jugadores profesionales, es por ello por lo que, para poder emplear la pala en competiciones a nivel nacional e internacional, es necesario cumplir con las dimensiones impuestas por la Federación Internacional de Pádel (F.I.P.) en el reglamento de juego [4].

En partidos profesionales, se jugará con una pala de pádel reglamentaria, la cual deberá ajustarse a los requisitos indicados a continuación:

1. La pala está compuesta por dos partes, la cabeza y el puño.
2. La longitud máxima del puño no puede exceder los 20 cm, con un ancho y grosor máximo de 50 mm.
3. La cabeza puede tener longitud variable, siempre que el largo de la cabeza más el largo del puño no superen los 45,5 cm. El ancho máximo de la cabeza será de 26 cm, con un grosor máximo de 38 mm.
4. El largo total de la pala (cabeza más puño) deberá estar por debajo de 45,5 cm.
5. Se permite una tolerancia en el grosor de la pala del 2,5 %.
6. La superficie de golpeo estará perforada por un número ilimitado de agujeros cilíndricos de 9 a 13 mm de diámetro cada uno, con un número mínimo obligatorio de un agujero.
7. La superficie de golpeo, igual en ambas caras, puede ser lisa o rugosa.
8. La pala no puede presentar elementos adheridos u otros elementos cuya finalidad no sea específicamente limitar o prevenir deterioros, vibraciones y distribuir el peso. Al igual que tampoco puede ser motivo de distracción o molestia para los demás jugadores.
9. Debe disponer de un cordón o correa no elástica, como elemento de sujeción a la muñeca con objeto de prevenir accidentes. Su uso es obligatorio, y tiene una longitud máxima de 35 cm.

10. La pala debe de estar libre de cualquier tipo de dispositivo que permita la comunicación del jugador con el exterior durante el transcurso del partido.

Una vez determinados los requisitos que debe cumplir una pala reglamentaria, se evaluarán otros factores influyentes en las prestaciones finales de esta.

3.2. Partes de la Pala

3.2.1. Cabeza

La cabeza conforma la superficie principal de la pala, y a su vez se encuentra dividida en dos partes [5]:

Núcleo: Se trata del interior de la pala, siendo uno de los elementos más importantes que determinará el comportamiento de esta, ya que, en función del material empleado y su densidad, proporcionará diferentes niveles de dureza, absorción de vibraciones y rebote de la pelota. Las principales espumas empleadas en el interior de las palas son las siguientes:

- Núcleo de Goma EVA (Etilvinilacetato): Actualmente es líder en el mercado, y se trata de un polímero termoplástico conformado por capas de etileno y acetato de vinilo. Se encuentra disponible en multitud de densidades, aportando de esta manera flexibilidad en la dureza de la pala, y suelen tener una vida útil mayor debido a su resistencia, superior a otro tipo de espumas.
- Núcleo de Goma FOAM: A diferencia de la Goma EVA, la espuma FOAM está elaborada fundamentalmente a base de polietileno, lo que hace de esta un material más blando. Sin embargo, este tacto blando permite una buena salida de bola, y tiene una mejor capacidad para amortiguar las vibraciones que la Goma EVA.

La aplicación de una u otra goma determinará factores como el ruido, tacto, vibraciones o dureza de la pala, siendo de gran importancia tener en cuenta las diferencias entre ambas, y el objetivo final para la pala.

Plano: Conformar toda la superficie de impacto de la pala, parte con la que se realiza el golpeo de la pelota, y, por ende, aspecto directamente influyente en la dirección, potencia y efecto que aportará la pala a la pelota.

La superficie del plano se encuentra perforada con agujeros cilíndricos, que aportan una mejor aerodinámica y manejabilidad en el movimiento de la pala. Además, está compuesto por materiales laminados, determinantes en la flexibilidad del plano, resistencia y durabilidad de la pala, haciendo que el comportamiento de esta se incline hacia posturas de control o de potencia. Si



bien, la fibra de carbono es el material por excelencia en el mercado, hay diversas posibilidades de materiales para formar el plano de una pala, a continuación, se muestran varias:

- **Fibra de Carbono:** Material estrella en la fabricación de palas de pádel. Al ser un material de gran ligereza, permite añadir más cantidad sin afectar al peso, lo que resulta en palas de gran resistencia, con plano endurecido que permite generar más potencia en el golpeo.
- **Fibra de Vidrio:** Material que se ha visto totalmente eclipsado en el mercado por la fibra de carbono, debido a su menor durabilidad. No obstante, se sigue empleando en la fabricación de palas ya que es un material más blando y flexible, que facilita la salida de bola. Además, es más económico fácil de trabajar, haciendo de este un material idóneo para palas de gamas inferiores.
- **Materiales Complementarios:** Es común ver materiales como el grafeno, el basalto, el kevlar, el grafito o el caucho, en combinación con los mencionados anteriormente, ya que sus distintas propiedades son útiles para reforzar el marco de la pala o endurecer capas inferiores del plano. De forma que las posibilidades entre ellos son inmensas.
- **Fibra Ecológica de Lino:** En el año 2022, Adidas sacó una colección de palas de pádel responsables con el medio ambiente, bajo el proyecto conocido como Greenpadel, el cual consiste en un conjunto de palas 100 % reciclables, compostables y biodegradables. Esto es posible gracias a la Fibra de Lino, un material natural capaz de proporcionar un rendimiento similar a la fibra de carbono o vidrio. A parte de sus evidentes ventajas ecológicas, posee excelente resistencia y ligereza.

3.2.2. Marco

El marco conforma el exoesqueleto que envuelve la parte exterior de la pala [5], aportando a esta rigidez y estabilidad. Es común que tengan forma tubular y esté compuesto por materiales de mayor resistencia y dureza que el plano, para conseguir una mayor capacidad para aguantar posibles golpes, mejorando la durabilidad de la pala, y aumentando su vida útil. El material más utilizado sigue siendo la fibra de carbono, aunque lo normal es que este aparezca combinado con materiales como fibra de vidrio, kevlar, grafeno o titanio. Con la combinación de materiales se busca encontrar una relación resistencia-flexibilidad óptima.

También es usual que la zona superior del marco lleve incorporado un protector, para evitar arañazos o golpes que se puedan producir en el campo de juego.

El marco es una parte crucial de la pala, es por ello por lo que las marcas líderes en el mercado realizan grandes inversiones para desarrollar nuevas

tecnologías que permitan absorber mejor las vibraciones en el marco durante el impacto, y de esta manera reducir la posibilidad de lesiones o sobrecargas en brazos, mejorando la experiencia del jugador.

3.2.3. Puente

El puente, también llamado corazón, de una pala de pádel, consiste en el elemento de unión entre cabeza y puño. Se ubica en la parte inferior a la superficie de impacto y juega un papel clave en el comportamiento de pala.

El diseño del puente influye considerablemente en la distribución del peso a lo largo de la pala, en la estabilidad durante el golpe y en la absorción de posibles vibraciones. Por ello, un diseño adecuado determinará cualidades como el control, la potencia y maniobrabilidad de la pala.

Existen variedad de tipos de puentes, cada uno con una funcionalidad diferente, y se pueden clasificar en cuatro:

- **Puente abierto:** Las palas con puente abierto presentan una abertura en el espacio que conecta la cabeza con la empuñadura, quedando ambas unidas únicamente mediante dos “brazos”. La principal ventaja de este diseño es la mayor flexibilidad y maniobrabilidad que aporta al reducir el peso de la pala, proporcionando un excelente equilibrio entre control y potencia.
- **Puente cerrado:** Una pala con el puente cerrado no tiene ninguna apertura visible, ya que la conexión entre cabeza y puño pasa a ser continua. Este diseño proporciona mayor firmeza y rigidez, maximizando la potencia de los golpes, a cambio de aumentar el peso de la pala. También ofrece una mejor distribución del peso, que resulta en una sensación de comodidad durante el juego.
- **Puente con difusor (semiabierto):** Este tipo de diseño es una combinación de los dos anteriores, ya que dispone de elementos intermedios, generalmente con forma de aleta o difusor, que dividen en partes la abertura del puente abierto, consiguiendo un movimiento de la pala más aerodinámico y fluido, que reduce la resistencia del aire durante el desplazamiento, lo que influye positivamente en la manejabilidad de la pala. Además de sus ventajas aerodinámicas, favorece la absorción de vibraciones, así como a la estabilidad de la pala.
- **Puente con pieza adherida:** Existen fabricantes que incorporan una pieza adicional en el interior del corazón de alguna pala, comúnmente en aquellas de alta gama. La pieza puede ser de diferentes materiales, y su finalidad es la aportar una mejora estructural al puente, actuando como un refuerzo que reduce la torsión en la pala, y en consecuencia aumentando la estabilidad durante el golpe de la pelota. Además, ayuda

a equilibrar el balance de la pala, y contribuye a la absorción de vibraciones.



Ilustración 12. Ejemplo de pala con puente abierto, puente cerrado, puente con difusor y puente con pieza adherida.

3.2.4. Puño

También conocido como mango o empuñadura, compone la parte que permite al jugador sujetar la pala durante el juego. Un adecuado diseño de la empuñadura favorecerá el control y comodidad del jugador, además de fomentar el juego seguro, previniendo posibles accidentes relacionados con la pala.

La longitud y grosor del mango puede variar, siempre y cuando se cumpla con el reglamento, adaptándose a las necesidades de cada jugador.

A su vez, la empuñadura está conformada por los siguientes elementos:

- **Grip:** Se conoce como grip o agarre a la primera capa de cinta o recubrimiento, de la cual dispone la pala según sale de fábrica. Se encuentra directamente en contacto con el tubular que forme la empuñadura. El objetivo de este recubrimiento es proporcionar un agarre firme y seguro.
- **Overgrip:** Capa de cinta o recubrimiento adicional colocada por encima del grip original para personalizar el grosor del puño, mejorando aún más el agarre. Una segunda capa de recubrimiento mitiga las vibraciones transmitidas al brazo, reduciendo la posibilidad de sufrir una lesión.
- **Tapón y cinta de seguridad:** El elemento que remata la empuñadura es el tapón, se coloca en la parte inferior del mango, y se encarga de sujetar el cordón, el principal elemento de seguridad de la pala. Este cordón se ajusta alrededor de la muñeca del jugador, para evitar que la pala se desprenda de la mano.



Ilustración 13. Partes que componen una pala de Pádel.

3.3. Tipos de Palas

Hoy en día existen infinitud de moldes diferentes, con formas únicas para cada pala, diseñadas para satisfacer diferentes necesidades y estilos de juego. A pesar de la multitud de posibilidades, es posible clasificar los principales tipos de palas existentes en el mercado, según su forma y estilo de juego.

3.3.1. Clasificación en función de la forma

Actualmente, el mercado presenta cuatro formas normalizadas en la fabricación de palas de pádel [6], explicadas a continuación:

- Pala con forma redonda: Este tipo de pala dispone de un diseño circular uniforme en el perfil, que aporta un punto dulce amplio y centrado, además de distribuir el balance de la pala hacia la empuñadura. La principal ventaja de este diseño es que ofrece cualidades de control excelentes, con alta maniobrabilidad de la pala, a cambio de disminuir las prestaciones en el juego agresivo, ya que al poseer una distribución de peso baja, la potencia obtenida con el golpeo será menor que la conseguida con otros diseños.
- Pala con forma de lágrima: El diseño deja de ser uniforme, ahora la pala posee un perfil ligeramente más ancho en la parte superior y más estrecho en la inferior. De esta manera se consigue subir el balance de la pala a una altura intermedia, y para este diseño, el punto dulce está por encima del centro y se ve levemente reducido en tamaño. Su comportamiento es muy equilibrado, con buena respuesta tanto en situaciones de control como de potencia.
- Pala con forma de diamante: Por último, el diseño diamante presenta un perfil superior todavía más ancho que la forma de lágrima, con el objetivo de concentrar mayor peso en la zona superior, elevando así el balance de la pala. Gracias a la distribución de peso elevada, es el diseño que más potencia genera durante el impacto, sin embargo, posee un punto dulce descentralizado, orientado hacia la parte superior del perfil, con un tamaño menor que el diseño lágrima. Estas características hacen que las palas con forma de diamante sean excelentes en tareas agresivas, penalizando la maniobrabilidad en el control de esta, por lo que es un diseño orientado hacia jugadores con nivel más avanzado.

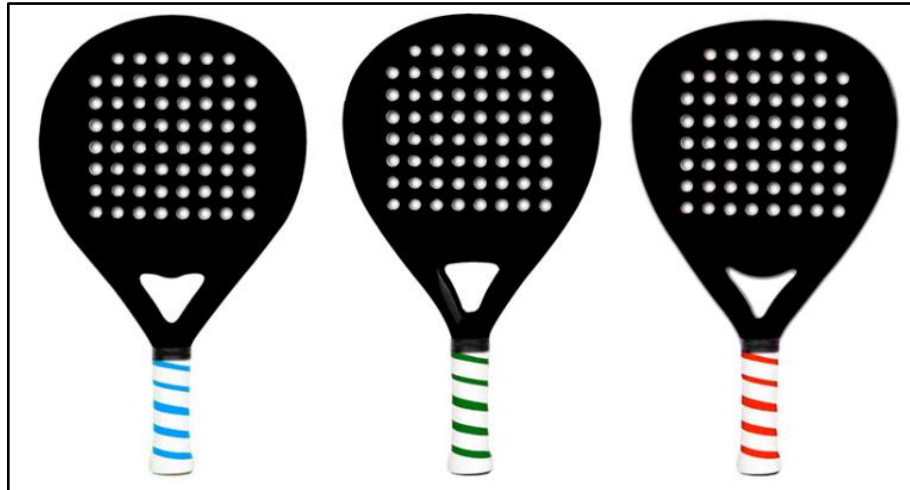


Ilustración 14. Ejemplo de pala con formato redondo, híbrido y diamante.

3.3.2. Clasificación en función del estilo de juego

El diseño de una pala está intrínsecamente relacionado con el estilo de juego de un jugador [6]. Se puede clasificar según el estilo de juego que aporta, de la siguiente manera:

- **Palas de Control:** Están enfocadas en la precisión y la maniobrabilidad. Poseen un punto dulce de mayor amplitud, con una distribución de peso cercana a la empuñadura. Están compuestas de materiales más blandos, que ofrecen un toque más suave, permitiendo al jugador una mayor capacidad de dirigir la pelota y su velocidad. Las palas orientadas al control generalmente tienen un diseño redondo o híbrido, entre lágrima y redondo.
- **Palas de Potencia:** Enfocadas en la explosividad durante el impacto. Trabajan con un balance elevado, con un punto dulce reducido, permitiendo una mayor transferencia de energía a la pelota, lo que resulta en golpes de mayor intensidad. A cambio, son palas que requieren de una mayor experiencia de juego, ya la distribución de peso en la zona superior dificulta la maniobrabilidad y el control de estas. El diseño de potencia por excelencia es el diamante, aunque hay multitud de palas con forma de lágrima orientadas hacia el juego agresivo.
- **Palas Polivalentes:** Palas versátiles que buscan el equilibrio entre potencia y control. Presentan un balance intermedio, con un punto dulce moderado. Enfocadas a un estilo de juego completo, sin debilidades en defensa ni en ataque. Los principales diseños polivalentes son los híbridos, pero los hay también con forma redonda y lágrima.

3.4. Factores de Influencia en la Pala

Una vez vista la influencia que tiene el diseño sobre la pala, se explicarán una serie de aspectos plenamente condicionantes del comportamiento de esta, siendo estos igual de importantes que el factor geométrico.

Punto Dulce: Se conoce como punto dulce a la superficie de golpeo óptima de la pala. Es la zona que permite conseguir la mayor eficiencia en el impacto de la pelota, tanto para control como para potencia. Anteriormente se ha visto cómo afecta el diseño en el tamaño del punto dulce de una pala.

Balance: Consiste en la distribución del peso de la pala a lo largo del molde, es decir, la franja en la que se concentra la mayor parte del peso de la pala. La altura a la que se encuentre dicha distribución influye directamente sobre la energía transferida a la pelota durante el impacto, siendo un factor determinante en el estilo de juego.

En la figura mostrada a continuación, aparece una comparativa de la ubicación del punto dulce y del balance, en palas de diferente forma.

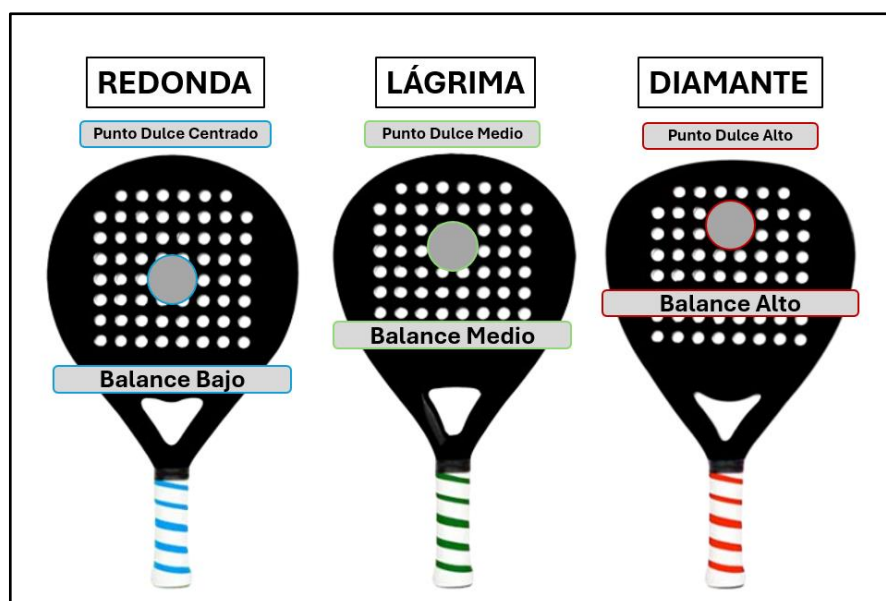


Ilustración 15. Punto Dulce y Balance en función de la geometría de la pala.

Peso: El peso global de la pala, hará que esta se oriente hacia un estilo de juego u otro. El intervalo de peso de una pala de pádel va desde los 330 hasta los 400 gramos. Emplear pesos más livianos favorece la maniobrabilidad, permitiendo movimientos más ágiles. Por otro lado, una pala más pesada ofrece mayor potencia y estabilidad al golpear la pelota, penalizando un poco el control de esta.



El peso también es un factor que afecta a la salud de los jugadores, ya que se ha demostrado que manejar palas pesadas durante largos periodos aumenta las posibilidades de lesiones en brazos.

Grosor: El grosor de la pala influye de manera significativa en su rendimiento y experiencia de juego. La Federación Internacional de Pádel establece el grosor máximo permitido para una pala en 38 mm, estando la mayoría de las palas diseñadas de acuerdo con este grosor, ya que maximizar el aprovechamiento ofrece ventajas tales como, una mejor estabilidad, mayor transferencia de energía, aumenta la amortiguación de vibraciones, mayor durabilidad, etc. Si bien una pala con grosor inferior a 38 mm, ofrecería mejor maniobrabilidad y control dado su peso más liviano, no es común ver palas de este tipo en competiciones profesionales.

Dureza: Aspecto determinante, tanto a nivel interno como externo, en el comportamiento de la pala. Los materiales que conformen el núcleo y la superficie de golpeo de la pala influyen directamente sobre la reactividad de esta. Aquellas palas compuestas por combinaciones de materiales más blandos tienen mejor capacidad para absorber el impacto, aportando un mayor control en la dirección y velocidad de la pelota. En el caso contrario, las composiciones más duras ofrecen mayor rigidez y durabilidad, y en consecuencia una mayor intensidad en el golpeo.

Textura de la Superficie: La superficie de impacto de la pala puede ser totalmente lisa, o puede presentar trazos de relieve, formando una superficie rugosa. Los perfiles planos proporcionan golpes regulares y predecibles, mientras que un perfil rugoso es capaz de inducir cierto efecto en la pelota. El texturizado de la superficie puede acoplarse directamente a través del molde, lo que se conoce como Rugoso 3D, o bien, también puede añadirse durante el proceso de barnizado empleando una cobertura de cientos de puntos, repartidos de forma heterogénea, que sobresalen en el perfil de la pala.

Clima: Las condiciones climáticas influyen en el juego de manera notable, el comportamiento de la pala no será el mismo en climas cálidos que en fríos. Esto se debe a que las espumas que conforman el núcleo de la pala se ven afectadas por la temperatura, pudiendo variar la rigidez del núcleo, y, por ende, el rebote de la pelota.

Nivel del Jugador: A nivel avanzado-profesional, la velocidad a la que se juega la pelota es mucho más rápida que en niveles intermedios o de principiantes. De manera que, es recomendable utilizar una pala que se pueda adaptar con facilidad a la experiencia en pista del usuario.

4. ESTUDIO DE MERCADO

En cualquier desarrollo de producto, es necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo de su demanda en el mercado, analizando los diversos productos ofertados y las diferentes características que ofrecen, para de esta manera tratar de encontrar un hueco en el mercado para nuestro producto.

En este caso, se realizará un análisis detallado de las palas de pádel de alta gama con la mayor demanda, y de más presencia en competiciones profesionales, ya que el cliente potencial que se busca es un jugador de nivel avanzado-profesional. Se tendrá en cuenta también las tecnologías propias de cada marca, que consiguen atraer al consumidor, ofreciendo propiedades únicas.

A continuación, se analizarán las principales marcas fabricantes de palas de pádel, sus tecnologías más punteras, y su pala de mayor categoría, que ofrezca las prestaciones de mayor calidad.

4.1. Principales Fabricantes

<p>Marca: HEAD [7]</p>	
<p>Head Extreme Pro LTD</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante.</p> <p>Peso: 375 gramos.</p> <p>Tamaño Cabeza: 475 cm².</p> <p>Balance: 272,0 mm.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: Mezcla de fibra de carbono y fibra de vidrio.</p> <p>Marco: Fibra de Carbono 100%.</p> <p>Núcleo: Goma Power FOAM.</p> <p>Textura Superficie: Rugoso 3D.</p> <p>Nivel de juego: Avanzado/Profesional.</p> <p>Precio: 350,00 euros.</p>

Descripción:
Edición limitada diseñada y desarrollada en colaboración con el jugador número uno del mundo, el vallisoletano Arturo Coello , también conocido como el Rey Arturo, para la temporada de 2025. Presenta una estética elegante y exclusiva, con toques personales. Con forma de diamante, combina un diseño único con un peso superior a otras ediciones, para alcanzar una potencia extrema.
Tecnologías:
<p>Auxetic 2.0: Construcción propuesta por HEAD, que se ensancha al aplicar un esfuerzo de tracción, y se contrae al apretar. De forma que aumenta la reacción de la pala con la fuerza aplicada.</p> <p>Power Foam: Espuma diseñada para obtener la máxima potencia y fuerza.</p> <p>Extreme Spin: Tecnología de calcomanía 3D (Rugoso 3D), que maximiza el efecto y tracción de la pelota.</p> <p>Optimized Sweet Spot: A través de un patrón de agujereado único, se amplía la zona de punto dulce.</p> <p>Smart Bridge: Desarrollo específico del puente, el cual presenta una aleta central, que ayuda notablemente a aumentar la resistencia y durabilidad de la pala.</p> <p>Power Stabilizer: Construcción estable y mejorada para ofrecer mayor potencia durante el juego.</p> <p>Carbon Hybrid HS: Perfil de la pala fabricado con una mezcla de fibra de carbono y fibra de vidrio para conseguir el equilibrio perfecto entre potencia pura y tacto.</p> <p>Carbon Frame: Nuevo marco fabricado en su totalidad con fibra de carbono para mayor rigidez, estabilidad y rendimiento.</p> <p>Anti-Shock Skin Padel: Lámina especial de polímero que aumenta la durabilidad de la pala, y actúa como protector del marco contra golpes y arañazos.</p> <p>Graphene Inside: La incorporación de grafeno en el marco, aporta mayor estabilidad y optimiza la salida de bola.</p>

<p>Marca: NOX [8]</p>	
<p>NOX AT10 GENIUS 18K</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Lágrima.</p> <p>Peso: 360-375 gramos.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: Carbón Aluminizado 18K.</p> <p>Marco: 100 % carbono.</p> <p>Núcleo: MLD Black Eva.</p> <p>Textura Superficie: Rugoso 3D + arenoso.</p> <p>Nivel de juego: Avanzado/Profesional.</p> <p>Precio: 359,99 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>El nuevo modelo Genius 18K, será la pala empleada por Agustín Tapia durante la temporada de 2025. Cuenta con una construcción de alta calidad que combina materiales de última generación que ofrecen un equilibrio perfecto entre potencia y control.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Carbono 18K Alum: El carbono 18K aluminizado, además de un tacto sólido y confortable, es menos sensible a los cambios de temperatura.</p> <p>Núcleo MLD Black Eva: Núcleo multicapa que combina diferentes densidades de goma, que maximiza el equilibrio de la pala.</p> <p>EOS Flap: Perforaciones laterales en la zona del puente que mejoran la aerodinámica.</p> <p>Pulse System: Gomas laterales en la zona del mango para reducir vibraciones.</p> <p>Oversize Grip: La empuñadura recibe una ampliación de 30 mm de longitud.</p> <p>NOX Custom Grip: Tecnología patentada por NOX, que proporciona un mejor agarre y disminuye las vibraciones transmitidas a la mano.</p> <p>SmartStrap: Tapón elaborado con material blando, que proporciona un agarre de mayor comodidad, además de reducir las vibraciones y la presión ejercida.</p>	



Superficie Rugosa: Combina relieve 3D con un baño en arena de sílice de bajo gramaje.

Dynamic Composit Structure (DCS): Incremento de cantidad de material dentro de la cara, minimizando la diferencia de dureza entre el marco y la cara de la pala.

<p>Marca: ADIDAS [9]</p>	
<p>ADIDAS Metalbone 3.4</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante Oversize. Peso: 345-360 (0 + 11,2) gramos. Tamaño Cabeza: 485 cm². Balance: 285,0 mm. Grosor Marco: 38 mm. Perfil y Marco: Carbón Aluminizado 16K. Núcleo: Goma Eva Soft Performance. Textura Superficie: Rugosa. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 390,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>El modelo Metalbone 3.4 se trata de uno de los dos modelos diseñados para el jugador español Alejandro Galán, el cual cuenta con una construcción de alta calidad y elegancia. Esta unidad reúne todos los aspectos tecnológicos y estructurales para aportar una impecable combinación entre potencia y salida de bola.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Weight and Balance System: Posee un sistema de pesos extraíbles mejorado para esta edición de 2025, ubicado en las zonas laterales y superior del marco, que permite modificar el balance y el peso total de la pala para adaptar su comportamiento a las necesidades de cada partido. El sistema está compuesto por tornillos, placas y arandelas extraíbles, que permitirán modificar hasta 11,2 gramos el peso y distribución de la pala.</p> <p>Octagonal Structure: Tecnología que dota de una gran consistencia a la pala, gracias a la estructura octogonal del tubular que conforma el marco. Eleva considerablemente la resistencia a la torsión de la pala, favoreciendo la potencia en el golpe.</p> <p>Spin Blade Decal: Cobertura de las caras de la pala con una superficie rugosa con alta capacidad de fricción, que aumenta la capacidad de generar efecto en la pelota.</p>	



Smart Holes Curve: La disposición de los agujeros está especialmente diseñada para facilitar el efecto durante el golpe.

Structural Reinforcement: Refuerzos perimetrales presentes en toda la pala que generan mayor resistencia a la torsión soportada por la pala.


Power Groove: El diseño presenta un rail insertado en todo el contorno de la cabeza, dándole mayor importancia al marco, y sacando el máximo partido a los golpes de potencia.

Extra Power Grip: Dispone de una empuñadura de mayor longitud, incrementando de esta forma la inercia de la pala durante la ejecución de los golpes.

<p>Marca: BABOLAT [10]</p>	
<p>Babolat Technical Viper Juan Lebron</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante. Peso: 370 (0 + 10) gramos. Balance: Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Fibra de Carbono 3K. Marco: Carbono. Núcleo: Goma EVA de una sola densidad. Textura Superficie: Rugoso 3D. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 380,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>Con uno de los diseños más atractivos, la Technical Viper 2025 edición Lebrón, es la pala utilizada por el jugador español Juan Lebrón. Esta edición limitada es algo más dura que la normal, debido al núcleo EVA de una densidad, esto sumado a la fibra de carbono 3K, hacen que sea una herramienta de potencia exquisita para los jugadores más técnicos.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>3K Carbon: El perfil de la pala utiliza fibra de carbono tejida para mayor explosividad y precisión en la pista.</p> <p>Smart Buttcap: Sistema que permite la extracción del cordón, para sustituirlo o lavarlo, de acuerdo con las necesidades de cada jugador.</p> <p>Dynamic Stability System: Corazón de la pala con diseño exclusivo. El refuerzo central mejora la estabilidad, proporcionando un equilibrio perfecto entre potencia y control.</p> <p>3D Spin +: Combinación de relieves en la superficie de la pala con un acabado rugoso, que facilita transmitir efectos a la pelota, permitiendo un mayor control de las situaciones.</p>	

<p>Marca: SIUX [11]</p>	
<p>SIUX Electra ST4 Pro</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Híbrida. Peso: 360-375 gramos. Balance: Medio-Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Fibra de Carbono 15K. Marco: Tubular Carbono 3K + aramida. Núcleo: Goma Black EVA HARD. Textura Superficie: Arenosa. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 325,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La Siux Electra Pro ST4, destaca por su forma híbrida, su núcleo EVA Hard y sus caras de Carbono 15K, haciendo de esta una pala con un rendimiento muy polivalente. El tubular de Carbono y Aramida aporta gran resistencia y durabilidad, y, además, el acabado de brillo arenoso ofrece una superficie de impacto de alta calidad. Es una pala con estilo único, con detalles metálicos y un elegante toque amarillo metalizado, consiguiendo una estética muy sofisticada.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>ShockOut Dampeners: Elementos antivibradores, que se incorporan en el taladro de la pala reduciendo hasta un 60 % las vibraciones durante el impacto. Están fabricados con un elastómero inteligente, y añaden un peso de 1,5 gramos en cada taladro, pudiendo también modificar el balance de la pala.</p> <p>ShockOut Dual Pro Grip: Se trata de un grip con banda de FOAM interior, que proporciona una mayor amortiguación para absorber las vibraciones. Diseñado con un relieve en espiral, que ofrece un agarre natural y ergonómico. Además, posee un acabado perforado, para maximizar la transpiración.</p>	

<p>Marca: PUMA [12]</p>	
<p>PUMA Nova Elite Momo</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Redonda.</p> <p>Peso: 360-370 (+-10) gramos.</p> <p>Balance: Bajo.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: Carbono 3K.</p> <p>Marco: Doble Tubular Fibra de Carbono 100 %.</p> <p>Núcleo: Goma EVA Pro.</p> <p>Textura Superficie: Lisa.</p> <p>Nivel de juego: Intermedio/Avanzado.</p> <p>Precio: 320,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La Nova ELITE 2025 diseñada para el jugador Momo González, es una pala que ofrece un control excepcional gracias a su forma redonda y punto dulce amplio y centrado, permitiendo ejecutar golpes con mayor precisión. El avanzado marco de fibra de carbono ha sido específicamente diseñado para minimizar la torsión, con el objetivo de responder bien ante golpes de mayor intensidad, haciendo de esta una de las palas más versátiles del mercado.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>TeXtreme Carbon Twill: Tecnología de refuerzo del tejido, que proporciona una mayor estabilidad y precisión en cada golpe.</p> <p>Aero Hole: Patrón de agujereado diseñado para conseguir un punto dulce de mayor amplitud.</p> <p>Anti-Shock: Sistema antivibración integrado que reduce las vibraciones no deseadas proporcionando un mayor confort durante el juego.</p> <p>Empuñadura LDPE: Diseño ergonómico del mango, que incluye en el tope de la empuñadura, polietileno de baja densidad moldeado por inyección, aportando una mayor durabilidad y comodidad.</p>	

<p>Marca: BULLPADEL [13]</p>	
<p>BULLPADEL Hack 04 2025</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante. Peso: 365-375 gramos. Balance: Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Triple Carbono 18K. Marco: Tubular de Carbono. Núcleo: Goma EVA Múltiple Densidad. Textura Superficie: Rugoso 3D. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 299,99 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La nueva Hack 04, ha sido diseñada junto al jugador Paquito Navarro, para la temporada de 2025. La pala presenta un balance medio-alto que proporciona una enorme potencia en el golpe. Su diseño de diamante junto con un amplio punto dulce permite una buena precisión y control durante el juego. Además, su nuevo marco aerodinámico mejora el equilibrio de la pala, consiguiendo que esta sea más ágil, ligera y consistente.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Total Channel: Tecnología en el marco que aporta un canal aerodinámico alrededor de todo el perímetro para reducir la resistencia del aire al máximo.</p> <p>Tricore: Nueva disposición del corazón que aumenta el grosor de sus vectores para reducir vibraciones y mejorar tanto estabilidad como potencia.</p> <p>Air React Channel: Aberturas en la zona inferior del marco para completar el canal aerodinámico, haciendo que la pala se comporte de forma más ágil y ligera.</p> <p>Easy Vibe: Dampeners de última generación, capaces de absorber hasta un 49 % de las vibraciones producidas en el golpe de la pelota.</p> <p>MultiEva: El núcleo está formado por espumas de dos densidades, la capa exterior de la goma es más compacta, mientras que la capa interior es de menor densidad.</p>	

<p>Carbon Tube: El tubular del marco es carbono entrelazado bidireccional.</p> <p>3D Grain: Acabado Rugoso 3D en las caras de la pala, en forma de círculos concéntricos.</p> <p>Tricarbon 18 K: Cintas de carbono entrelazados de poco grosor y mayor ligereza.</p> <p>Custom Weight: Sistema de placas de peso desarrollado por Bullpadel que permite modificar el peso y equilibrio de la pala, a través de placas adhesivas de aluminio de 3 gramos cada una que se colocan en el protector, así como la posibilidad de utilizar un tapón con diferentes pesos.</p> <p>Hesacore: Grip con geometría de panal, que reduce el esfuerzo de agarre, las vibraciones y lesiones, ya que otorga una mayor superficie de contacto.</p> <p>Vibradrive: La empuñadura cuenta con una pieza de caucho de alta elasticidad capaz de absorber la mayoría de las vibraciones.</p> <p>Adaptia: Sistema que engloba perfectamente el Tricarbon y MultiEva en el marco de la pala.</p>

<p>Marca: BULLPADEL [13]</p>	
<p>BULLPADEL XPLO 25</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante geométrico.</p> <p>Peso: 365-375 gramos.</p> <p>Balance: Alto.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: X-Tend Carbon 12 K.</p> <p>Marco: Tubular Hexagonal Carbono 100 %.</p> <p>Núcleo: MultiEva.</p> <p>Textura Superficie: Rugoso 3D.</p> <p>Nivel de juego: Avanzado/Profesional.</p> <p>Precio: 309,99 euros.</p>

Descripción:
La nueva XPLO 2025 es la apuesta más potente de la marca. Diseñada para el jugador profesional Martin di Nenno , esta pala redefine el concepto de potencia con sus nuevas tecnologías, lista para llevar el juego al máximo nivel.
Tecnologías:
<p>Geometric Shape: El marco geométrico introducido en el diseño, sumado a una estructura de carbono de alta resistencia, proporciona potencia explosiva.</p> <p>Geometric Core: Tecnología del corazón de la pala que incluye refuerzos estructurales tanto en la zona superior como inferior, aportando mayor estabilidad y firmeza a la pala.</p> <p>Hexature: Nueva estructura hexagonal para el tubular del marco, de 3 mm más de grosor. Aporta mayor resistencia y durabilidad frente a esfuerzos de torsión y flexión.</p> <p>Wave System + Air Power: Nuevo diseño de marco en formato de ondas (Wave System), que mejora la disipación de vibraciones y reduce la flexión en cada golpe, combinado con los canales laterales del corazón (Air Power), que aumenta la agilidad del golpe.</p> <p>Easy Vibe: Dampeners de última generación, capaces de absorber hasta un 49 % de las vibraciones producidas en el golpe de la pelota.</p> <p>Smart Holes: Patrón de agujeros enfocado en maximizar la potencia.</p> <p>Custom Weight: Sistema de placas de peso desarrollado por Bullpadel que permite modificar el peso y equilibrio de la pala.</p> <p>Hesacore: Grip con geometría de panal, que reduce el esfuerzo de agarre, las vibraciones y lesiones, ya que otorga una mayor superficie de contacto.</p> <p>Vibradrive: La empuñadura cuenta con una pieza de caucho de alta elasticidad capaz de absorber la mayoría de las vibraciones.</p> <p>MultiEva: El núcleo está formado por espumas de dos densidades, la capa exterior de la goma es más compacta, mientras que la capa interior es de menor densidad.</p> <p>X-Tend Carbon 12 K: Carbono de 12 K filamentos de alto gramaje entrelazados biaxialmente, empleado por la marca para la fabricación de palas.</p>

<p>Marca: WILSON [14]</p>	
<p>WILSON Bela Pro V2.5</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Lágrima. Peso: 370 gramos. Balance: 265 mm. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Carbono Premium. Marco: Tubular Fibra de Carbono. Núcleo: Firm EVA. Textura Superficie: Rugosa. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 340,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>Diseñada en colaboración con el jugador Fernando Belasteguín, la Bela Pro V2.5 utiliza tecnología de vanguardia para ofrecer el máximo rendimiento. Tiene un punto dulce mejorado, y una sensación consistente. Su núcleo formado por Goma EVA firme, sumado a una cara de Carbono Premium, aporta una combinación perfecta entre potencia y capacidad de respuesta.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Premium Carbon: Integra Carbono Premium en el perfil y marco, ofreciendo una equilibrada relación entre potencia y capacidad de respuesta.</p> <p>Spin Effect Grip: Superficie texturizada que induce efectos en la pelota.</p> <p>Sharp Hole: Proceso avanzado de perforación de orificios que mejora la sensación de agarre.</p> <p>Shock Shield Grip: Aleación de poliuretano e Izo-Zorb que proporciona adherencia y amortiguación en el agarre.</p> <p>Detachable Wrist Cord: Permite montar y desmontar el cordón de seguridad.</p> <p>Eco Butt Cap: Composición de nailon biológico que permite reducir el material total utilizado en la tapa del mango un 20 %, creando un producto más sostenible.</p>	

<p>Marca: StarVie [15]</p>	
<p>StarVie Basalto Pro-25</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Lágrima. Peso: 350-385 gramos. Balance: Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Basalto + Carbono 3K. Marco: Tubular Basalto más Carbono 3K. Núcleo: Goma EVA Pro-50. Textura Superficie: Rugoso 3D. Nivel de juego: Intermedio/Avanzado. Precio: 249,99 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>El modelo Basalto Pro de StarVie es ideal para jugadores de juego ofensivo gracias a la goma de densidad media Pro-50, al balance alto que presenta, y a la forma de lágrima. Esta pala destaca por su composición de Fibra de Basalto y Carbono 3K en el plano, proporcionando mayor durabilidad y resistencia.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Noene Inside: Tecnología aplicada en el puño de la pala. Se trata de un grip anti-shock exclusivo de la marca, que absorbe y protege hasta el 96 % de la energía generada por choques y vibraciones.</p> <p>Full Plane Effect: Textura en el plano con relieve 3D de 2 mm, en forma de estrella, que permite efectos en la pelota con mayor precisión.</p> <p>Star Balance: Sistema propio de la marca, que incorpora una pieza asimétrica en el corazón de la pala, proporcionando un equilibrio y balance perfecto del peso.</p> <p>Goma Pro-50: Perfecto equilibrio entre potencia y control gracias a su núcleo de Goma EVA de densidad media.</p> <p>Basalto + Carbono 3K: Construcción con fibra de basalto y carbono 3K tanto en el plano como en el perfil, que aporta una gran durabilidad y mejora las prestaciones durante el juego.</p>	

4.2. Fabricantes Emergentes

Una vez analizadas las diferentes palas de pádel propuestas por las principales marcas fabricantes, con mayor presencia en competiciones profesionales, se consideran las ambiciosas propuestas de marcas emergentes, que se han hecho un hueco en el mercado en los últimos años, y que actualmente se ven en competiciones nacionales e internacionales.

<p>Marca: LOK Sports [16]</p>	
<p>Lok Maxx Hype</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante. Peso: 360-375 gramos. Balance: Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Carbono 18K. Marco: Tubular Carbono. Núcleo: Goma EVA. Textura Superficie: Rugoso 3D. Nivel de juego: Avanzado/Profesional. Precio: 300,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>Actualmente la pala del jugador profesional Mike Yanguas, la Maxx Hype es la pala ofensiva más tecnológica de LOK. Propone un llamativo diseño, con un corazón asimétrico que ofrece rigidez estructural, así como un balance óptimo. Está formada por Carbono 18K en tres planos diferentes, lo que aporta una gran intensidad en el golpe.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Asymmetric Heart: Corazón caracterizado por su diseño asimétrico, que mantiene un equilibrio perfecto. Esta forma única proporciona una rigidez estructural que garantiza la estabilidad durante el golpe.</p>	



Gradual Face: Sistema de capas escalonadas generadas en las partes superior e inferior de las caras. Se trata de escalones y relieves dispuestos de tal manera que crean ángulos que favorecen a la absorción de las vibraciones a medida que se extienden por toda la pala en el momento del impacto.

3D Spin Lines: Sistema de rugoso 3D, formado por líneas diagonales paralelas a la dirección del ángulo del corazón, que incrementa el efecto de giro y mejora la sensación de control.

Dynamic Holes System: Diseño progresivo con dos tamaños de agujeros diferentes, de 10 y 11 mm, en la parte central de la cara, que aporta potencia al golpe.

Carbon Reinforcement: Presenta refuerzos de carbono en los puntos críticos de la pala, que proporcionan soporte estructural y aumentan la durabilidad.

Vibration Groove: Un raíl integrado en el marco de la pala, que favorece la disipación de vibraciones.

Comfort Wristband: Correa ajustable que acompaña al cordón de seguridad, la cual garantiza un agarre cómodo.

<p>Marca: KOMBAT [17]</p>	
<p>KOMBAT FUJI 2025</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Híbrida. Peso: 365 gramos. Balance: Medio. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Carbono 18 K Aluminizado. Marco: Tubular Fibra de Carbono 100%. Núcleo: Black EVA Doble Densidad. Textura Superficie: Rugoso 3D. Nivel de juego: Intermedio/Avanzado. Precio: 185,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La marca KOMBAT trae en 2025 la colección de palas VULCANO. Inspirada en la majestuosidad del monte Fuji, presenta la KOMBAT FUJI. Con un diseño innovador, espectacular acabado de Carbono 18 K Aluminizado y un núcleo Black EVA, se trata de una pala enfocada en la versatilidad, con excelente control y potencia.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>El formato lágrima aporta un equilibrio perfecto entre potencia y control, ideal para jugadores que buscan polivalencia durante el juego.</p> <p>Núcleo Black EVA: El núcleo de la pala está formado por Goma EVA de densidad doble, proporcionando una sensación de golpeo precisa con excelente salida de bola.</p> <p>Fabricación con materiales de primera calidad, garantizando de esta manera una pala con excelente durabilidad y resistencia.</p> <p>Con un peso que oscila entre los 360 y 370 gramos, es una pala muy manejable, que permite mayor agilidad en pista.</p>	

<p>Marca: Oxdog [18]</p>	
<p>Oxdog Ultimate Pro+ 2025</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Lágrima. Peso: 370 gramos. Balance: Alto. Grosor Marco: 38 mm. Perfil: HES Carbon. Marco: Fibra de Carbono. Núcleo: Medium + EVA. Textura Superficie: Lisa. Nivel de juego: Intermedio/Avanzado. Precio: 329,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La pala Oxdog Ultimate Pro-2025, se ha convertido en una de las favoritas de jugadores profesionales y de competición. Se trata de un modelo versátil, con forma de diamante, tacto medio duro y balance alto. Destaca por ser un diseño elegante y atractivo además de contar con todas las tecnologías de la marca.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>DSH (Double Size Holes): Sistema de agujereado con dos tamaños para mejorar la jugabilidad fuera del punto dulce.</p> <p>Silent Speed: Diseñada de tal manera que las palas tienen un sonido muy silencioso y característico. Absorben el sonido del golpe para aumentar la potencia.</p> <p>Power Ribs: Raíles presentes en el marco, destinados a reducir las vibraciones y mejorar el equilibrio.</p> <p>HES-Carbon: Carbono muy reactivo y rígido, que aporta explosividad.</p> <p>Vibradamp: Inserciones de silicona situadas bajo el puño que reducen vibraciones y reducen el riesgo de lesión del jugador.</p> <p>RBS (Racket Balance System): Pesa de 8 gramos presente en el tapón cuyo objetivo es permitir al jugador modificar el balance y el peso de la pala al gusto. Se puede quitar y poner fácilmente a través de un tornillo.</p>	

<p>Marca: Drop Shot [19]</p>	
<p>Drop Shot Axion Attack 1.0</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Lágrima.</p> <p>Peso: 360-370 gramos.</p> <p>Balance: Alto.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: Carbono 24K Twill.</p> <p>Marco: Doble Tubular Carbono.</p> <p>Núcleo: Goma EVA Pro High Density.</p> <p>Textura Superficie: Rugoso 3D.</p> <p>Nivel de juego: Avanzado/Profesional.</p> <p>Precio: 350,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>El nuevo modelo Axion Attack 1.0 de la colección del jugador profesional Jon Sanz, está destinado a aquellos jugadores de nivel avanzado que buscan un juego exigente y de calidad. Su atractivo diseño con formato lágrima proporciona un gran control en el golpe y sus tecnologías punteras garantizan durabilidad.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Eva-Pro: A través de la goma EVA Pro de alta densidad, se busca aportar sensación de control.</p> <p>TeExtreme: Tecnología de refuerzo patentada, basada en principios de capas delgadas y cables extendidos.</p> <p>Sistema de distribución de agujeros en la cara de la pala, en forma curva y progresiva.</p> <p>Viga presente en el corazón de la pala con el objetivo de aportar rigidez, durabilidad y resistencia. Además de una estructura de ángulos pronunciados en el corazón, para reducir la transferencia de vibraciones al área de la empuñadura.</p> <p>Doble tubular de telas de carbono pre impregnadas con resinas muy duraderas.</p> <p>Rugoso 3D en forma romboidal, para conseguir un mayor efecto en la pelota.</p> <p>Protector de Nylon adherido a la pala, sin perforación del marco.</p>	

4.3. Fabricantes Sostenibles

Por último, se analizarán propuestas de determinados fabricantes, enfocadas en la sostenibilidad del producto y cuidado del medioambiente, más que en ofrecer las máximas prestaciones de rendimiento posibles a nivel competitivo. Aun así, son modelos con características prometedoras, que podrían revolucionar el mercado del pádel hacia uno con menor huella de carbono en el futuro.

<p>Marca: ADIDAS [9]</p>	
<p>Adipower Greenpadel 2022</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Redonda. Peso: 360-375 gramos. Balance: Medio-Alto (265 mm). Grosor Marco: 38 mm. Perfil: Fibra de lino. Núcleo: Goma EVA Soft Performance. Textura Superficie: Rugoso arenoso. Nivel de juego: Intermedio/Avanzado. Precio: 230,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>En 2022, ADIDAS sacó una colección de palas de pádel respetuosa con el medioambiente, conocida como GreenPadel, en la que incluían modelos ecológicos de la Adipower y de la Metalbone. Esta colección incorpora la Fibra de Lino como el material principal de la pala.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Flax Fiber: Incorporación de la fibra de lino. Se trata de una fibra extraordinariamente resistente y ligera, que aporta una gran versatilidad tanto en ataque como en defensa, además de que reduce la huella de carbono de la pala. Spin Blade Gritt: Rugosidad especial en formato arenoso incorporada en toda la superficie de golpeo. Structural Reinforcement: Tecnología que incorpora refuerzos perimetrales alrededor de toda la pala que permite generar mayor resistencia ante esfuerzos de torsión durante el impacto.</p>	

<p>Marca: CORK PADEL [20]</p>	
<p>Supreme Power III</p>	<p>Características:</p>
	<p>Forma: Diamante.</p> <p>Peso: 350-375 gramos.</p> <p>Balance: Alto.</p> <p>Grosor Marco: 38 mm.</p> <p>Perfil: Corcho, carbono, innegra y sillionne.</p> <p>Marco: Carbono, kevlar y corcho.</p> <p>Núcleo: Black EVA Soft Laminada.</p> <p>Textura Superficie: Rugosa.</p> <p>Nivel de juego: Avanzado/Profesional.</p> <p>Precio: 430,00 euros.</p>
<p>Descripción:</p>	
<p>La marca portuguesa Cork Padel ha sido la primera en lanzar al mercado una pala de pádel de corcho ecológica. El corcho es un material con propiedades compatibles con este deporte. Se trata de un material rugoso, favoreciendo el agarre de la bola, además de poseer propiedades antivibratorias que colaboran con la estabilidad de la pala.</p>	
<p>Tecnologías:</p>	
<p>Agujereado multi diámetro: Patrón de agujereado que presenta diferentes tamaños de diámetro, para aumentar el punto dulce.</p> <p>Escudo: Zona del corazón de la pala en forma de escudo que contribuye a la aerodinámica de la pala.</p> <p>Black EVA Soft: El núcleo de la pala está compuesto por Goma EVA negra de densidad blanda, con una capacidad de recuperación excelente.</p> <p>Caras: Las caras de la supreme están compuestas por 6 capas de diferentes materiales: Una de corcho, dos de innegra y carbono, y tres de fibras de sillionne (un tejido de fibra de vidrio).</p> <p>Personalización: La marca ofrece personalización completa de la pala, siendo el cliente el que puede elegir la estética de su producto.</p>	

4.4. Conclusiones del estudio

Tras la realización del estudio de mercado de las principales palas de alta gama de jugadores profesionales en este 2025, es posible observar cómo hay determinados aspectos que dominan por completo el mercado, a continuación, se detallarán las conclusiones para cada característica concreta de la pala.

4.4.1. Geometría

Cabeza

El formato diamante tiene una clara predominancia sobre las otras formas. Esto se debe a que a nivel profesional se prioriza una geometría que ayude más en los golpes de potencia, aunque penalice en el tamaño del punto dulce o en el control durante el golpe, dado que la calidad técnica de los jugadores profesionales hace que esta aparente desventaja no se note tanto.

Sin embargo, también existe una presencia considerable de palas con formato híbrido o lágrima, que aportan un juego polivalente y equilibrado tanto en potencia como control. En el ámbito competitivo, las palas híbridas poseen un balance algo superior al que tendría un formato redondo convencional. La razón es la mencionada anteriormente, una distribución del peso hacia la cabeza aporta mayor potencia en el golpe de la pelota, siendo este un recurso fundamental para todo jugador competitivo.

Si bien el molde redondo es el menos predominante, aún hay jugadores que se decantan por el control. Además, una buena combinación de materiales en consonancia con una correcta distribución del peso, pueden hacer que una pala redonda tenga buena respuesta en impactos de potencia.

Puente

Respecto al puente, se puede apreciar como las palas de alta gama tratan de optimizar el movimiento de la pala a través de diseños aerodinámicos en el corazón de esta. En la actualidad, las palas de pádel de alto rendimiento poseen elementos innovadores que tratan de mejorar la fluidez y manejabilidad de la misma, como pueden ser las aberturas en el corazón conocidas como “Flaps”, o perfiles aerodinámicos en todo el contorno del marco.

Empuñadura

Aunque los fabricantes no aportan dimensiones exactas en los detalles de la pala, cada vez es más común irse hacia empuñaduras de mayor longitud, las cuales permiten inducir en el impacto de la pelota un mayor “efecto palanca”, y por ende aportar mayor potencia en el golpe. Las empuñaduras de

mayor longitud también aportan la flexibilidad de poder agarrar la pala con las dos manos en caso de necesitarlo.

4.4.2. Materiales

Entre todos los materiales empleados en la fabricación externa de una pala de pádel, hay un claro ganador, y es la fibra de carbono, utilizada en prácticamente la totalidad de estas, dadas sus propiedades, quedando la fibra de vidrio muy por detrás.

Para los materiales del núcleo, la cosa está más reñida, y es común ver tanto Goma EVA como Goma FOAM, aunque es ligeramente predominante el Etil Vinil Acetato.

Para la fabricación del marco, aunque la fibra de carbono sigue siendo el material más presente, el tubular de la pala presenta más variedad de materiales, ya que este se fabrica como combinación de varios, y a parte de fibra de carbono, puede estar compuesto de Kevlar, grafeno, fibra de basalto, e incluso de materiales sostenibles como la fibra de lino o el corcho.

4.4.3. Tecnologías

Perfil aerodinámico: Es muy frecuente que hoy en día una pala tope de gama presente un perfil/marco diseñado con hendiduras aerodinámicas, que reduzcan la resistencia que opone el aire durante el movimiento de la pala.

Patrón de agujereado: El patrón de taladrado se diseña de forma que se logre aumentar en todo lo posible el punto dulce de la pala, sobre todo en palas de formato diamante que tienen una penalización mayor en el control del golpe.

Textura de la superficie: La inmensa mayoría de palas de alta gama presenta algún tipo de rugosidad en la superficie de golpeo, ya sea tipo rugoso arenoso o rugoso 3D. La posibilidad de poder aportar efectos en la pelota tras el impacto es un factor crucial para jugadores de máximo rendimiento.

Elementos anti-vibraciones: Prácticamente todas las palas presentan elementos que reducen las vibraciones generadas durante el impacto de la pelota, con ánimo de disminuir el riesgo de lesiones en los jugadores. Los “Dampeners”, unos pequeños cilindros huecos hechos a base de elastómeros se encuentran en la mayoría de las palas hoy en día, y van colocados en los orificios de la pala. Estos elementos además de reducir considerablemente las vibraciones generadas también permiten modificar el balance de la pala, ya que pueden colocarse libremente en cualquier posición de la pala, llevando de esta manera la distribución del peso hacia donde sea conveniente.

También es común la inclusión de elastómeros en la empuñadora, capaces de absorber vibraciones, evitando que estas se transmitan al brazo del jugador en su gran mayoría.

5. MATERIALES

Previamente se mencionaron los principales materiales que intervienen en la fabricación de palas de pádel. A continuación, se estudiarán más en detalle las propiedades químicas y físicas de cada uno, comparándolas entre ellos, para finalmente elegir una combinación de materiales óptima para la pala a diseñar, capaz de cumplir con las prestaciones según el estilo de juego.

Para ello, se dividen los materiales en función de si estos se emplean en el núcleo o en capas exteriores de la pala.

5.1. Materiales del Núcleo

Se comenzará por los materiales que conforman el interior de la pala, y que determinarán la capacidad de absorción del impacto, así como su reactividad, de entre otras propiedades.

5.1.1. Etil vinil acetato

El Poli (etileno-co-vinil acetato) o EVA, es un polímero termoplástico obtenido a partir de la combinación de monómeros de acetato de vinilo y etileno [21]. Designado como EVA por sus siglas en inglés (Ethylene Vinyl Acetate), es un tipo avanzado de polietileno.

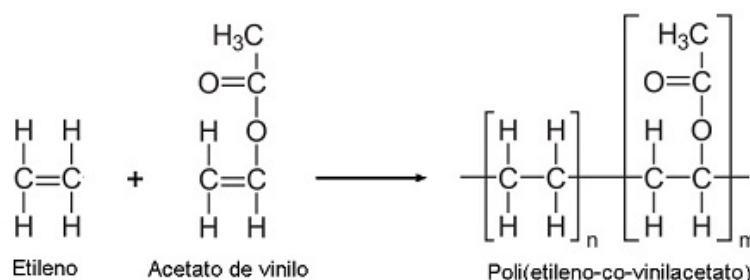


Figura 1. Estructura química del Etileno Vinil Acetato.

Propiedades químicas

Los copolímeros de etileno y acetato de vinilo se fabrican en cualquier proporción de ambos monómeros, aunque el más común en la industria es aquel fabricado con un porcentaje de acetato de vinilo que oscile entre el 10 % y el 40 %. Si el acetato de vinilo (VA) interviene en más del 40 %, los productos adquieren una consistencia blanda y gomosa, pudiendo reticularse como el caucho, de forma que su comportamiento es similar al de un elastómero a temperatura ambiente [21]. Esta propiedad no sería compatible con las prestaciones esperadas en una pala de pádel.

A diferencia del polietileno (PE), al aumentar el contenido de VA, la rigidez y dureza disminuyen, sin embargo, aumenta la resistencia a la tracción

y al impacto, la flexibilidad y la capacidad de alargamiento. Pero una mayor presencia de VA también se traduce en una menor resistencia a la deformación por calor.

Por otro lado, un mayor contenido de VA supone una mejora de la resistencia a la tensión y a la fisuración y a la intemperie [21]. En cambio, empeora la resistencia química y se incrementa la absorción de agua. También, el incremento de VA se asocia con una disminución de la cristalización, registrándose al mismo tiempo un aumento de la densidad, ya que la presencia de átomos de oxígeno es mayor.

Mayor % de Acetato de Vinilo (VA)	
Aumenta	Disminuye
<ul style="list-style-type: none">▪ Transparencia▪ Flexibilidad▪ Compatibilidad con polímeros▪ Aceptación de cargas▪ Adhesión▪ Coeficiente de fricción▪ Permeabilidad▪ Solubilidad▪ Densidad▪ Resistencia al cuarteamiento por tensiones	<ul style="list-style-type: none">▪ Cristalinidad▪ Rigidez▪ Punto de fusión▪ Punto de reblandecimiento▪ Aislamiento eléctrico▪ Resistencia en rotura▪ Resistencia química▪ Dureza▪ Temperatura de transformación

Tabla 1. Propiedades de los copolímeros EVA en función del contenido en VA (Boletín Técnico Repsol, 1995).

La tabla previa muestra alguna de las propiedades de la Goma EVA y como estas se ven afectadas en función del contenido de VA [22]. Las espumas EVA empleadas en los núcleos de las palas frecuentan densidades entre los 20-50 kg/m³. En función de las prestaciones deseadas para la pala, el contenido de VA de la Goma EVA varía.

Síntesis de la Goma EVA

El proceso de síntesis de la Goma EVA se produce por la polimerización de etileno a través de radicales libres, con temperaturas entre 150 - 280 °C, y presiones de 1000 a 3000 bares. Al reactor de polimerización se le agrega una corriente controlada de comonomero de VA, y la reacción toma lugar dentro de un recipiente de alta presión llamado autoclave, sometido a agitación. Los



productos obtenidos en este procedimiento tienen contenidos de acetato de vinilo de hasta un 30 % en peso.

Características

La principal característica del EVA es que se trata de un material plástico liviano, el cual se puede conseguir en multitud de formas semiflexibles, con todo tipo de densidades. Esto se debe a la facilidad que tiene este material para ser troquelado, impreso, cortado o pegado.

Sus características más destacables son:

- Alta flexibilidad y transparencia, con buen comportamiento a baja temperatura.
- Excelente resistencia térmica, capaz de soportar temperaturas considerables sin sufrir deformaciones significativas.
- Excelente memoria elástica.
- Alta resistencia a la tracción.
- Baja absorción de agua, prácticamente impermeable. Permite su lavado.
- Textura agradable al tacto, además de ser inoloro o con muy poco olor, que no requiere la adición de un aromatizante.
- Es un producto no tóxico, que permite su reciclado o incinerado.
- Apropiado para su uso en contacto con alimentos.
- Fácilmente manejable y moldeable, siendo un producto de alta calidad que ayuda a disminuir el coste de artículo procesado.
- Alto coeficiente de fricción.

Aplicaciones

Las prestaciones de calidad que permite este material hacen del EVA un plástico ideal para la fabricación de una enorme variedad de productos de consumo, estando presente en diversos sectores:

- La **industria del calzado** es uno de los principales sectores de aplicación, con un 50 % de la utilización global de EVA dedicada a este sector anualmente. Esto es debido a que las propiedades de este material son muy compatibles con las necesidades del calzado.
- Los **adhesivos de fusión por calor** son en su mayoría fabricados a partir de EVA, con un contenido de acetato de vinilo entre el 14-35 %. El peso molecular afecta en las propiedades adhesivas y reológicas de este tipo de adhesivos.
- Hoy en día, es muy común el empleo de Goma EVA en multitud de **accesorios deportivos**, ya sea para equipos de deportes de contacto, flotadores, balones de fútbol, tablas de surf, palas de pádel, etc.

- El EVA también se utiliza en **ingeniería biomédica**, en dispositivos empleados para la administración de fármacos, de forma que liberen lentamente un compuesto con el tiempo.
- Sus excelentes propiedades elásticas sumado a una escasa absorción de agua, hacen que la EVA se utilice en la **fabricación de componentes herméticos** de diferentes ámbitos, desde piezas para automóviles hasta juntas de estanqueidad en tapas de bebidas carbonatadas.
- Las láminas de EVA en combinación con el PVB (polivinilbutiral) se emplean en la fabricación de **vidrios de seguridad**, ya que mantienen unidas las láminas de vidrio, evitando que estas se astillen y desprendan pedazos de vidrio en su rotura.
- También hay aplicaciones de la EVA en **paneles solares**, trabajando como adhesivo para encerrar módulos fotovoltaicos, con el fin de ofrecer soporte estructural, así como un buen aislamiento eléctrico.



Ilustración 16. Aplicaciones de la Goma EVA en la actualidad.

5.1.2. Espuma de Polietileno

El polietileno (PE) es un polímero termoplástico cuya unidad monomérica es el etileno [22]. Hoy en día es el material plástico más común en todo el mundo. Su estructura química básica consiste en una cadena de átomos de carbono (C) unidos entre sí, con dos átomos de hidrógeno (H) unidos a cada carbono. Para abreviar la escritura del polietileno, debido a la longitud de las cadenas que lo forman, puede expresarse como $(C_2H_4)_n$.

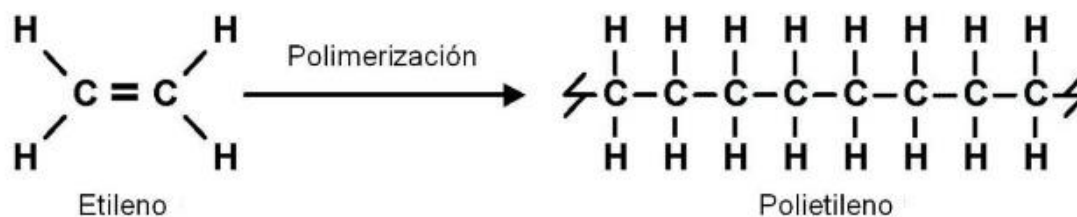


Figura 2. Estructura química del Polietileno.

Existen diferentes tipos de polietileno en función de la ramificación de sus cadenas, con diferentes densidades y propiedades físicas. Principalmente se dividen en, polietileno ramificado o de baja densidad, LDPE, y polietileno lineal (no ramificado) de alta densidad, HDPE.

Propiedades generales

En comparación con la mayoría de los plásticos, el PE tiene menos resistencia, dureza y rigidez. A cambio, posee una gran capacidad de estirado, con una resistencia al impacto muy alta, incluso a bajas temperaturas.

Todos los tipos de PE presentan un aislamiento eléctrico excelente, con buena resistencia a las corrientes parasitarias, pero tienden a acumular cargas electrostáticas.

Además, el PE tiene una resistencia excelente frente a ácidos, bases, líquidos orgánicos polares, aceites y grasas. La absorción de agua y la permeabilidad al vapor de agua son muy bajas, en cambio, dicha permeabilidad es grande con respecto al B_2 , O_2 y CO_2 . El PE tiene baja resistencia a la intemperie, aunque este defecto se puede mitigar con la adición de determinados pigmentos o antioxidantes. El PE es combustible.

A parte del LDPE y del HDPE, cabe destacar otro copolímero de etileno que posee un grado de ramificación intermedia, conocido como polietileno de baja densidad "lineal", o LLDPE. Las propiedades que distinguen al LLDPE de los LDPE y HDPE son una mayor resistencia a la tracción, al desgarro progresivo y a la perforación, mayor resistencia al impacto a temperaturas muy bajas, y mayor resistencia a la tenso fisuración.



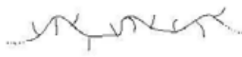
	LDPE	LLDPE	HDPE
Estructura Molecular			
Grado de Ramificación	Alto, 20-40, ramas de cadena corta y larga	Medio, 15-30, ramas de cadena corta	Bajo, 1-10, ramas de cadena corta
Cristalinidad	40-50	55-65	70-75
Intervalo de Fusión (°C)	105-110	115-125	125-135
Densidad aparente (g/ml)	0,86-0,92	0,92-0,94	0,94-0,965
Resistencia, Dureza	Escasa	Media	Alta
Alargamiento	Alto	Medio (Puede ser muy alto)	Bajo

Tabla 2. Influencia de la estructura molecular sobre las propiedades de los distintos tipos de PE (orientativo).

Síntesis

Los procedimientos actuales más generalizados en la producción de PE son la polimerización por radicales libres, junto al proceso de Ziegler-Natta.

- Polimerización por radicales libres: El proceso comienza aplicando un iniciador de radicales el cual se descompone formando un radical libre. Este radical ataca a una molécula de etileno, creando un nuevo radical. El radical recién formado reacciona con otras moléculas de etileno, generando una cadena creciente cuya polimerización finaliza al combinarse dos radicales libres. A través de este método se consiguen polietilenos con estructura altamente ramificada y de menor densidad.
- Polimerización con catalizadores Ziegler-Natta: El etileno reacciona consigo mismo sobre la superficie de un catalizador Ziegler-Natta (complejos de titanio y aluminio), el cual permite la polimerización del etileno a presiones y temperaturas más bajas que con el método anterior. Este proceso produce polietileno de cadenas no tan ramificadas (lineales), con mayor densidad.

La obtención de la espuma de polietileno es posible gracias a la adición de agentes espumantes. Por definición un agente químico de espumación es un compuesto orgánico o inorgánico, o una mezcla de productos, que por acción del calor y en un intervalo de temperatura adecuado, se descompone generando subproductos sólidos y gaseosos de diversa naturaleza, siendo el gas producido el responsable del proceso de espumación [22].

Características

La espuma de polietileno no es más que polietileno expandido mediante agentes espumantes. Esta posee diversas cualidades que la convierten en un material de especial interés, siendo sus principales características las mostradas a continuación:

- Material extremadamente ligero, debido a su estructura celular cerrada la cual permite atrapar aire en su interior.
- Posee una alta capacidad de recuperación tras ser deformada.
- Excelente aislamiento térmico dado su bajo coeficiente de conductividad térmica. Además de tener buena capacidad de absorción de sonido.
- Baja absorción de agua, siendo un material resistente a ambientes húmedos.
- Muy buena resistencia a multitud de agentes químicos.
- Es un material no tóxico.
- Material de fácil manipulación, puede ser cortada, laminada y moldeada en diferentes formas y tamaños, convirtiéndola en un material versátil con muchas posibilidades de personalización.

Aplicaciones

La versatilidad de la espuma de polietileno la convierte en un material indispensable en una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales destacan:

- Ampliamente utilizada en el **sector de embalaje**. Su excelente resistencia a impactos hace de la espuma de PE un material idóneo para revestir todo tipo de productos.
- Muy empleada como **aislante térmico y acústico** en diversos elementos.
- También se utiliza en la **industria automotriz**, para recubrimiento de interiores o elementos protectores de determinadas piezas.
- Cada vez está más presente en el **mundo deportivo**, utilizada en la fabricación esterillas deportivas, o equipo de protección como rodilleras o coderas. También está presente en el núcleo de muchas palas de pádel.
- Importante su aplicación en el **sector de la construcción**, estando presente en juntas de dilatación para absorber el movimiento y evitar

daños estructurales, y también empleada como barrera para la humedad en construcción de suelos y paredes.



Ilustración 17. Aplicaciones de la Espuma de PE en la actualidad.

5.2. Materiales del Perfil y Marco

Seguidamente, se analizarán los materiales presentes en las capas exteriores de la pala, es decir, en la superficie de golpeo y el marco. Existen multitud de posibilidades y combinaciones de materiales para formar el perfil y el marco de una pala, sin embargo, a continuación, se explican los materiales con mayor presencia en el mercado, y algún otro menos frecuente, pero con propiedades interesantes que ofrecer.

5.2.1. Fibra de Carbono

La fibra de carbono es un material (no metálico) polimérico con una morfología fibrosa en forma de filamentos, o una trenza de estos, que posee un contenido mínimo en carbono del 92 % en peso. Su estructura fibrosa posee propiedades ortotrópicas (diversas propiedades mecánicas en sus ejes principales ortogonales), por lo que es necesario combinar las fibras de carbono con otros materiales, para generar materiales compuestos con propiedades mecánicas más completas. Se suelen combinar con una matriz de resina termoestable.

Es un material de gran demanda, dadas sus propiedades mecánicas similares al acero siendo tan ligero como el plástico o la madera [23].

Estructura química

La estructura atómica de la fibra de carbono consiste en un conjunto de láminas de átomos de carbono ordenados en un patrón regular hexagonal, la cual es muy similar a la del grafito. La diferencia radica en la manera en que se entrecruzan las láminas. En el grafito, las láminas se sitúan paralela y uniformemente unas con otras, mientras que, la fibra de carbono es un material amorfo, sus láminas de átomos están colocadas de forma irregular.

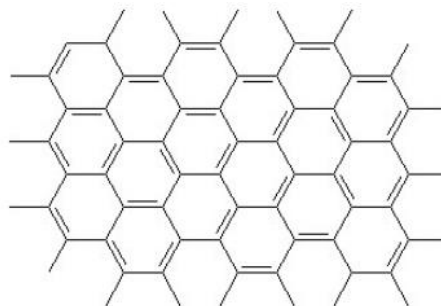


Figura 3. Estructura atómica de la fibra de carbono.

Síntesis

El proceso de obtención de la fibra de carbono comienza a partir de la quema controlada de una materia prima (precursor), comúnmente el

poliacrilonitrilo (PAN), pero puede emplearse rayón o breas. A continuación, se detallarán todos los pasos del método[24]:

1. Primeramente, se estiran los filamentos de PAN, orientándolos molecularmente de forma adecuada para que adquieran la estabilidad dimensional necesaria evitando que estas se fundan durante el calentamiento y mejorando las propiedades de la fibra.
2. Se lleva a cabo la oxidación del polímero a una temperatura controlada entre 200-300 °C. La adición de oxígeno a la molécula de PAN crea una estructura hexagonal, y el calor provoca que las respectivas unidades formen anillos.

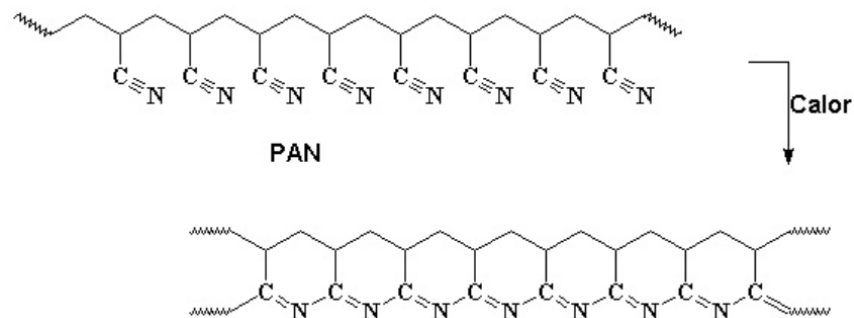


Figura 4. Formación de anillos de las respectivas unidades PAN.

3. Conforme aumenta la temperatura, los átomos de carbono se van desprendiendo de sus hidrógenos, y los anillos se vuelven aromáticos, lo que provoca átomos de mayor estabilidad debido a la descolocación electrónica en los enlaces. En intervalos de temperatura entre 400-600 °C, las cadenas de anillos piridínicos adyacentes se unen entre sí.

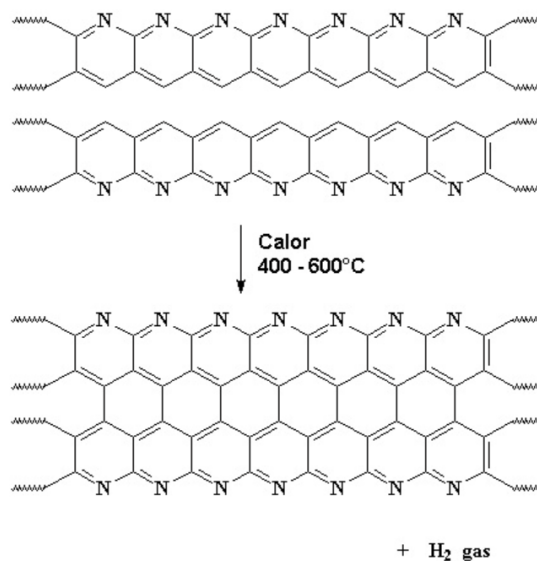


Figura 5. Unión de las cadenas de anillos piridínicos.

- Una vez la unión de las cadenas adquiere cierta estabilidad, se someten a temperaturas todavía más elevadas, por encima de los 1000 °C, en una atmósfera controlada e inerte, para que no se mantenga una combustión. Este proceso, conocido como carbonización, hace que se libere nitrógeno, permitiendo a las cintas unirse entre ellas y formando cintas de mayor anchura. Continuo a este proceso de unión, los átomos de hidrógeno y nitrógeno se siguen desprendiendo por acción del calor.

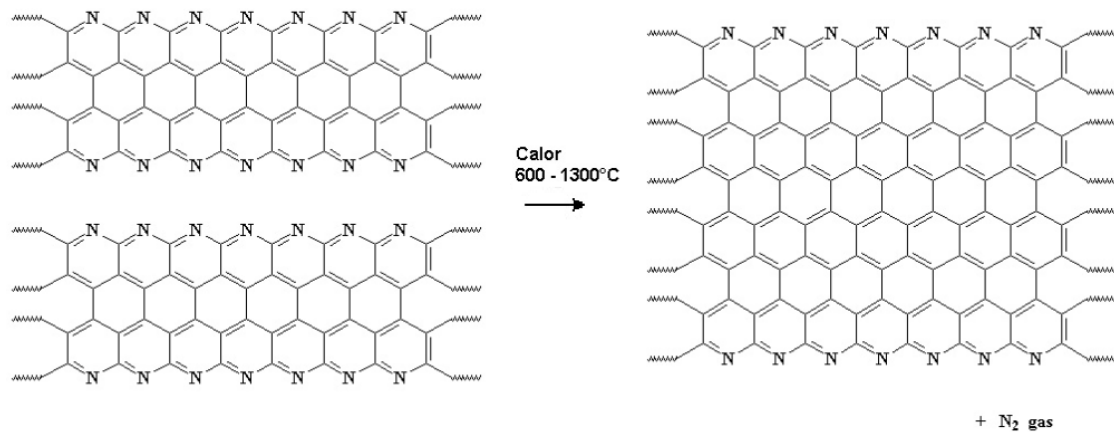


Figura 6. Desprendimiento de átomos de nitrógeno e hidrógeno por acción del calor.

El método finaliza con la formación de cintas de gran amplitud, con escasa presencia de nitrógeno, consiguiendo una estructura prácticamente de carbono puro.

- En casos en los que se desee conseguir fibras con mayor módulo de elasticidad, es común someter las cintas obtenidas durante la carbonización, a una etapa adicional llamada grafitización. Este nuevo tratamiento térmico alcanza temperaturas por encima de 2000 °C, aumenta la cristalinidad del carbono y mejora la orientación de los anillos en la fibra.

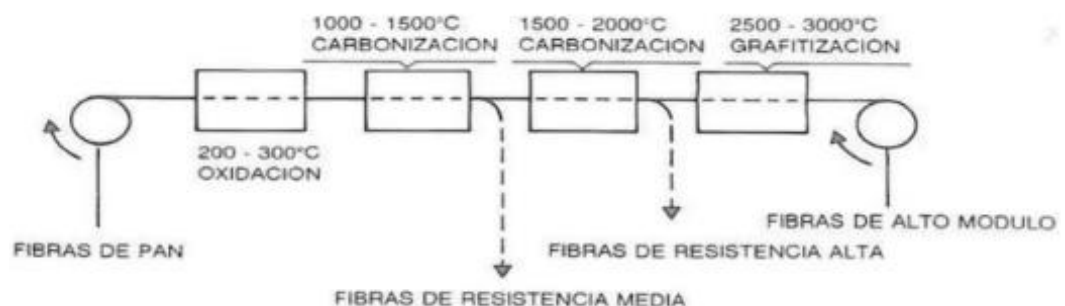


Figura 7. Etapas en la síntesis de la fibra de carbono.

- Por último, es frecuente realizar un tratamiento superficial a las fibras de carbono con el objetivo de mejorar la adhesión con las resinas u otros

materiales en aplicaciones compuestas. Suele realizarse con la aplicación de un producto catalizador.

Clasificación

Atendiendo a las diferentes propiedades mecánicas que posean, las fibras de carbono pueden clasificarse en [25]:

- Fibras de ultra-alto módulo elástico (UHM): Aquellas con el módulo de elasticidad más elevado, superior a los 500 GPa.
- Fibras de alto módulo elástico (HM): Presentan un módulo de elasticidad entre los 300-500 GPa, pero con una relación resistencia a la tracción/módulo de tensión del 1%.
- Fibras de módulo elástico intermedio (IM): Valores de módulo elástico entre 200-300 GPa, y relaciones de resistencia a la tracción/módulo del 1% también.
- Fibras de alta fuerza elástica (HT): Poseen valores de módulo de elasticidad inferiores a 100 GPa, en cambio, su resistencia a la tracción es superior a los 3 GPa, con relaciones de resistencia a la tracción módulo entre el 1,5-20%.
- Fibras de súper alta resistencia (SHT): El módulo de elasticidad es muy reducido, pero con resistencias a la tracción superiores a los 4,5 GPa.

Características

La fibra de carbono es un material con una combinación única de propiedades físicas, químicas y mecánicas, de entre las que destacan:

- Material de baja densidad, muy ligero, en comparación con materiales empleados para fines similares como el acero. Siendo de 1750 kg/m³ la de la fibra, y 7850 kg/m³ la del acero.
- Es un buen conductor eléctrico, de baja conductividad térmica. Posee una gran capacidad de aislamiento.
- Buena resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma (con matrices termoestables). El coeficiente de dilatación térmica prácticamente nulo.
- Excelente resistencia en ambientes alcalinos y externos susceptibles de corrosión.
- Inercia química y buenas propiedades ignífugas.
- Posee un acabado de brillo superficial que le otorga un aspecto elegante (en función del proceso de fabricación)

- Material muy versátil, de fácil adaptación a geometrías complejas, además de que permite ser pintado o recubierto con otros productos para mejorar o modificar su apariencia.
- Alta resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Excelente resistencia a la fatiga.
- Material flexible con buena resistencia al impacto.
- Alta rigidez (valores específicos del orden de 2 a 6 veces los del acero).
- Elevado precio de producción, ya que se trata de un proceso de larga duración y elevado aporte energético.

Aplicaciones

Las excelentes propiedades mecánicas que ofrece la fibra de carbono la han convertido en una fibra altamente valorada en una amplia gama de aplicaciones, principalmente usada en los siguientes ámbitos:

- Dada la increíble resistencia de la fibra de carbono en relación con su ligereza, hacen de este un material idóneo para su aplicación en la **industria aeronáutica**, principalmente en alas y fuselajes.
- De la misma forma, sus propiedades mecánicas lo convierten en un material muy usado en el **sector automovilístico**, para la fabricación de chasis, volantes, llantas, cascos, etc. Destaca su continua aplicación y desarrollo en el ámbito de las competiciones de motor.
- También se ve en la **industria naval**, para la fabricación de cascos y componentes de barcos, así como mástiles y aparejos, dada su excelente resistencia a la corrosión.
- Cada vez con más frecuencia en el **sector de la construcción**, como refuerzos estructurales de diversas edificaciones, en paneles de fachada que combinan ligereza y resistencia, etc.
- Muy presente en la **industria del deporte**, en chasis de bicicletas, palos de golf, raquetas, esquís, cañas de pescar, cascos y otras protecciones, etc.
- Comúnmente empleado en la **industria electrónica y robótica**, en la fabricación de componentes internos, ordenadores portátiles, carcasas para dispositivos electrónicos, drones, brazos robóticos, etc.
- Aplicaciones en la **industria armamentística**, en elementos móviles como vehículos militares blindados o drones, también para protección personal como chalecos antibalas o cascos, y en armas cuerpo a cuerpo.

- Su acabado elegante promueve su empleo en la fabricación de **accesorios** como relojes, gafas, carteras, etc.

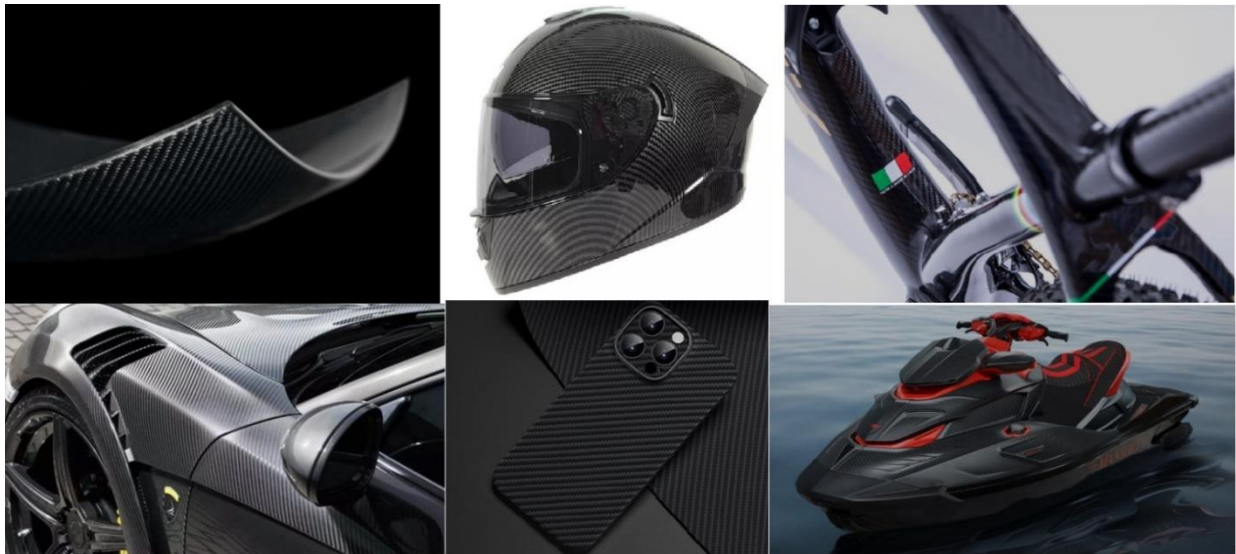


Ilustración 18. Aplicaciones de la fibra de carbono en la actualidad.

5.2.2. Fibra de Vidrio

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos poliméricos extremadamente finos, compuesto principalmente de sílice (SiO_2). Se emplea usualmente aglomerados con resinas para formar materiales compuestos con estructuras más resistentes.

Estructura química

El vidrio se trata de un material amorfo, que no posee estructura cristalina regular. La estructura molecular del vidrio tiene sílice (SiO_2) como base, siendo la unidad básica de la estructura el tetraedro SiO_4 .

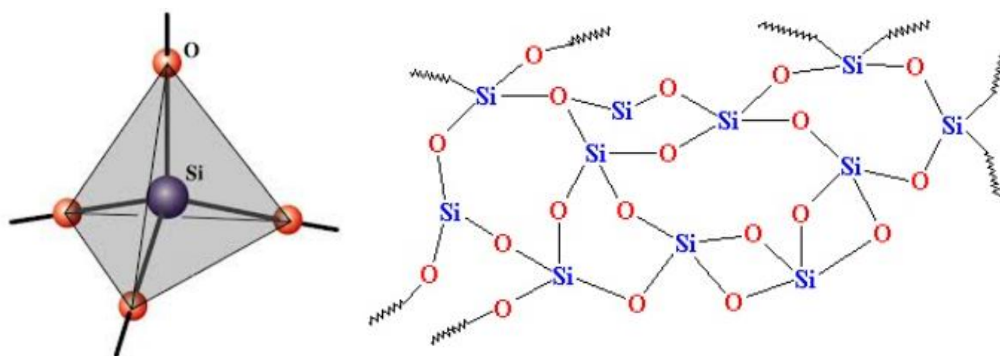


Figura 8. Estructura química del vidrio.

Síntesis y Tipos

Cuando se eleva suficientemente la temperatura, es posible someter al vidrio a un proceso de fibrado. Se podría decir que el vidrio no tiene un punto de fusión verdadero, pero a partir de los $1200\text{ }^\circ\text{C}$ este comienza a ablandarse, adquiriendo propiedades químicas similares a las de un material fundido. Concretamente a $1713\text{ }^\circ\text{C}$ las moléculas adquieren libertad de movimiento, a partir de estas temperaturas, el vidrio fundido se extruye a través de orificios extremadamente pequeños conocidos como hileras. A medida que atraviesan los orificios, los filamentos de vidrio se enfrían rápidamente, impidiendo la formación de una estructura ordenada, manteniendo la estructura amorfa del vidrio.

En su estado polimérico, se forman configuraciones tetraédricas de SiO_4 , con el átomo de silicio en el centro y cuatro átomos de oxígeno en los vértices. Posteriormente estos átomos forman redes de enlaces compartiendo los oxígenos de las esquinas.

Sin embargo, no es lo común realizar fibra a partir de la sílice pura, debido a las altas temperaturas de trabajo requeridas. Por ello, lo habitual es

la introducción de impurezas en el vidrio, en forma de otros materiales, para reducir la temperatura de fusión del vidrio, facilitando la obtención de las fibras.

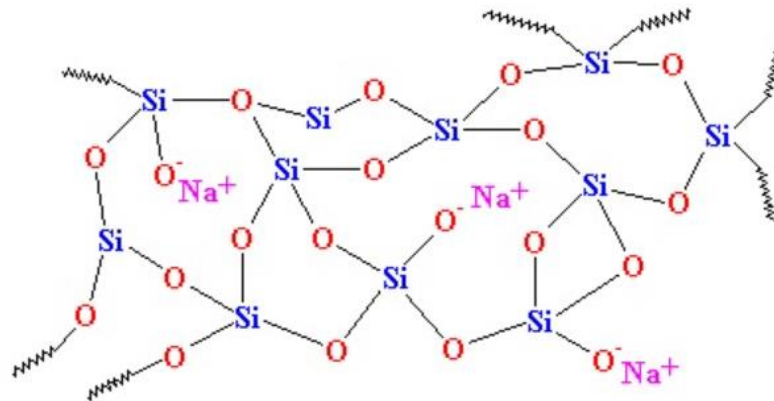


Figura 9. Estructura química de un vidrio a base de sílice.

En la práctica, los vidrios más empleados son aquellos a base de sílice con al menos dos silicatos en disolución, un silicato alcalino, y un silicato alcalinotérreo. En función de los silicatos añadidos, se obtienen distintos tipos de vidrio los cuales se diferencian los tipos A, C, D, E, R y S.

Entre ellos, el vidrio E representa la mayoría del vidrio textil empleado en materiales compuestos, de uso general y con buenas propiedades dieléctricas. La fibra de vidrio E también es la más utilizada tanto en industria textil como en materiales compuestos, representando más del 90% de los refuerzos [26].

El vidrio A (alto contenido en álcali), posee un módulo elástico menor que el E, siendo menos resistente. El vidrio C se trata de un vidrio intermedio entre el A y el E, empleado fundamentalmente en las capas superficiales de estructuras anticorrosión.

Los vidrios especiales R y S tienen una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los demás tipos. Utilizados en aplicaciones de elevadas características mecánicas, que requieran alta resistencia a la fatiga, temperatura y humedad.

Finalmente, el vidrio D tiene excelentes propiedades dieléctricas, y está destinado a la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación. Los materiales a base de vidrio D tienen pérdidas eléctricas muy débiles, a ello se debe su empleo como material permeable a las ondas electromagnéticas.

Constituyentes % en peso	Vidrios Polivalentes	Vidrios Resistentes a los Ácidos		Vidrios Resistentes a los álcalis		Vidrios alta resistencia mecánica		Vidrios Dieléctricos	
	Tipo E	Tipo A	Tipo C			Tipo R	Tipo S	Tipo D	Sílice
Sílice SiO ₂	53-54	70-72	60-65	65-70	62-75	60	62-65	73-74	100
Alumina Al ₂ O ₃	14-15,5	0-2,5	2-6	-	0-6	25	20-25	-	-
Cal CaO	Total 20-24	5-9	14	4-8	-	6	-	0,5-0,6	-
Magnesio MgO		1-4	1-3	-	-	9	10-15		-
Óxido de Boro	6,5-9	0-0,5	2-7	-	0-6	-	0-1,2	22-23	-
Flúor F	0-0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
Óxido de Sodio	≤1	12-15	8-10	14-20	13-21	-	0-1,1	1,3	-
Ox. de Zirconio		-	-	-	7-17	-	-	-	-
Ox. de Potasio		1	-	0-3	-	-	-	-	1,5
Ox. de Hierro		-	-	-	0-5	-	-	-	-
Ox de Titanio		-	-	6-12	0-4	-	-	-	-
Óxido de Zinc	-	-	-	-	1-10	-	-	-	-
Fluoruro Cálcico F ₂ Ca	-	-	-	-	0-2	-	-	-	-

Tabla 3. Composición de los diferentes tipos de vidrio fibrado [26].

Fabricación

Existen dos métodos principales de elaboración de la fibra de carbono, el proceso de fusión directa, y el proceso de fusión de bolas. Pero en ambos se distinguen las siguientes etapas fundamentales [26]:

1. **Composición-Fusión:** Las materias primas, adecuadamente molidas, se dosifican con precisión y se mezclan de forma homogénea. Posteriormente, la mezcla se introduce en un horno de fusión, y se calienta a una temperatura concreta. Para el vidrio E, son necesarias temperaturas de fusión del orden de 1550 °C.
2. **Fibrado:** La mezcla fundida en el horno se distribuye por canales y alimenta a las hileras, baños de platino/rodio con forma prismática que presentan agujeros calibrados en su base. El vidrio fundido se mantiene en la hilera a 1250 °C, temperatura que permite su colada por gravedad. A la salida de la hilera, el vidrio se estira rápidamente y se produce su enfriamiento, primero por radiación y después por pulverización de agua, obteniéndose de esta manera filamentos de varias micras de diámetro, uno por cada agujero.
3. **Ensimado:** Según salen de la hilera, el conjunto de filamentos desnudos es inutilizable directamente, ya que las propiedades deseadas no están completas, no hay cohesión entre ellos, no resisten la abrasión, sufren

los ataques del agua, etc. Para solucionar este defecto y dotar de nuevas propiedades a la fibra, se revisten los filamentos con una fina película (ensimaje), generalmente constituida por una dispersión acuosa de diversos compuestos químicos. El ensimaje se añade a los filamentos a la salida de la hilera, cuando el vidrio todavía tiene una temperatura entre 80 y 120 °C. De entre las funciones del ensimado, destacan, aportar integridad a los filamentos, aumentar o disminuir la rigidez, proteger de la abrasión, eliminar la electricidad estática y favorecer la impregnación del vidrio con la resina.

4. **Bobinado:** El conjunto de filamentos obtenido se agrupa en una o varias unidades para dar lugar a productos finales o intermedios, los cuales se bobinan de acuerdo con diferentes formas y geometrías.
5. **Secado:** Finalmente, los productos procedentes del bobinado atraviesan distintos dispositivos de secado, para eliminar el exceso de agua generado con el ensimaje.

Características

La fibra de vidrio es un material de propiedades considerables, reflejadas particularmente cuando actúa de refuerzo en materiales compuestos. A continuación, se muestran las características más destacables de esta fibra [26]:

- Resistencia mecánica: Su resistencia específica (tracción/densidad) es superior a la del acero.
- Características eléctricas: Excelente aislante eléctrico, incluso con espesores reducido.
- Incombustibilidad: Se trata de un material mineral, que no propaga la llama ni origina calor ni humos ni toxicidad, es incombustible por naturaleza.
- Estabilidad dimensional: Baja sensibilidad a las variaciones de temperatura, además de un coeficiente de dilatación bajo.
- Compatibilidad con materia orgánica: Los diferentes ensimajes aportan la posibilidad de asociarse con numerosas resinas sintéticas y con alguna matriz mineral (yeso).
- Resistente a la intemperie: La fibra de vidrio no sufre alteraciones, no se pudre, y es insensible a la acción de roedores o insectos.
- Baja conductividad térmica: Puede actuar como material aislante, suprimiendo los puentes térmicos.
- Permeabilidad dieléctrica: Ideal para aplicaciones de telecomunicaciones.
- Resistencia a agentes químicos: La fibra de vidrio junto con una resina adecuada, puede formar materiales compuestos resistentes a los agentes químicos.

Aplicaciones

La combinación de propiedades que presenta la fibra de vidrio, lo convierte en un material muy versátil, empleado en multitud de sectores, destacando los siguientes:

- Aplicado en el **sector de la construcción** gracias a su débil conductividad térmica como elementos de aislamiento, y también como refuerzo estructural.
- Empleado en **automoción** para la fabricación de carrocerías, paneles de puertas, parachoques, además de en componentes interiores, aislamiento, o para reforzar discos y pastillas de freno.
- Sus excelentes propiedades mecánicas lo convierten en un material muy utilizado en el **sector aeronáutico**, en fabricación de fuselajes, alas y otros componentes.
- Muy utilizado en la **industria electrónica**, debido a que es un material permeable a las ondas electromagnéticas, se empleado sobre todo en la fabricación de materiales electrónicos de telecomunicación.
- También se encuentra la fibra de vidrio en el **sector energético**, en palas de aerogeneradores, torres eléctricas, postes, tuberías para el transporte de fluidos, etc.
- Muy común en equipamiento deportivo, empleada en una amplia gama de productos, tales como palos de golf, cañas de pescar, raquetas, tablas de surf, esquís, etc.



Ilustración 19. Aplicaciones de la fibra de vidrio en la actualidad.

5.2.3. Fibra de Aramida (KEVLAR)

El Kevlar es una fibra orgánica, de la familia de las poliamidas aromáticas, sintetizada por primera vez en 1965 por la química polaco-estadounidense Stephanie Kwolek [27], en aquel entonces trabajadora de la compañía DuPont, dueña de la patente. Se trata de un material con una combinación única de propiedades, como una enorme fuerza, módulo de elasticidad elevado, muy tenaz y con gran estabilidad térmica.

Estructura química

El Kevlar es un tipo de fibra conocida como aramida (poliamida aromática), en la que las moléculas forman cadenas de gran longitud, de millones de monómeros enlazados, altamente orientadas [27]. La estructura química básica de un monómero de Kevlar contiene 14 átomos de carbono, 2 átomos de nitrógeno, 2 átomos de oxígeno y 10 átomos de hidrógeno. Al tratarse de una poliamida, todos los grupos amida se encuentran divididos en grupos para-fenileno, es decir, los grupos amida están unidos al anillo fenilo en posiciones opuestas entre sí, en los carbonos 1 y 4.

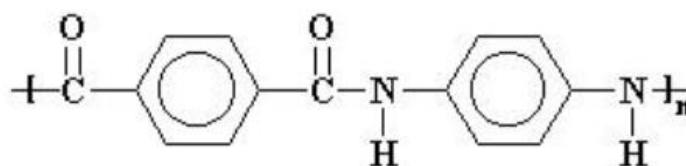


Figura 10. Estructura química de un monómero de Kevlar.

Las moléculas que componen una fibra de Kevlar se presentan orientadas en paralelo, disposición responsable de proporcionar una estructura cristalina. Esta cristalinidad de los filamentos del polímero de Kevlar contribuye notoriamente a la rigidez y fuerza únicas de este material.

Síntesis

La polimerización del Kevlar se lleva a cabo a través de una reacción de condensación entre dos monómeros, una diamina aromática, concretamente la p-Fenilendiamina (PPD), compuesto orgánico que presenta dos grupos amino (NH_2) unidos a un anillo bencénico, y un derivado del ácido tereftálico, el cloruro de tereftaloilo (TPC), el cual contiene dos grupos de cloruro de acilo (COCl) también unidos a un anillo de benceno.

Durante la reacción, el grupo amino (NH_2) de la p-Fenilendiamina reacciona con el grupo cloruro de acilo (COCl) del cloruro de tereftaloilo eliminando una molécula de cloruro de hidrógeno (HCl), dando lugar a un enlace amida ($-\text{CO}-\text{NH}-$). La reacción se repite, provocando la formación de

largas cadenas de polímeros con anillos bencénicos unidos entre si mediante enlaces amida.

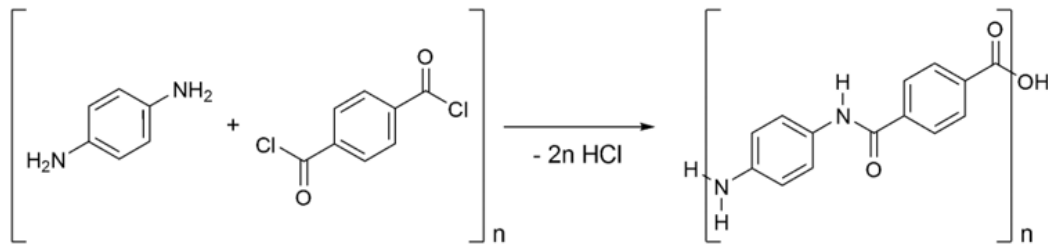


Figura 11. Reacción de polimerización del Kevlar.

La reacción se realiza controlando la temperatura, normalmente a temperaturas bajas debido a que es muy exotérmica, además de emplear solventes que permitan la precipitación del Kevlar.

A medida que se produce el crecimiento de las cadenas, el Kevlar comienza a precipitarse fuera de la solución dada su naturaleza insoluble. Posteriormente este se recolecta, y se disuelve en ácido concentrado, preparando de esta manera a las cadenas poliméricas para el proceso de hilado. A continuación, se extruye la solución cristalina formada a través de una hilera, formando filamentos muy delgados. A su salida, las fibras son sometidas a un baño de coagulación para eliminar el ácido sulfúrico y solidificar las fibras. Por último, se procede al estirado y orientado de las fibras, con el objetivo de alinear las cadenas poliméricas en la dirección de la fibra.

Tipos

Aunque existen varios tipos de Kevlar, empleados en aplicaciones más específicas, los dos más esenciales son, el Kevlar 29 y el Kevlar 49 [27], [28].

- Kevlar 29: Se trata de la fibra tal y como se obtiene del proceso de fabricación. Su densidad es relativamente baja y posee una gran resistencia a la tracción y a los impactos. Empleado principalmente en la fabricación de chalecos antibalas, armaduras de refuerzo, equipo de protección contra el fuego, cascos, guantes, cables y cuerdas, etc.
- Kevlar 49: Este tipo se utiliza junto a resinas para formar materiales compuestos de alta resistencia. De igual densidad que el 29, presenta mayor rigidez, resistencia y módulo elástico. Se emplea como material de refuerzo en componentes aeronáuticos, cascos de barcos, piezas de automóviles de alto rendimiento, así como en la fabricación de cables y cuerdas.

Propiedad	Unidad	KEVLAR 29	KEVLAR 49
Densidad Específica	g/cm ³	1,44	1,44
Tenacidad	MPa	2.920	3.000
Resistencia a la rotura	N	338	264
Módulo de Elasticidad	GPa	80	131
Módulo de Tracción	MPa	70.500	112.400
Módulo de Tracción (Con resina impregnada)	MPa	83.000	124.000
Elongación de Rotura	%	3,6	2,4
Contracción En agua a 100 °C. En aire seco a 177 °C	%	<0,1 <0,1	<0,1 <0,1
Calor Específico A 25 °C A 100 °C A 180 °C	(J/kg x K)	1.410 2.010 2.515	1.420 2.010 2.515
Conductividad Térmica	[W/ (m x K)]	0,04	0,04
Temperatura de descomposición	°C	427-482	427-482

Tabla 4. Propiedades típicas del Kevlar29 y 49 producido por DuPont [28].

Propiedades generales

El Kevlar es un material conocido por sus excelentes propiedades mecánicas y térmicas, siendo un material muy valorado en una amplia variedad de aplicaciones. Sus principales características son:

- Es un material muy resistente y relativamente ligero. Dispone de una resistencia a la tracción cinco veces mayor que la del acero por unidad de peso.
- A diferencia de otros materiales plásticos, no se funde. Se comporta razonablemente bien a muy elevadas temperaturas, y se descompone únicamente al superar los 420 °C.
- Es posible producir ignición en el Kevlar, pero la combustión generalmente se detiene cuando la fuente de calor se elimina.
- Las temperaturas bajas tampoco afectan al Kevlar. No existe una degradación apreciable por debajo de los -196 °C, siendo un material idóneo en condiciones árticas.



- Al igual que ocurre con otros plásticos, una exposición larga a luz ultravioleta provoca decoloración y degradación de las fibras.
- Muy resistente a una gran cantidad de químicos, aunque exposiciones largas ante fuertes ácidos o bases conseguirán degradar el material.
- El Kevlar permanece invariable después de estar expuesto durante 200 días a agua caliente. La humedad no tiene efecto alguno sobre sus propiedades.
- Es un buen aislante eléctrico debido a su baja conductividad eléctrica.

Aplicaciones

La combinación de alta resistencia a la tracción, ligereza, además de resistencia térmica y química, hacen del Kevlar un material único, utilizado en una amplia gama de productos hoy en día. Sus principales aplicaciones son:

- Plenamente utilizado en la fabricación de **equipos de protección**, tanto para los cuerpos de seguridad como para las fuerzas armadas, concretamente chalecos antibalas, aunque se fabrican cascos, guantes protectores, equipos de desactivación de explosivos, etc. El Kevlar proporciona una excelente protección ante impactos, además de contra el fuego o agentes químicos.
- Empleado como **material aislante** eléctrico en transformadores, motores eléctricos, generadores, etc. Además de como aislante térmico.
- Dada su increíble resistencia y ligereza, el Kevlar se usa en **la fabricación de cuerdas y cordones** para actividades industriales, deportivas y de rescate.
- En la **industria electrónica** se utiliza en cables y componentes electrónicos como refuerzo de protección ante todo tipo de daños. Además, se utiliza en equipos electrónicos por sus excelentes propiedades ignífugas.
- También tiene un papel crucial en la **industria textil** de alto rendimiento, en la fabricación de ropa resistente al calor, como trajes de bomberos, pilotos de carreras profesionales, equipos de rescate, etc.

- En el **sector deportivo** también está presente, en equipos de protección como pueden ser guantes, chalecos y cascos para diferentes disciplinas. Se encuentra a su vez en palas de pádel o raquetas de tenis y bádmiton, palos de golf, etc.



Ilustración 20. Aplicaciones del Kevlar en la actualidad.

5.2.4. Fibra de Basalto

El basalto es una roca ígnea volcánica máfica y extrusiva [29], originada a partir del enfriamiento y solidificación del magma. Siendo uno de sus constituyentes la sílice, al tratarse de un silicato oscuro, está formada principalmente por hierro y magnesio. Se encuentra compuesto mayoritariamente por dos minerales, el piroxeno y el feldespato, y, en menor medida, también está constituido por olivino o anfíbol.

La fibra de basalto se produce por estirado (hilado) de roca basáltica fundida. Similar a la fibra de carbono y la fibra de vidrio, se emplea como refuerzo de materiales compuestos, dadas sus buenas propiedades mecánicas y resistencia química, entre otras. Además, su proceso de fabricación es más ecológico que las fibras sintéticas al no requerir de productos químicos adicionales.

Estructura química

La estructura básica de todas las rocas obtenidas a partir de magma son silicatos. Si bien, dependiendo del origen la composición química varía ligeramente, por ello, en función del yacimiento de procedencia, la fibra de

basalto producida proporcionará unas características físico-químicas y morfológicas particulares.

El basalto es una roca ígnea volcánica extrusiva, es decir, la solidificación del magma se desarrolla en la superficie de la corteza terrestre, normalmente tras una erupción volcánica. Atendiendo a la composición mayoritaria, se trata de una roca ígnea máfica, mayoritariamente compuesta por silicatos oscuros (hierro y magnesio).

A pesar de la inmensa variedad de composiciones que puede tener el basalto, sus componentes principales son silicatos de distinta complejidad (piroxeno, olivino, y anfíbol) y un alumino-silicato de pagliocasa cálcico (feldespato) [29]. A continuación, se muestra de forma simplificada la estructura química simplificada de estos componentes:

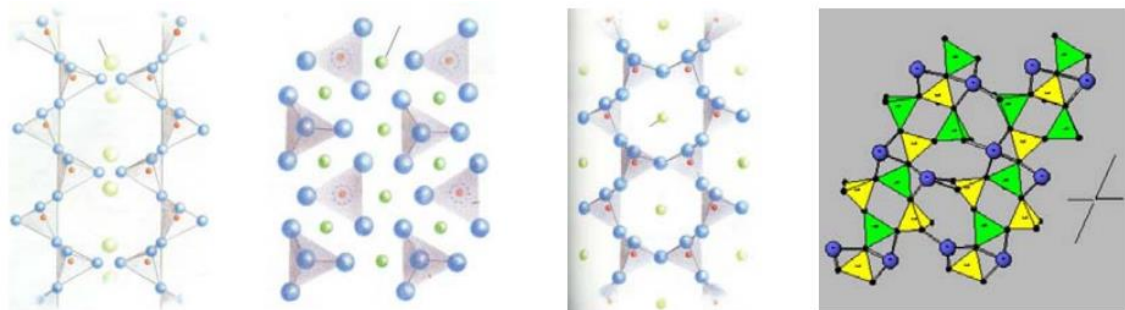


Figura 12. Estructura química simplificada del piroxeno, olivino, anfíbol y feldespato.

Además, en términos generales, la composición química del basalto incluye los siguientes óxidos, expresados en porcentaje de masa:

Sílice (SiO_2)	45-52 %
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	12-16 %
Óxido de Hierro (Fe_2O_3 y FeO)	9-15 %
Óxido de Magnesio (MgO)	5-12 %
Óxido de Calcio (CaO)	7-12 %
Óxido de Sodio (Na_2O)	2-3 %
Óxido de Potasio (K_2O)	0,5-2 %

Tabla 5. Composición química porcentual del basalto.

También es posible que pueda presentar otros óxidos en menor medida, como pueden ser el de Titanio (TiO_2), Manganeso (MnO) o Fósforo (P_2O_5).



Proceso de fabricación

La amplia variedad de composiciones posibles del basalto hace que la fabricación de la fibra de basalto sea un proceso con alta dificultad de control, ya que, en función de la materia prima utilizada, las propiedades de la fibra serán diferentes. Por este motivo, la estrategia recurrente empleada por los fabricantes es obtener toda la materia prima implicada en el proceso de un único yacimiento, con el objeto de homogeneizar las propiedades del producto final.

El proceso de fabricación de la fibra de basalto es similar al proceso de obtención de la fibra de vidrio, pero tiene mayor sencillez, y se podría decir que es un método más ecológico al no requerir de agentes químicos para la obtención de las fibras. A continuación, se detallan las etapas fundamentales del proceso de fabricación [29]:

1. **Extracción y puesta a punto del basalto:** Una vez el basalto ha sido extraído del yacimiento, este se tritura en pequeños trozos. La roca de basalto triturada se almacena en un silo (1). Posteriormente, mediante una estación de carga (2) y sistema transportador (3), se lleva la roca hasta la zona de alimentación del horno principal (4).
2. **Fusión:** La roca basáltica se funde en el horno principal (5) a temperaturas variables en función de la composición del basalto, en el intervalo 1450-1600 °C. Una vez fundida la roca, esta se trasvasa a un segundo horno conocido como horno de mantenimiento (6). Este segundo horno es la principal diferencia con el proceso de obtención de la fibra de vidrio, siendo su objetivo homogeneizar la temperatura de la masa fundida, para de esta manera conseguir un proceso de hilado en continuo sin que se produzca la rotura de la fibra.
3. **Extrusión:** Según salen del horno de mantenimiento, se hace pasar la mezcla fundida a través de una matriz de finos orificios conocida como “spinneret” (7), formándose los filamentos individuales a su paso.
4. **Tratamientos superficiales:** Una vez formados los hilos individuales se lleva a cabo el proceso de aplicación de componentes orgánicos (8), y se hace que los filamentos formen hebras (9) entre ellos.
5. **Bobinado:** Tras el enfriamiento de las fibras, empleando una estación tensora (10) se procede al enrollado de los filamentos fabricados.

La figura mostrada a continuación representa de forma esquemática las etapas del proceso ya mencionadas:

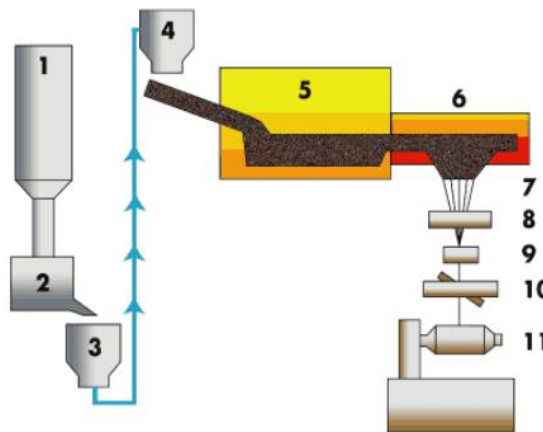


Ilustración 21. Etapas en el proceso de obtención de la fibra de basalto.

Propiedades

La fibra de basalto es un material de alto rendimiento, con una combinación prometedora de propiedades físicas y químicas, siendo sus principales características las siguientes [30]:

- Su densidad ronda en el rango aproximado de 2,65-2,8 g/cm³, similar a la fibra de vidrio, pero algo más pesada que la fibra de carbono.
- La resistencia a la tracción es considerablemente alta, con valores entre 3-4,84 GPa.
- Presenta un módulo de elasticidad entre 79-93 GPa, lo que le convierte en un material muy resistente a las deformaciones bajo tensión, alcanzando resultados comparables con la fibra de vidrio o de carbono.
- Su resistencia al impacto es excelente, siendo un material con gran capacidad de absorber energía y resistir daños físicos.
- El alargamiento de rotura de la fibra de basalto se encuentra entre el 2,6 y el 3,15 %, confiriendo al material una decente combinación entre resistencia y flexibilidad.
- Tiene baja conductividad térmica. Es un material capaz de resistir con facilidad temperaturas muy elevadas sin perder propiedades estructurales o mecánicas.
- Posee una excepcional resistencia a la corrosión, tanto frente a agentes químicos como a la oxidación, siendo un material idóneo frente a la intemperie.
- La fibra de basalto es químicamente inerte, puede estar en contacto con alimentos. Además, tiene una baja absorción de agua (alrededor del 0,1 %).
- Presenta una alta estabilidad frente a la radiación ultravioleta (UV), es un material muy resistente a la exposición solar en comparación con otras fibras sintéticas.

Aplicaciones

En vista a las interesantes propiedades de la fibra de basalto, su aplicación está presente en multitud de sectores, de entre los que destacan:

- Utilizado en el **sector de la construcción** como material de refuerzo en estructuras, aumentando la durabilidad y la resistencia a la corrosión de diferentes elementos estructurales.
- En el **sector aeroespacial**, se aplica en la fabricación de piezas cuyos requerimientos son muy exigentes, como una alta resistencia a la tracción o temperaturas extremas, además de ligeras.
- También se emplea en la fabricación de piezas en el **sector de la automoción**, como carrocerías ligeras, sistemas de protección térmica, aislantes sonoros, etc.
- Su increíble resistencia a la corrosión y su baja absorción de agua, hacen que sea un material presente en la **industria naval**, en cascos de barcos, sistemas de tuberías, etc.
- Gracias a su baja conductividad térmica, la fibra de basalto está muy presente en los elementos de protección térmica. Se utiliza para la fabricación de materiales ignífugos y barreras térmicas, incluyendo textiles que requieran alta resistencia a la abrasión.
- También se utiliza en el sector deportivo, para la producción de equipos deportivos que requieran de una combinación óptima de ligereza, resistencia y durabilidad.



Ilustración 22. Aplicaciones de la fibra de basalto en la actualidad.

5.2.5. Grafeno

El grafeno es un material nanométrico bidimensional, formado por una única capa de átomos de carbono fuertemente cohesionados en una red estructural con configuración hexagonal.

Sintetizado por primera vez en el año 2004 por Andre Geim y Konstantin Novoselov, ambos ganadores del Premio Nobel de Física en 2010, ha sido un material revolucionario consecuencia de su excelente combinación de propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas. Este hecho hace que sea uno de los nanomateriales más estudiados hoy en día. Además, al tratarse de un material compuesto plenamente por carbono puro, es ecológico y abundante en nuestra naturaleza.

Estructura química

El carbono presenta alotropías, es decir, este presenta diferentes propiedades físicas y químicas en función de la disposición de los átomos constituyentes de sus moléculas. El grafeno es una forma alotrópica del carbono [31].

La estructura molecular del grafeno es la de un cristal bidimensional, organizado en una red hexagonal plana, solo tiene un átomo de espesor. Cada átomo de carbono se encuentra covalentemente unido a otros tres átomos de carbono, con ángulos de 120° entre ellos, formando un enlace sp^2 entre ellos.

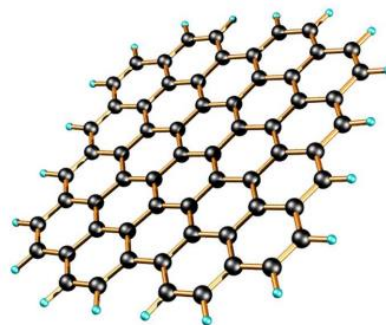


Figura 13. Estructura molecular del grafeno.

Síntesis

La obtención del grafeno ha avanzado considerablemente desde su descubrimiento en 2004. Existen diferentes métodos de obtención, principalmente basados en materiales cuyo bloque elemental es el grafeno o a partir de átomos de carbono procedentes de moléculas orgánicas, de entre los que destacan[32]:

1. **Exfoliación mecánica del grafito:** Método participativo de la obtención de grafeno por primera vez en 2004, se basaba en la exfoliación

micromecánica de piezas macroscópicas de grafito. Actualmente este proceso permite la exfoliación directa al frotar el grafito pirolítico altamente orientado contra una superficie, obteniendo láminas de grafeno de elevada calidad estructural. Sin embargo, la baja eficiencia de este método al involucrar en gran medida la actividad manual, hacen que no sea adecuado para la producción en cadena del grafeno.

2. **Exfoliación química del grafito:** Método basado en la intercalación de moléculas entre láminas de pequeño espesor de grafito, para posteriormente romper las fuerzas de Van der Waals los enlaces interlaminares a través de un proceso de vibración mediante ultrasonidos conocido como sonificación. Este método da lugar a láminas de grafeno de buena calidad estructural, pero de área superficial reducida
3. **Reducción química del grafito:** Método consistente en la introducción de grupos funcionales oxigenados, como hidroxilos, epóxidos y carboxilos, entre láminas de grafito mediante oxidación química. Posteriormente, se produce la exfoliación del grafito oxidado, debido a las fuerzas de repulsión entre las capas oxidadas, dando lugar a óxido de grafeno. El proceso termina con la reducción química del óxido de grafeno, a través de la cual se logra eliminar parcialmente los grupos oxigenados y restaurar la estructura de carbono conjugada, consiguiendo de esta manera grafeno reducido. Pero la presencia parcial de estos grupos funcionales conlleva una disminución en la calidad estructural de las láminas de grafeno obtenidas. Se trata de un método más económico y versátil que los demás.

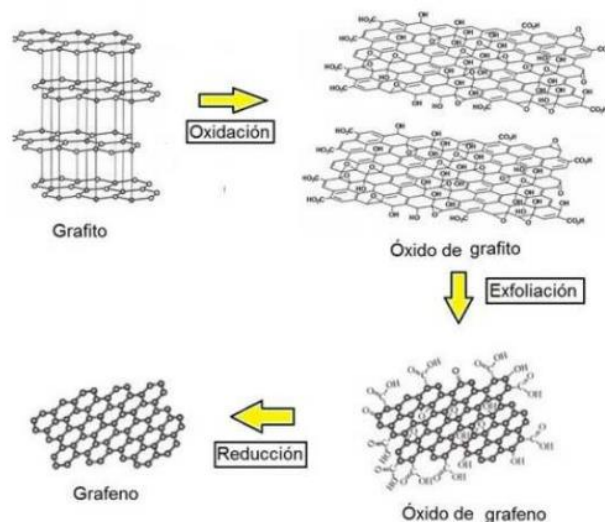


Figura 14. Reducción química de óxido de grafeno.

4. **Deposición química en fase de vapor (CVD):** El método se desarrolla en una cámara sellada a temperaturas entre 800 y 1000 °C. En su interior, un gas hidrocarbonado, usualmente metano (CH_4), se descompone en

carbono e hidrógeno en presencia de un sustrato metálico (níquel o rutenio). Los átomos de carbono se depositan en la superficie metálica, produciéndose la nucleación y posterior crecimiento de la lámina de grafeno. Este método permite sintetizar láminas monocapa o multicapa de grafeno (dependiendo del sustrato y las condiciones de reacción), de gran calidad estructural y tamaño, con elevada eficiencia, sin embargo, se trata de un proceso de mayor complejidad y costo que los anteriores.

Propiedades

El grafeno es un material destacado por sus excepcionales propiedades físicas y químicas, siendo uno de los materiales más prometedores en multitud de aplicaciones de la industria. De entre sus principales características, destacan las siguientes [31], [32]:

- Posee una resistencia a la tracción extremadamente alta, de 130 GPa, aproximadamente 200 veces más fuerte que el acero, además de ser mucho más ligero.
- Su módulo elástico también es notablemente elevado, cercano a 1000 GPa, convirtiendo al grafeno en un material de gran resistencia y rigidez, muy difícil de deformar.
- La densidad superficial del grafeno es muy baja, siendo 5 veces más ligero que el aluminio. Cada metro cuadrado de grafeno tiene un peso de 0,77 mg.
- Gracias a su estructura bidimensional, tiene una conductividad térmica y eléctrica sobresaliente.
- Es un material altamente flexible y elástico (superior a la fibra de carbono), capaz de soportar deformaciones del 20 % antes de alcanzar la rotura.
- Prácticamente transparente, ya que, a pesar de su única capa atómica, el grafeno tiene una absorción óptica de tan solo el 2,3 % del espectro de luz visible.
- Es hidrófugo, es decir, repele el agua. Esta propiedad lo convierte en un material idóneo ante la corrosión.
- Su estabilidad química también es elevada, aportando gran resistencia ante la corrosión y a la mayoría de los productos químicos. Aunque es capaz de reaccionar químicamente con otras sustancias para obtener nuevos compuestos.
- No es tóxico para las células biológicas. Y es bactericida, las bacterias no crecen en él, siendo compatible con alimentos.

Aplicaciones

La alta complejidad y elevado coste de producción del grafeno hacen que sea un material de accesibilidad limitada en el mercado. Sin embargo, sus propiedades lo convierten en un material prometedor en multitud de campos de aplicación. Los principales sectores que emplean grafeno son:

- Las excelentes propiedades eléctricas del grafeno han llevado a su aplicación en el **sector electrónico**, llegando a reemplazar al silicio en la fabricación de transistores. Además, su gran flexibilidad permite su empleo en la producción de pantallas plegables y circuitos electrónicos flexibles.
- Destacar su aplicación en la **optoelectrónica**, dadas sus propiedades ópticas y de transparencia, se emplea en celdas solares para aumentar el rendimiento de captura y conversión de la luz solar en energía.
- Hoy en día muy presente en **almacenamiento de energía**, ya que el grafeno, además de incrementar la capacidad de almacenamiento de energía en elementos como supercondensadores, baterías y celdas de combustible, permite aumentar la velocidad de carga.
- Empleado en la producción de composites avanzados, aprovechando las propiedades mecánicas óptimas que posee. Se utiliza para la fabricación de materiales compuestos en automoción y aeronáutica, revestimientos protectores de corrosión, equipamiento deportivo, etc.



Ilustración 23. Aplicaciones del grafeno en la actualidad.

5.2.6. Fibra de Lino

La fibra de lino se trata de una fibra celulósica, extraída de una planta dicotiledónea de la familia de las Lináceas, género *Linum*, especie *Linum Usitatissimum*. En cada tallo de la planta, de aproximadamente un metro de altura, crecen entre 80 y 100 hojas sésiles alternas. Las flores de la planta son blancas o azules y producen pequeñas esferas globulosas formadas por cinco lóbulos, cada cual contiene dos semillas [33].



Ilustración 24. Planta *Linum Usitatissimum*, de la familia de las Lináceas.

El cultivo del lino se remonta a la antigüedad, existen evidencias de su empleo en el Antiguo Egipto, en la confección de tejidos de excepcional finura. Rápidamente se extendió por diferentes continentes y culturas, y se comenzó a cultivar no solo para fines textiles, sino también por sus semillas, ya que de estas se extraía aceite de linaza.

Recientemente, la fibra de lino ha captado la atención de la industria de materiales compuestos gracias a su naturaleza renovable, bajo impacto ambiental y propiedades mecánicas competitivas frente a los materiales sintéticos predominantes en el mercado como la fibra de carbono o de vidrio.

Estructura química

La composición de la fibra de lino es variable, y depende de factores como el grado de fermentación experimentado durante el enriado o de operaciones posteriores que puede sufrir. Sin embargo, principalmente se compone de celulosa, hemicelulosa, pectina y lignina. Es posible establecer una media de valores de proporción de los principales componentes que forman la fibra de lino, se muestra a continuación[34]:

Celulosa	71,3 %
Hemicelulosa	18,5 %
Sustancias pécticas	2,0 %

Lignina	2,2 %
Ceras	1,7 %
Materiales solubles en agua	4,4 %

Tabla 6. Composición porcentual de los principales componentes de la fibra de lino.

Al tratarse de una fibra de composición celulósica es débil frente a la acción de los ácidos. Es posible reducir el color de la fibra por medio del blanqueo, adquiriendo una pureza y brillo muy apreciados, aunque pierde algo de resistencia al someterse a este método.

El lino es relativamente resistente a la suciedad, gracias a la lisura de sus fibras, y es capaz de soportar el lavado en caliente. Esta fibra no se ve afectada por los disolventes empleados durante el lavado en seco.

Síntesis de la fibra

La obtención de la fibra de lino es un proceso tedioso y complejo. La fibra de lino se encuentra entre el leño y la corteza de la planta. Para proceder a su extracción, es necesaria la separación de la parte leñosa y la corteza, además de la disolución parcial de una serie de materias resino-gomosas que mantienen las fibras unidas entre sí. Esta materia que actúa a modo de cemento o aglutinante se encuentra compuesto mayoritariamente por sustancias pécticas.

Las principales etapas que comprenden todo el proceso de obtención de la fibra de lino son las siguientes [34]:

1. **Cultivo:** El lino es cultivado en climas templados. Aproximadamente a los 100 o 120 días de crecimiento, son arrancadas del suelo las plantas junto a sus raíces (para mantener la longitud máxima de las fibras) de manera manual o mecánica. En este momento, se procede a desgargolar el lino, a través de un peine o una máquina adecuada, con objeto de separar las cápsulas con las semillas del tallo.
2. **Enriado:** El enriado consiste en el proceso fermentativo de descomposición de las materias pécticas y leñosas, a través del cual se consigue que una vez se han secado los tallos, la hilaza (fibra) quede separada entre sí. Este proceso transforma la materia aglutinante en pectina soluble y en ácido péctico que queda sobre la fibra. El enriado se puede llevar a cabo de forma natural o mediante procedimiento químico.
3. **Secado:** Completado el proceso de enriado, los tallos se secan completamente, deteniendo la acción de las sustancias generadas durante el propio enriado, que pueden dañar las fibras. Comúnmente se

lleva a cabo al aire libre o empleando sistemas de secado controlados en fábrica. El correcto secado de los tallos es crucial para preservar las propiedades mecánicas de la fibra.

4. **Triturado (Agramado):** Operación por medio de la cual se separa la fibra de la parte leñosa. Después del enriado y secado, la parte leñosa se ha convertido en una sustancia poco flexible y quebradiza, facilitando la separación de la fibra mediante desmenuzamiento. Se lleva a cabo utilizando máquinas apropiadas, que someten a los tallos a magullamientos o agramado para separar la materia leñosa triturada (cañamiza) que queda suelta, obteniendo únicamente la hilaza (fibra).
5. **Espadillado:** Proceso que consiste en golpear o frotar los manojos de lino ya triturado, con objeto de separar la cañamiza retenida entre la hilaza, y consiguiendo a su vez el ablandamiento de la última. De esta operación se obtiene la fibra en bruto, la cual se somete a un proceso de peinado para alinear y separar las fibras de mayor calidad de aquellas dañadas.
6. **Hilado:** Finalmente, una vez las fibras de mayor calidad han sido seleccionadas y alineadas, pueden ser hiladas de cara a su utilización en la industria textil, o bien, procesadas en forma de capas o filamentos para ser integradas en composites.

Propiedades

La fibra de lino es un material sostenible, con un conjunto de características que lo convierten en un material de alto valor en la industria moderna. Sus principales propiedades son [34], [35]:

- La densidad media de la fibra de lino es de $1,5 \text{ g/cm}^3$, siendo más ligera que otras fibras sintéticas, como por ejemplo la fibra de vidrio.
- Su resistencia a la tracción varía típicamente entre 500 y 900MPa, y presenta un módulo de elasticidad entre 60 y 80 GPa. Aunque su resistencia mecánica está algo limitada frente a otras fibras sintéticas, la resistencia de la fibra de lino alcanza valores competitivos.
- El lino destaca por su gran higroscopicidad, teniendo una tasa de humedad del 12 %, es decir, cada 100 partes del lino absolutamente seco pueden admitir 12 partes de agua.
- Una fibra presenta una longitud comprendida entre 10-40 mm, pudiendo llegar incluso a 60 mm, y con un diámetro de 10 a 30 micras.
- La fibra de lino en crudo tiene un color que puede variar desde blanco, hasta gris oscuro. Es posible someterla a un blanqueado, a través del cual obtiene un brillo atractivo característico.
- La estructura compacta del lino (sin celdas de aire), hace que este material sea buen conductor de calor.

- El lino tiene mayor resistencia que el algodón, pero es menos flexible y plástico que este. Esta rigidez, sumada a la superficie lisa y brillante que posee, así como su estructura compacta, aportan el tacto fresco y resbaladizo característico de la fibra.
- La fibra de lino es un material no tóxico, completamente biodegradable, y compatible con resinas y adhesivos.

Aplicaciones

Hoy en día, toda la industria se encuentra volcada hacia una producción más sostenible que reduzca la huella de carbono del producto final. Por ello, materiales naturales y biodegradables como la fibra de lino adquieren un atractivo especial. Las principales aplicaciones de esta fibra son las siguientes:

- El **sector** más extendido de la fibra de lino es el **textil**. El lino es un material de alto valor en la producción de textiles debido a su resistencia, transpirabilidad y comodidad.
- Recientemente está ganado popularidad en la fabricación de **biocomposites**, para el sector automotriz, aeroespacial, naval, etc. La fibra de lino se emplea en la fabricación de materiales compuestos en sustitución de otras fibras sintéticas menos sostenibles.
- Empleado a su vez en el **sector de la construcción y arquitectónico**, sobre todo como material de aislamiento térmico y acústico.
- Su carácter biodegradable y no tóxico, hacen que la fibra de lino sea un material ideal en la **producción de bioplásticos**, destinados a envases ecológicos y packaging.
- Aunque no supera al algodón, también está presente en la **industria del papel**, empleada en la fabricación de papeles de alta calidad, billetes, certificados, papel de fumar, lienzos, etc.



Ilustración 25. Aplicaciones de la fibra de lino en la actualidad.

5.2.7. Resinas Epoxi

Las resinas epoxi destacan entre los polímeros termoestables más relevantes en la industria, donde se aplican como adhesivos, recubrimientos y matrices en materiales compuestos debido a su notable resistencia química, alta estabilidad térmica y dimensional, así como su elevada resistencia mecánica [36]. Estas propiedades, junto con su versatilidad en los procesos de manufactura, han impulsado su uso en multitud de sectores.



Ilustración 26. Recubrimiento con resina epoxi.

Los sistemas epoxi se caracterizan por la presencia de grupos epóxidos reactivos en sus extremos, los cuales forman una estructura altamente reticulada mediante enlaces covalentes tras el curado con un agente endurecedor [36]. El proceso de curado de la resina epoxi comienza con el crecimiento y ramificación de las cadenas moleculares. A medida que progresa la reacción, el peso molecular se incrementa y se produce un aumento de la viscosidad, fenómeno conocido como gelificación del sistema. La gelificación marca el inicio de la formación de una red reticulada y es una de las características más distintivas de los polímeros termoestables. Sin embargo, la gelificación no impide que continúe la reacción de curado, la cual progresa hasta completar la red tridimensional y proporciona las propiedades definitivas al material.

Un agente de curado o endurecedor es una sustancia añadida a un material macromolecular en cantidades superiores a las catalíticas, la cual reacciona químicamente con dicho material para transformarlo en un polímero termoestable e irreversible, dotado de propiedades que no presentan los componentes iniciales por separado. Las resinas epoxi son uno de los principales materiales que emplean endurecedores para alcanzar sus características finales.

Estructura química

La estructura básica de las resinas epoxi se centra en el grupo epóxido o "grupo oxirano", un anillo triangular que contiene un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono, también llamada grupo epoxi (C-O-C).

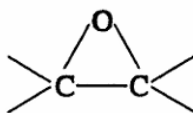


Figura 15. Grupo Epoxi u oxirano [37].

Las resinas epoxi se generan a partir de la reacción entre una base epoxi, que contiene grupos funcionales oxirano, y un agente endurecedor. Una vez mezclados, se inicia el proceso de polimerización, el cual puede acelerarse mediante la adición de ciertas sustancias específicas. Además, es posible incorporar otros componentes, como plastificantes, diluyentes (reactivos o inertes), solventes y cargas minerales, que pueden integrarse tanto en la base epoxi como en el endurecedor, o bien añadirse en el momento en que ambos se combinan.

Tipos de base Epoxi

Las bases epoxi están compuestas por moléculas que contienen dos o más grupos oxirano. El método principal para su síntesis implica la reacción de un compuesto que posee un hidrógeno activo con la epiclorhidrina, seguida de un proceso de deshidrohalogenación [37]:

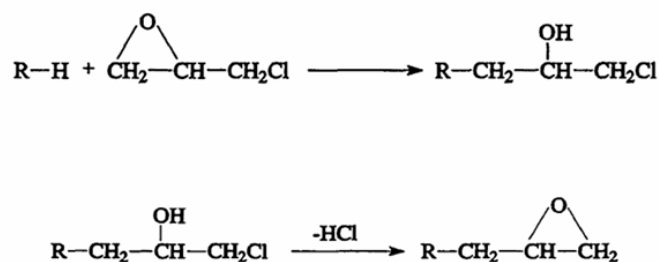


Figura 16. Reacción entre compuesto con hidrógeno activo y la epiclorhidrina, y la posterior deshidrohalogenación.

También es posible preparar una base mediante la reacción de olefinas con peroxiácidos orgánicos:

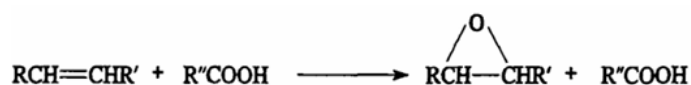


Figura 17. Reacción de olefinas con peroxiácidos orgánicos [37].

Existen diferentes tipos de resinas epoxi en función de la base epoxi que emplean, siendo los principales los siguientes:

1. **Resinas epoxi a base de bisfenol A (DGEBA):** La DGEBA (diglicidil éter de bisfenol A), es la sustancia mayoritariamente empleada para la obtención de resinas epoxi, debido a su versatilidad y costo accesible. Estas resinas se obtienen mediante la reacción entre el 2,2-bis-(4-hidroxifenil) propano, también conocido como bisfenol A, con la epiclorhidrina, y su estado final, ya sea líquido, semisólido o sólido, depende de su peso molecular.

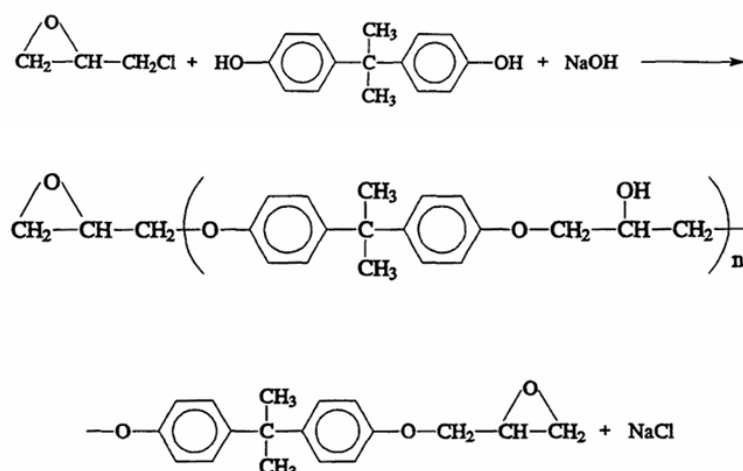


Figura 18. Resinas epoxi a base de bisfenol A (DGEBA) [37].

2. **Resinas epoxi a base de bisfenol F:** El bisfenol F se obtiene de la reacción entre fenol y formaldehído, encontrándose en exceso el primero. El producto resultante es una mezcla de isómeros, la cual, si se hace reaccionar con un exceso de epiclorhidrina, en presencia de hidróxido sódico se obtiene la base epoxi de bisfenol F. Su viscosidad es menor que la conseguida a partir de bisfenol A, pero tiene una funcionalidad mayor, al tener más grupos epoxi por molécula. Por ende, las resinas epoxi a partir de bisfenol F presentan mayor densidad de reticulación que las formadas de bisfenol A.

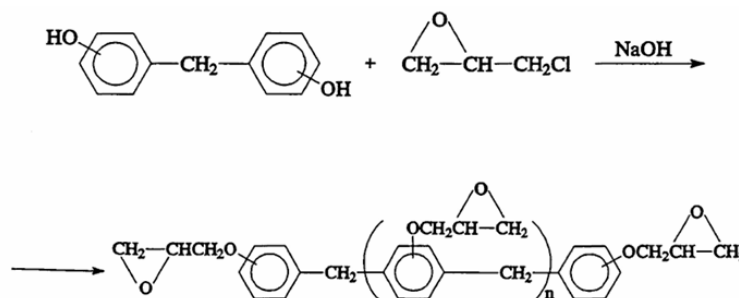


Figura 19. Resinas epoxi a base de bisfenol F [37].

3. **Resinas epoxi novolacas:** Las bases epoxi de tipo novolaca se dividen en dos categorías: las de fenol y las de cresol. Las resinas de fenol se producen mediante la reacción del fenol ($R=H$) con formaldehído, mientras que las de cresol se sintetizan a partir de la reacción de o-cresol ($R=CH_3$) con formaldehído. Esta reacción es catalizada por un ácido, generando una resina fenólica que luego reacciona con epiclorhidrina para formar la base epoxi. Las bases epoxi novolacas de fenol son parejas a las de bisfenol F, presentan una densidad de reticulación alto en las resinas obtenidas.

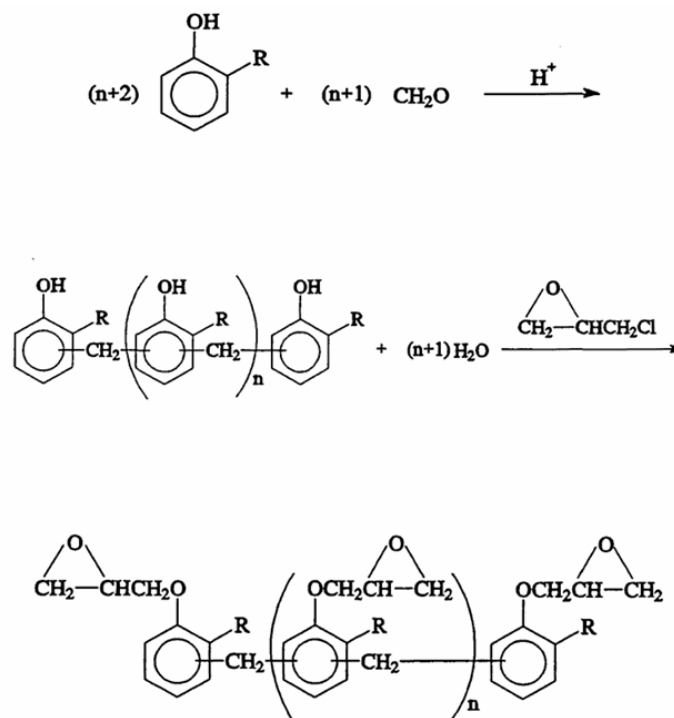


Figura 20. Resinas epoxi novolacas [37].

4. **Bases epoxi a partir de compuestos nitrogenados:** Se producen mediante la reacción de epoclorhidrina con compuestos nitrogenados, tales como el p-aminofenol, la metilendianilina y el ácido cianúrico. La resina derivada de la metilendiamina es tetrafuncional y se emplea como matriz en materiales compuestos, teniendo la siguiente estructura:

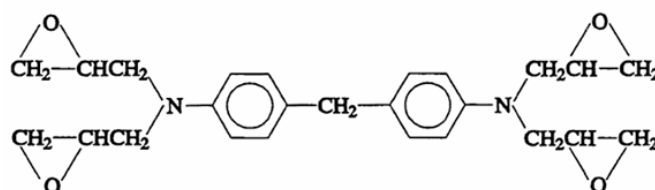


Figura 21. Bases epoxi a partir de compuestos nitrogenados [37].

5. **Bases epoxi cicloalifáticas:** Sus resinas se emplean en sistemas de encapsulación electrónica y como aislantes eléctricos. Una de las más relevantes es el 3,4-epoxiciclohexanocarboxilato de (3,4-epoxiciclohexil) metilo.

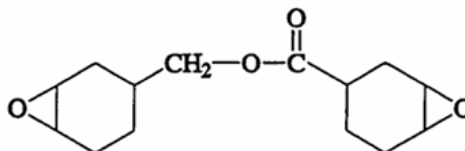


Figura 22. Bases epoxi cicloalifáticas [37].

Endurecedores

Los agentes endurecedores se dividen en dos categorías: catalíticos y polifuncionales. Los agentes catalíticos actúan como iniciadores de la homopolimerización de las resinas, mientras que los agentes polifuncionales participan como reactivos o monómeros, promoviendo el entrecruzamiento de las moléculas de resina mediante su propia estructura.

Los agentes polifuncionales presentan una estructura química diversa y se caracterizan por la presencia de grupos hidrocarburos activos, entre los más utilizados se encuentran las aminas alifáticas primarias y secundarias, poliaminas primarias y secundarias, ácidos polibásicos y anhídridos.

Los agentes endurecedores más comunes se pueden clasificar atendiendo a [37]:

1. **Endurecedores amínicos:** Los endurecedores basados en aminas primarias y secundarias son los más empleados en la industria para el curado de resinas epoxi. Entre ellos, se destacan las **poliaminas alifáticas**, como la dietilentetramina y la trietilentetramina. Debido a su toxicidad relativa y a la rapidez de su reacción con la base epoxi, estos endurecedores suelen utilizarse en forma de aductos, los cuales se obtienen al reaccionar un exceso de amina con la base epoxi, mitigando así los problemas de toxicidad y velocidad de reacción.

También se emplean las **poliaminas aromáticas**, las cuales tienen el inconveniente de ser poco solubles en las bases epoxi, además de su alto grado de toxicidad, sin embargo, se utilizan aductos de estas aminas para mitigar estos problemas.

Las **poliamidas** son el producto de la reacción entre una poliamida y un dímero o trímero de ácido graso, y son ampliamente utilizadas como endurecedores. Su comportamiento es similar a las poliaminas

alifáticas, y su reacción resulta en polímeros de alto peso molecular que varían de líquido viscoso a sólido.

2. **Anhídridos:** Es posible el empleo de anhídridos como endurecedores para obtener resinas epoxi. Normalmente reaccionan en presencia de un catalizador, como el tris(dimetilaminometil)fenol, para favorecer la reacción con la base epoxi. Entre los más utilizados, cabe destacar el anhídrido ftálico, el anhídrido tetrahidroftálico, el anhídrido metiltetrahidroftálico, el anhídrido hexahidro ftálico (d) y el anhídrido metil nádic.
3. **Polifenoles:** La utilización de este tipo de endurecedores requiere de la adición de un acelerante, debido a que la reacción entre los grupos epoxi y fenol es lenta.
4. **Endurecedores catalíticos:** Estos endurecedores se emplean en las reacciones de homopolimerización de las bases epoxi, generando un polímero curado con una estructura similar a la de los poliésteres. Entre estos agentes se incluyen las aminas terciarias y el trifluoruro de boro (en forma de complejo, como BF_3 -éter o BF_3 -amina). Estas sustancias también actúan como catalizadores en las reacciones entre bases epoxi y endurecedores de tipo amínico o anhídrido.

Aditivos

Los aditivos se incorporan a la resina epoxi con el objetivo de modificar algunas de sus propiedades. Por ejemplo, los diluyentes de bajo peso molecular se añaden para reducir la viscosidad inicial, facilitando así su manipulación y aplicabilidad. Sin embargo, su inclusión puede reducir la resistencia química y mecánica de la resina curada. Los diluyentes pueden clasificarse en reactivos (contienen uno o dos grupos epoxi y se integran en la red polimérica) o no reactivos (pueden o no evaporarse durante el curado).

También es posible añadir otros aditivos, como pigmentos (para lograr el color deseado y, en algunos casos, prevenir la corrosión), cargas (que reducen costos y mejoran propiedades como la resistencia a la abrasión, compresión y tracción), y modificadores elastoméricos (que incrementan la resistencia a la fractura).

Propiedades

Las resinas epoxi son materiales versátiles ampliamente utilizados en diversas industrias debido a su combinación de excelentes propiedades físicas y químicas. A continuación, se detallan sus principales características [38]:

- Alta resistencia mecánica. Las resinas epoxi ofrecen gran resistencia a la tracción, compresión y flexión, siendo idóneas para su aplicación en refuerzos estructurales.
- Excelentes propiedades dieléctricas, además de alta resistencia térmica, convirtiéndose en un material utilizado en aislamiento.
- Tienen alta capacidad de adhesión a una amplia gama de superficies.
- Presenta baja contracción al curado. Durante el proceso de curado, las resinas epoxis experimentan una leve contracción, aportando una estabilidad dimensional óptima además de evitar el agrietamiento.
- Las resinas epoxi poseen buena resistencia a la fatiga, soportando ciclos de carga y descarga repetitivos. También es posible ajustar su polimerización para obtener buena flexibilidad y tenacidad., siendo ideal para aplicaciones que requieran de buena absorción de impactos o resistencia a vibraciones.
- Excelente resistencia a agentes químicos corrosivos, pudiendo ser empleada en ambientes agresivos.
- La absorción de agua es baja, lo que mantiene la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas en ambientes húmedos.
- Fácil de aplicar y limpiar, gracias a su flexibilidad, humectación y adherencia a los recubrimientos.

Aplicaciones

La amplia versatilidad de sus propiedades hace que las resinas epoxi estén muy presentes en multitud de aplicaciones, tanto industriales como en otros sectores, siendo los principales los mencionados a continuación:

- Ampliamente utilizado en la **industria de adhesivos y recubrimientos**, dadas sus buenas propiedades mecánicas y excelente capacidad de adhesión. Se emplea en el revestimiento de garajes, suelos industriales, almacenes, plantas de procesado, etc. Así como adhesivos estructurales y recubrimientos anticorrosivos en la industria automotriz y aeroespacial.
- Muy presentes en la **industria eléctrica y electrónica**, debido a sus propiedades de aislamiento eléctrico y baja contracción. Las resinas epoxi se utilizan en encapsulación, recubrimiento de circuitos impresos y componentes electrónicos, brindando protección contra la humedad, cortocircuitos, vibraciones, etc.
- Su resistencia a los ambientes agresivos hace que las resinas epoxi estén presentes en el **sector náutico**, como recubrimiento de protección de embarcaciones, adhesivos y materiales compuestos que requieran de resistencia a ambientes salinos y condiciones extremas.

- También se emplea en el **sector eólico**, como matrices de materiales compuestos en la fabricación de palas de aerogeneradores, aportando una elevada resistencia estructural y ligereza.
- Cada vez más utilizado en **aplicaciones artísticas y decorativas**. Propiedades como la transparencia, la dureza, el brillo superficial y capacidad de personalización, convierten a las resinas epoxi en un material muy popular en el sector artístico y de diseño.

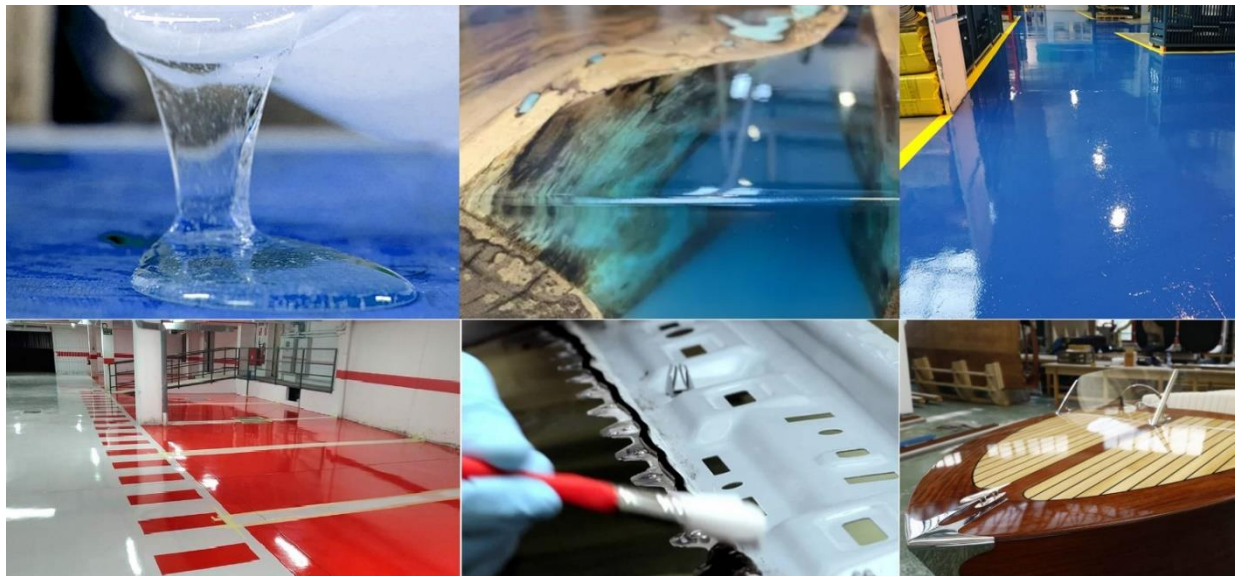


Ilustración 27. Aplicaciones de las resinas epoxi en la actualidad.

6. FASE DE DISEÑO

6.1. PALA DE PÁDEL

En el presente apartado se detallará el diseño propuesto para la pala de pádel, así como las diferentes tecnologías que integra, y los materiales finalmente empleados en su fabricación, todo ello con su correspondiente justificación.

Antes de comenzar con el análisis en profundidad, se acoplan a continuación las vistas de alzado, perfil izquierdo e isométrica de la pala, para hacerse una idea general del diseño propuesto:

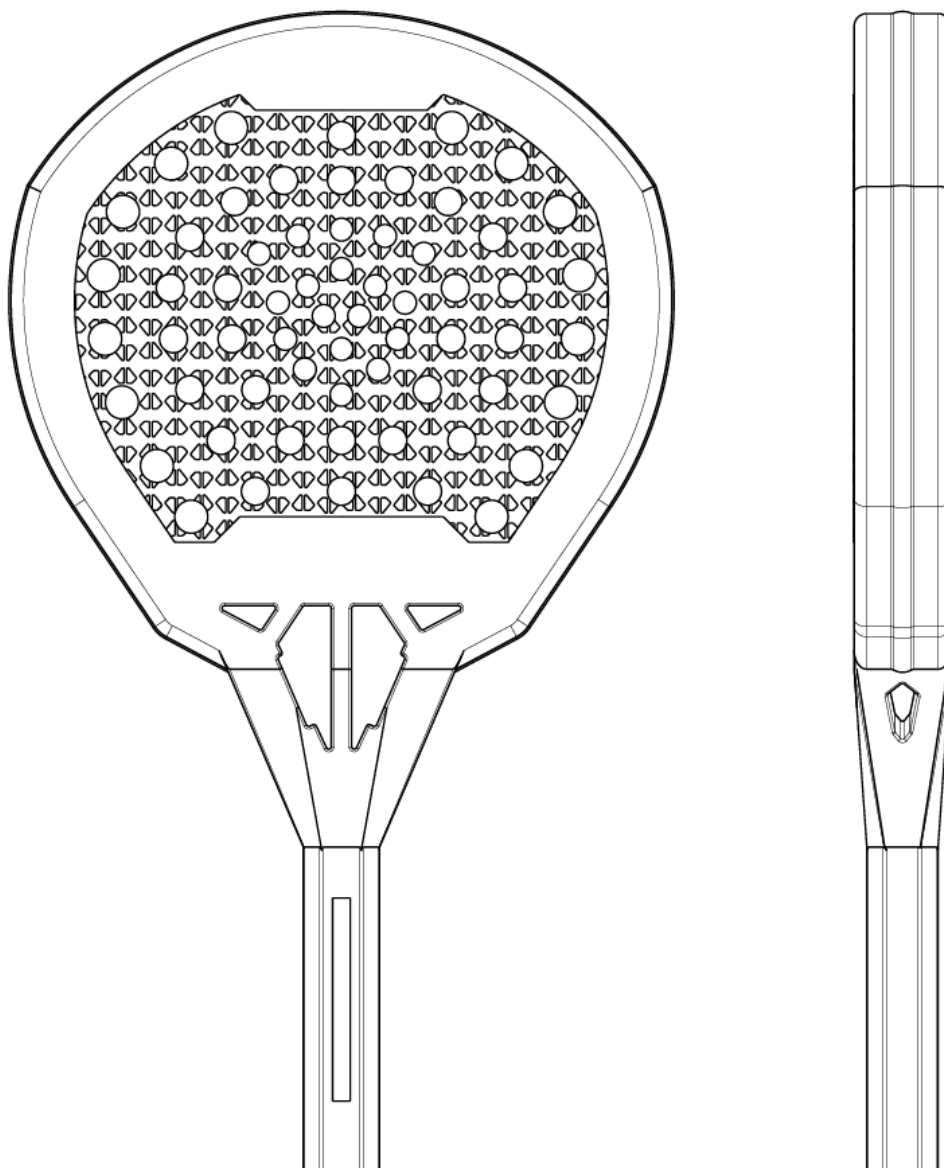


Ilustración 28. Alzado y Perfil del diseño propuesto para la pala de pádel.

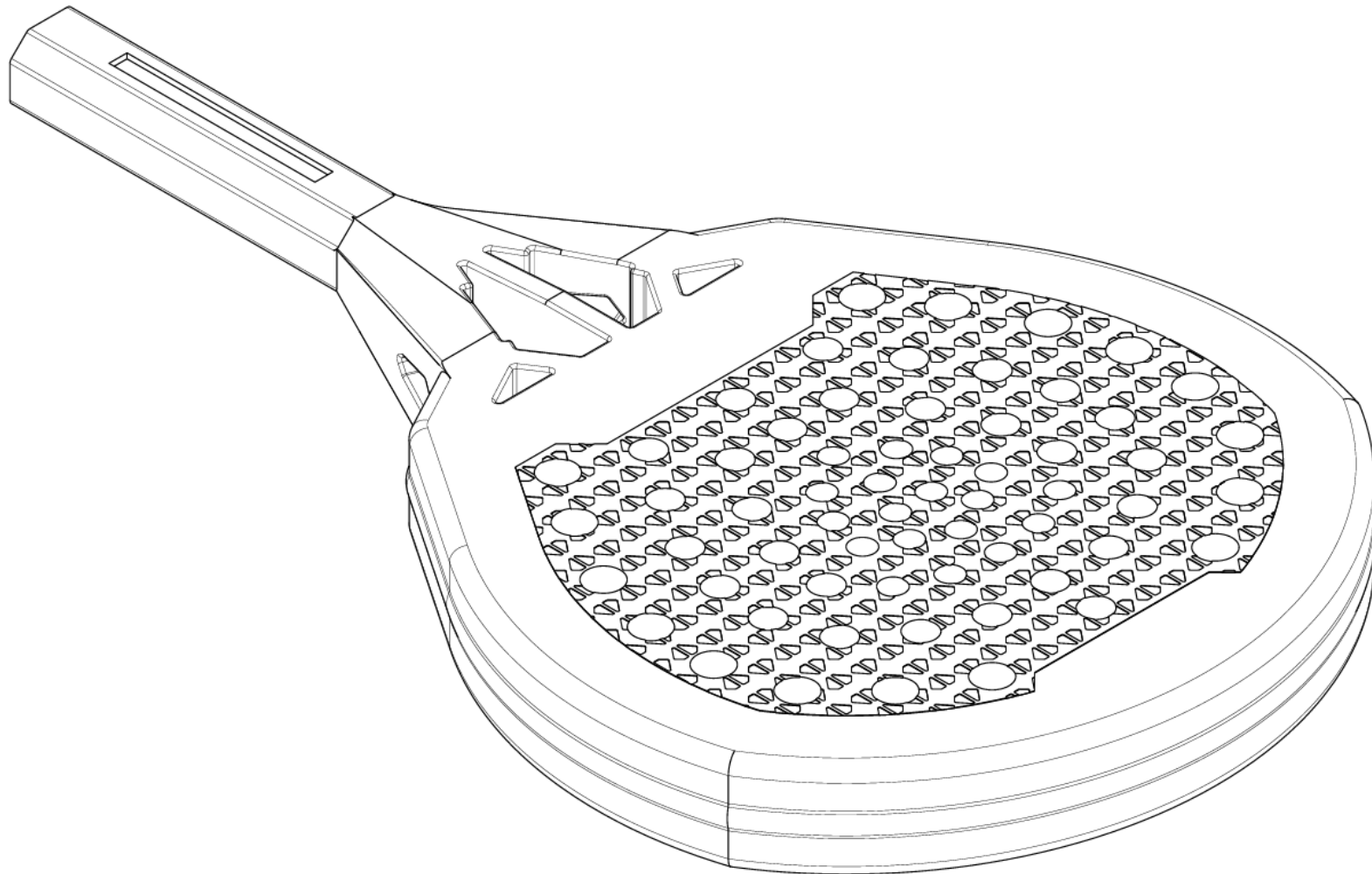


Ilustración 29. Vista Isométrica del diseño propuesto para la pala de pádel.



6.1.1. Geometría

Cabeza

A raíz del estudio de mercado realizado y de las conclusiones obtenidas, se opta por una forma HÍBRIDA para la cabeza de la pala, con una distribución del peso algo por encima del centro, que aporte buena combinación de potencia y control.

La geometría elegida pretende conseguir una pala de gran polivalencia, que responda lo más adecuadamente en cualquier situación de la pista. A nivel profesional, se ha podido observar la elevada presencia de palas con formato híbrido o lágrima, siendo estas elegidas por multitud de jugadores tanto en competiciones masculinas como femeninas, dado su excelente rendimiento en pista.

Además, este formato híbrido es más accesible para jugadores no profesionales, a diferencia de una pala con formato diamante enfocada en potencia pura y con punto dulce más reducido, por lo que se trata de una forma atractiva para jugadores de todo tipo de niveles.

En definitiva, aunque se trata de una pala de alta gama principalmente enfocada en su aplicación a nivel profesional, el formato híbrido aporta un mayor alcance en el mercado al ser una forma que busca en equilibrio, siendo compatible con un mayor número de jugadores.

Puente

Para la disposición del puente se ha optado por un corazón simétrico en forma de diamante, con una abertura triangular en cada extremo superior. A su vez, el corazón presenta un total de tres refuerzos transversales, con objeto de aumentar la solidez de la pala y mitigar el esfuerzo de torsión que soporta durante el impacto de la pelota, para aportar una mayor seguridad en el golpe.

Empuñadura

Para la empuñadura, de nuevo, atendiendo a las tendencias del mercado, se opta por un mango de mayor longitud que uno convencional, consiguiendo la flexibilidad de poder usar la pala a dos manos, valorada por muchos jugadores.

6.1.2. Dimensiones

El objetivo de diseño ha sido la obtención de una pala de pádel destinada al ámbito profesional, de forma que las dimensiones deberán cumplir con las especificaciones reglamentarias impuestas por la FIP mencionadas en el apartado 3.1.

La pala de pádel se ha diseñado atendiendo a estas dimensiones reglamentarias, siendo una pala que cumple con los requisitos dimensionales para poder ser aplicada en el ámbito competitivo. Las dimensiones elegidas se muestran a continuación:

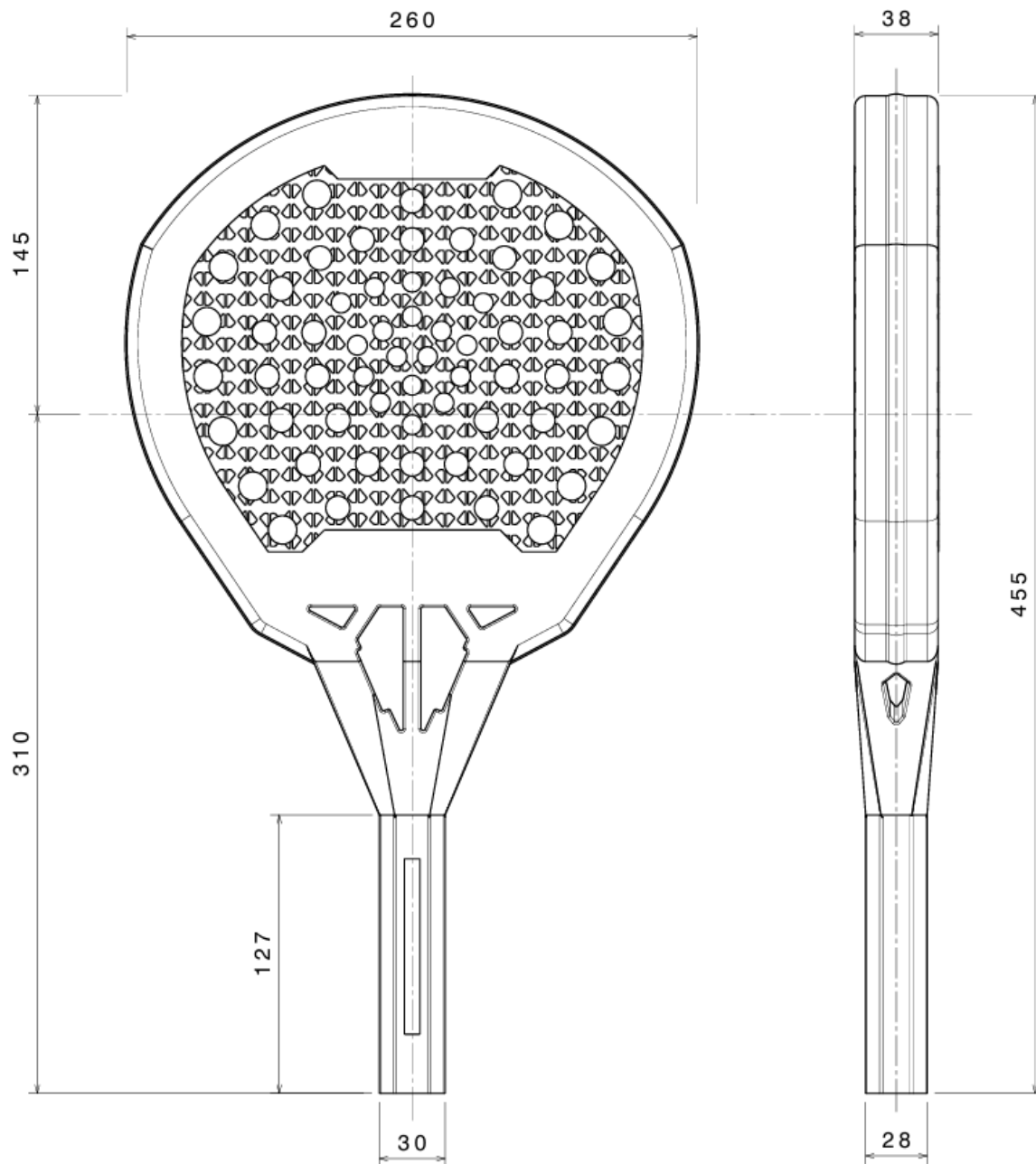


Ilustración 30. Dimensiones generales de la pala diseñada.

6.1.3. Materiales

En función del estudio detallado de los materiales con mayor presencia en la fabricación de palas de pádel, analizando cuidadosamente las distintas propiedades que pueden aportar, teniendo en cuenta en todo momento el equilibrio entre aportar el máximo rendimiento y reducir en la medida de lo posible la huella de carbono del producto final, se consideran los siguientes materiales para la producción de la pala.

Núcleo

En consonancia con la geometría curva seleccionada, se deberá elegir un material para el núcleo conforme con el comportamiento equilibrado que se pretende aportar en pista.

Para ello, el núcleo estará compuesto de Goma EVA (Etil Vinil Acetato) de dos densidades. La disposición de las capas de Goma EVA del núcleo será en forma de sándwich, una capa de Goma EVA de densidad elevada (mayor dureza) rodeada de dos capas de Goma EVA de menor densidad (menor dureza).

A través de esta configuración se consigue que, a bajas velocidades de la pelota, las capas de menor densidad entren en acción, facilitando la salida de bola con movimientos suaves de la pala. Por otro lado, cuando el jugador desee aportar potencia en su remate, es decir, cuando se quiera aumentar la velocidad de juego, pasará a la acción la capa de mayor densidad, permitiendo transmitir mayor potencia a la pelota durante el golpe.

Perfil

Como bien se ha observado del estudio de mercado, así como del estudio de los materiales, la fibra de carbono es el material estrella en la producción de cualquier pala destinada a rendir a máximo nivel, por este motivo, se elige este material para formar parte del perfil de la pala diseñada.

Para complementar a la fibra de carbono, se elige la fibra de basalto, ya que esta dispone de propiedades similares a la fibra de vidrio, presentando un proceso de obtención con menor huella de carbono.

De forma que la configuración del laminado del perfil de la pala tendrá dos capas exteriores de fibra de carbono, y tres capas interiores de fibra de basalto, todas ellas correspondientemente reforzadas con resinas epoxi.

La combinación de la fibra de basalto con la fibra de carbono reducirá la rigidez de la pala, manteniendo la excelente resistencia superficial y rendimiento frente a impactos con elementos que puedan dañar la superficie de golpeo, aportada por la fibra de carbono.

Marco

El objetivo principal de un buen marco es proteger el contorno de la pala, frente a posibles golpes con inmediaciones externas (cerramientos, red, suelo, otras palas, etc) durante el juego, evitando fisuras que afecten sobre el rendimiento global de la pala.

De forma que, para el conformado del marco, se opta por el empleo de dos mallas tubulares de carbono 3K (3000 filamentos). Un tubular trenzado con este material presenta grandes cualidades mecánicas, ofreciendo una durabilidad excepcional a la pala.

Cabeza

Por último, se recoge en una tabla la configuración de laminado que presentará la cabeza de la pala.

Nº CAPA	MATERIAL	Grosor (mm)
1	Tejido de Fibra de Carbono 12K	0,3
2	Tejido de Fibra de Carbono 12K	0,3
3	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
4	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
5	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
6	Goma EVA Baja Densidad (20 kg/m ³)	10
7	Goma EVA Alta Densidad (45 kg/m ³)	15
8	Goma EVA Baja Densidad (20 kg/m ³)	10
9	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
10	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
11	Tejido de Fibra de Basalto	0,3
12	Tejido de Fibra de Carbono 12K	0,3
13	Tejido de Fibra de Carbono 12K	0,3

Tabla 7. Materiales que conforman el laminado de la cabeza de la pala y su espesor.

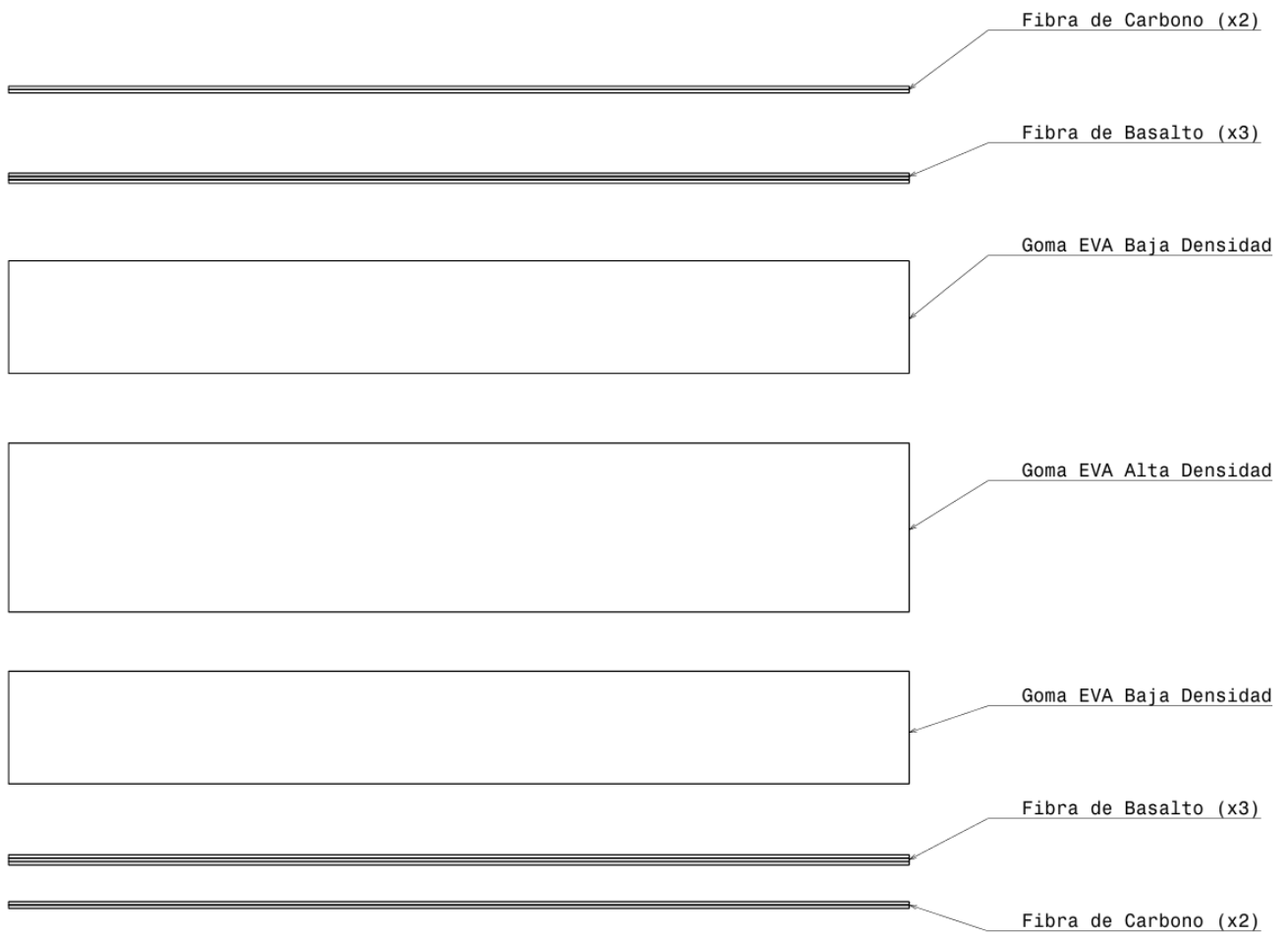


Ilustración 31. Disposición del laminado de la cabeza de la pala.

6.1.4. Tecnologías

En este apartado, se desarrollan las tecnologías presentes en la pala, detallando su función concreta en la misma, y el motivo de su existencia, así como su disposición en la pala.

También se propone un nombre y un logo para cada una, convirtiendo estas en atributos llamativos que puedan atraer la atención del consumidor.

Tecnología:	AEROSWEEP CONTOUR
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>El perímetro de la cabeza de la pala está compuesto por una estructura de marco redondeada, que reduce la resistencia opuesta por el aire durante el movimiento de la pala.</p> <p>Además, también presenta un perfil circular alrededor de todo el contorno, que favorece la aerodinámica del movimiento, aportando mayor fluidez en el paso del aire, contribuyendo de nuevo a la reducción de la resistencia del aire.</p>	

Tabla 8. Tecnología 1: Aerosweep Contour.

Tecnología:	MULTIFLOW HOLES
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>El patrón de agujereado que presenta es multi-diámetro, es decir, posee agujeros de diferentes diámetros, concretamente de 13, 11 y 9 mm. Esta disposición de los orificios es clave para distribuir el peso de la pala y ajustar el punto dulce.</p> <p>El tamaño de los diámetros va disminuyendo conforme se acercan a la zona central de golpeo, esto es debido a que los agujeros del exterior son los que más contribuyen con la aerodinámica.</p> <p>También, el patrón de agujereado presenta una mayor densidad de agujereado de 9 mm de diámetro en la zona central de golpeo, con el objeto de reducir la rigidez del plano de golpeo en ese punto, y por ende conseguir un punto dulce más amplio.</p> <p>A su vez, la tecnología MULTIFLOW HOLES lleva el balance de la pala por encima del centro de la cabeza, permitiendo asestar golpes de mayor potencia.</p> <p>Esta tecnología tiene una sinergia perfecta con el formato híbrido de la pala.</p>	

Tabla 9. Tecnología 2: Multiflow Holes.

Tecnología:	POWERBRIDGE CORE
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>El corazón de la pala se dispone de manera simétrica, siguiendo una forma de diamante, con dos pequeñas aberturas con formato triangular en ambos extremos superiores. A su vez, el corazón presenta tres refuerzos transversales en forma de aleta, aportando firmeza en el comportamiento de la pala.</p> <p>Esta disposición para el corazón de la pala no solo contribuye con la aerodinámica de esta, al recircular el flujo de aire por 4 orificios, sino que reduce los esfuerzos de torsión soportados por la zona del puente gracias a la presencia de los refuerzos, aumentando la resistencia y durabilidad de la pala.</p>	

Tabla 10. Tecnología 3: Powerbridge Core.


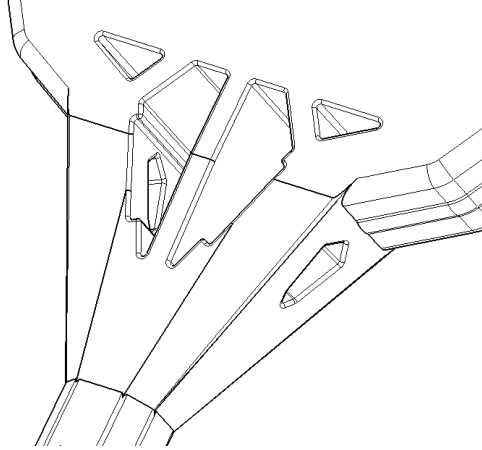
Tecnología:	VENTCORE DYNAMIC
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>La tecnología VENTCORE DYNAMIC incluye dos perforaciones en ambos laterales del puente de la pala, las cuales favorecen la circulación del aire a través de la misma, además de reducir su peso.</p> <p>Estas perforaciones mejoran la manejabilidad de la pala, permitiendo realizar movimientos con mayor agilidad durante el juego.</p>	

Tabla 11. Tecnología 4: Ventcore Dynamic.

Tecnología:	SHOCKGUARD HANDLE
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>La tecnología SHOCKGUARD HANDLE incorporada en la empuñadura de la pala presenta dos hendiduras rectangulares dispuestas de forma simétrica en las caras de un mango de geometría octogonal, con objeto de ser rellenas con una lámina de un material elastómero capaz de absorber parte de las vibraciones generadas durante el impacto de la pala con la pelota, y de esta forma reducir las vibraciones que se transmiten al brazo del jugador, evitando en mayor medida lesiones a raíz del uso la pala.</p>	

Tabla 12. Tecnología 5: Shockguard Handle.


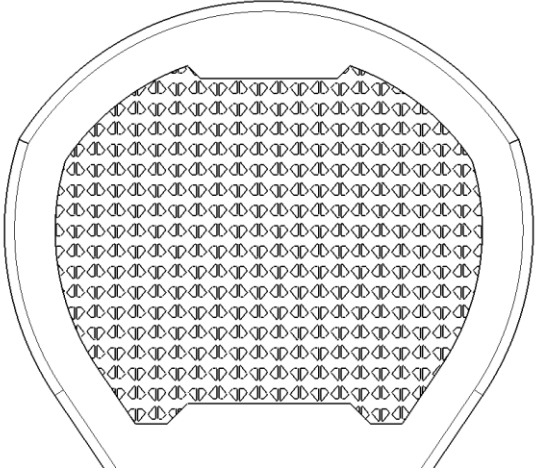
Tecnología:	SPINMAX SURFACE
Logo:	Ubicación en la pala:
	
Descripción:	
<p>La tecnología SPINMAX SURFACE incluye un patrón de rugoso 3D en el plano de golpeo de la pala, obtenido directamente del molde de fabricación.</p> <p>El patrón sigue un diseño con forma de diamantes invertidos abarcando toda la zona de golpeo, el cual permitirá aportar efecto a la pelota con cada impacto, consiguiendo una mayor sensación de control en el jugador.</p> <p>Se estima un espesor para este patrón de rugoso 3D entre 0,5 y 1 mm.</p>	

Tabla 13. Tecnología 6: Spinmax Surface.



6.2. MOLDE DE FABRICACIÓN

La fabricación de una pala de pádel se trata de un proceso complejo, en su mayoría artesanal, que involucra diferentes etapas técnicas. Es crucial realizar parte de la fabricación de forma manual, para de esta manera cuidar del proceso, y aunque prolongue la duración de este, un procedimiento artesanal garantiza palas de pádel de buena calidad, robustas, estables y resistentes. La automatización de este tipo de procesos puede comprometer la calidad final de la pala y por ende su rendimiento en pista.

Uno de los principales objetivos del presente trabajo de fin de grado es el diseño de un molde para la fabricación concreta de la pala diseñada, atendiendo a la sostenibilidad del proceso y la viabilidad del mismo.

En este apartado se detallará el diseño propuesto para el molde de fabricación la pala, así como el material elegido para su elaboración y las tecnologías que integra, de cara a conseguir un molde con especificaciones de durabilidad y sostenibilidad lo más elevadas posibles.

6.2.1 Geometría

Se propone una geometría predominantemente rectangular con chaflanes en las esquinas y laterales, contribuyendo estos tanto con la estética como con la funcionalidad estructural del molde. Estos entrantes achaflanados hacia el interior proporcionan una mayor rigidez y resistencia mecánica al molde, además de reducir la cantidad de material que lo compone, abaratando su fabricación. A su vez, mejora su manipulación durante el proceso de montaje, ya que, además de disminuir el peso, estas hendiduras hacia el interior aportan una superficie de agarre de mayor comodidad para la separación de las placas del conjunto.

A continuación, se muestran imágenes generales del alzado, perfil y vista isométrica de la placa inferior, para comprender la geometría seleccionada para el molde.

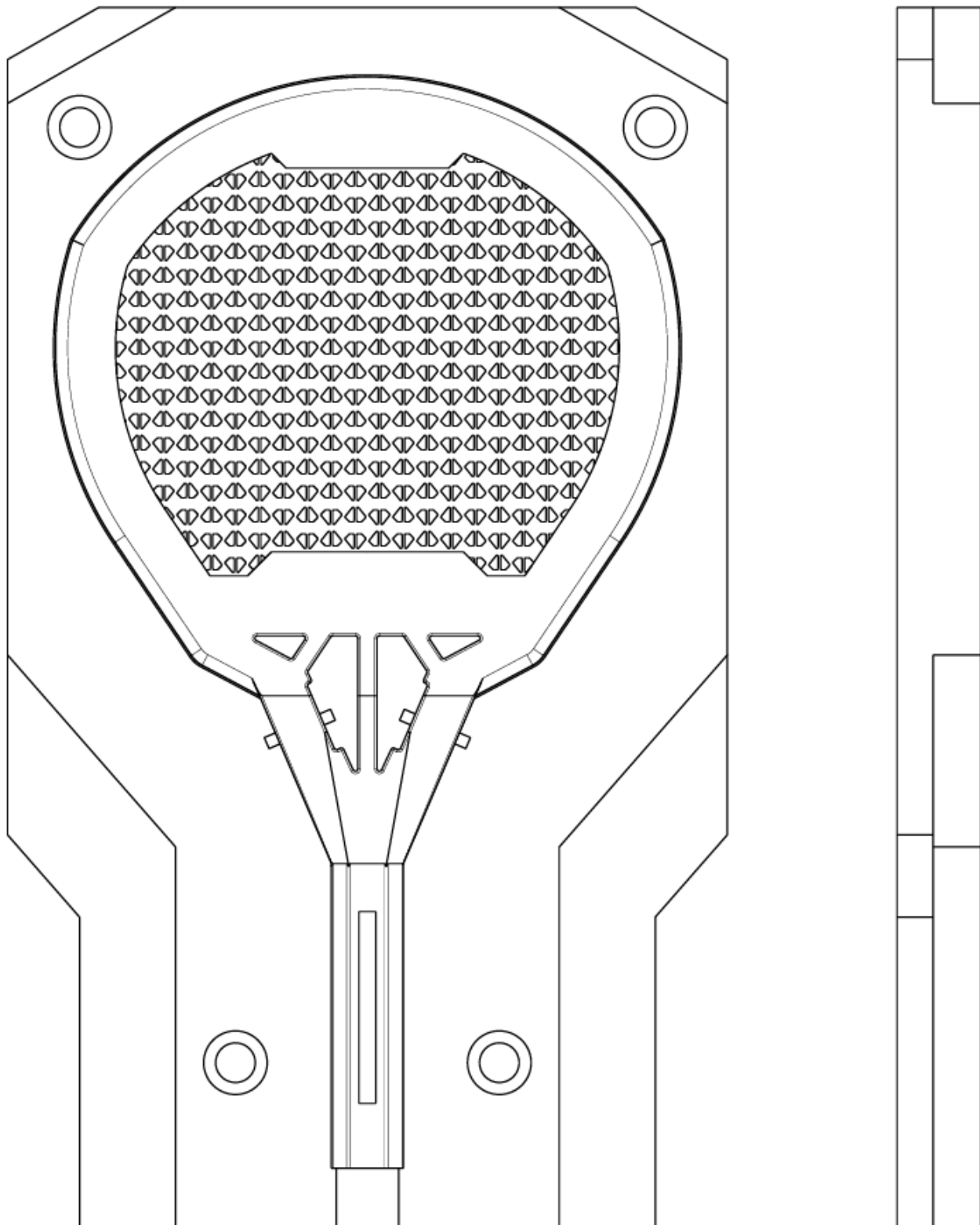


Ilustración 32. Alzado y perfil derecho del diseño propuesto para la placa inferior del molde.

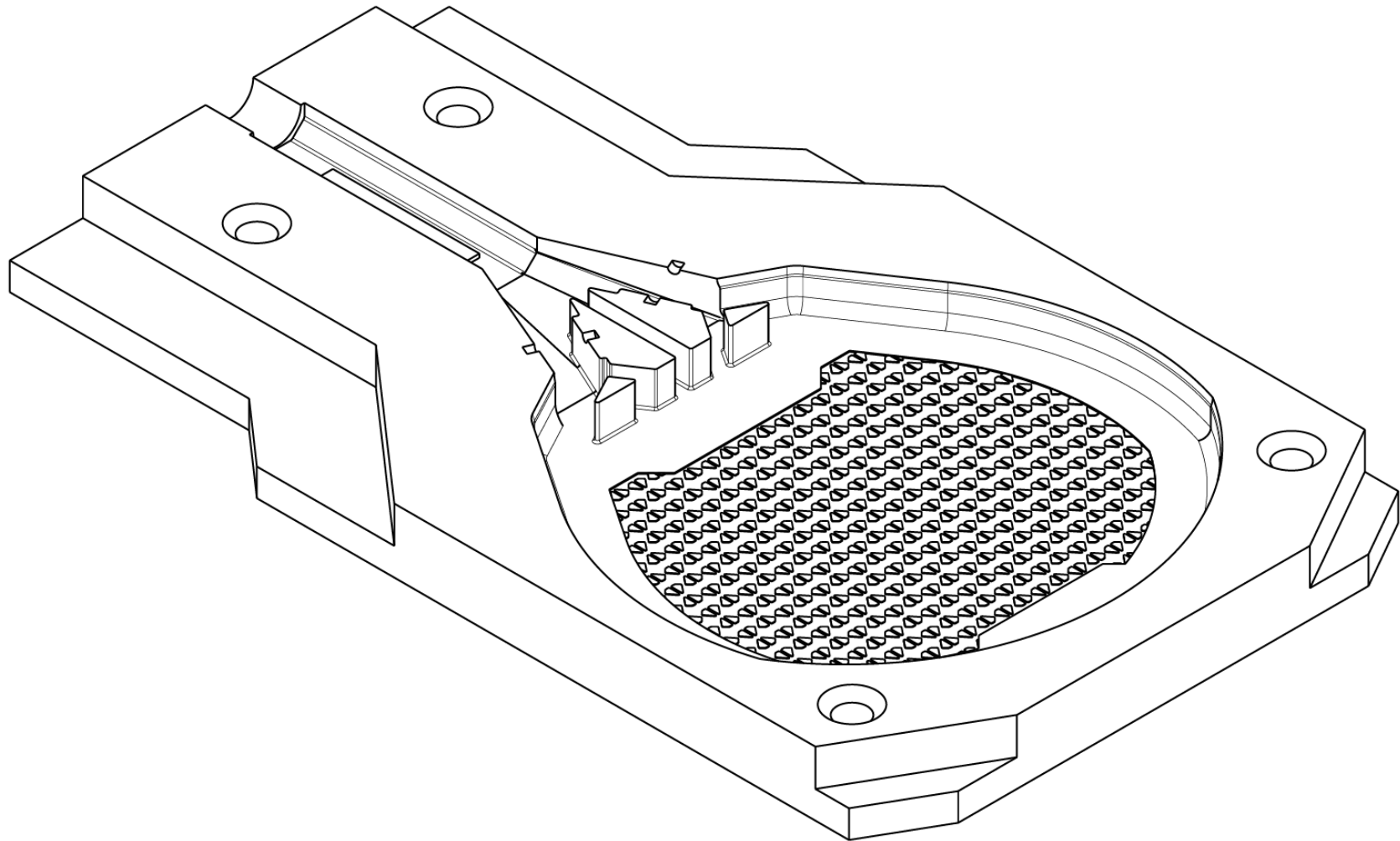


Ilustración 33. Vista isométrica del diseño propuesto para la placa inferior del molde.

6.2.2. Material

Comunmente, los moldes utilizados en la producción de palas de pádel están fabricados a partir de acero o aluminio, dependiendo del proceso de fabricación, la escala de producción y los materiales de la pala.

El molde de cualquier producto tiene como objetivo la producción en cadena del mismo, obteniendo la mayor rentabilidad posible de este. La inversión inicial para la fabricación de un molde es elevada, sin embargo, se estima la recuperación con creces de este capital invertido a largo plazo.

Por ello, el material elegido para la fabricación del molde, deberá ser capaz de proporcionar condiciones de durabilidad óptimas, además de tratar de reducir la huella de carbono del producto en todo lo posible.

De forma que, con ánimo de conseguir un proceso de fabricación sostenible, se optará por un molde compuesto por una aleación de aluminio reciclado.

La clasificación europea de las aleaciones de aluminio según la Norma UNE-EN-573-1 [39] divide a estas aleaciones en nueve clases, estando cada tipo identificado por un código de cuatro dígitos. El primer dígito del código diferencia la clase a la que pertenece el aluminio, como se muestra a continuación:

Clasificación de las aleaciones de aluminio	
Elemento (s) de la aleación	Código
Ningún elemento en la aleación (99% o superior de aluminio)	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio + Silicio	6XXX
Zinc + Magnesio	7XXX
Litio	8XXX
Otras aleaciones	9XXX

Tabla 14. Clasificación de las aleaciones de aluminio. UNE-EN 573-1 2005[39].

De las aleaciones mencionadas en la tabla anterior, las más utilizadas en la fabricación de moldes son las d código 2XXX, 6XXX y 7XXX.

En nuestro caso particular, se opta por el empleo de la **aleación de aluminio 7075** para la fabricación del molde, por diferentes motivos detallados a continuación:

- Se trata de una aleación con elevada resistencia mecánica, aportando al molde una durabilidad más que suficiente para soportar la producción en cadena de palas de pádel.
- Presenta un peso más ligero que el acero, facilitando la manipulación del molde, además de reducir la energía empleada para su transporte.
- Tiene una conductividad térmica óptima para aguantar el proceso de curado dentro del horno.
- Su huella de carbono es menor en comparación con materiales como el acero, especialmente si el aluminio es reciclado.
- A mayores, esta aleación permite ser reforzada con recubrimientos para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas.

6.2.3. Elemento de acople para aberturas laterales

Una de las tecnologías que presenta el diseño propuesto para la pala, son las aberturas laterales o “flaps” ubicadas en los laterales del corazón. Para la incorporación de dichas aberturas en la pala, se consideraron dos opciones.

La primera opción fue mediante un proceso de mecanizado CNC una vez la pala se extrae del molde, sin embargo, aplicar mecanizado sobre una zona sensible de la pala como lo es el puente, podría comprometer las propiedades mecánicas de esta, reduciendo el rendimiento global de la pala e incluso pudiendo suponer la rotura de fibras en la zona. De forma que esta opción fue rápidamente descartada.

La segunda opción, y la finalmente implementada, es la obtención de las aberturas laterales directamente del molde. Para poder llevar a cabo esta operación, el mecanizado del molde no era viable si este incluía directamente en el molde el “puente” que formaría dichos “flaps.

Por ello, se concluyó que la mejor manera de conseguirlo es empleando una serie de acoples con las dimensiones deseadas para la abertura, los cuales se anclan de manera independiente al molde, facilitando en gran medida el mecanizado de este.

A continuación, se muestra la pieza diseñada, así como su ubicación y acople en el molde:

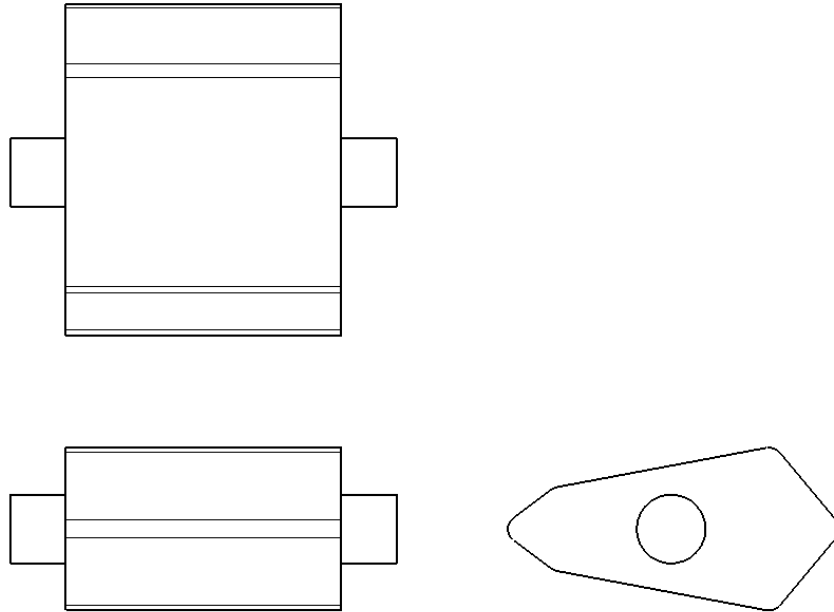


Ilustración 34. Alzado, perfil y planta de la pieza de acople.

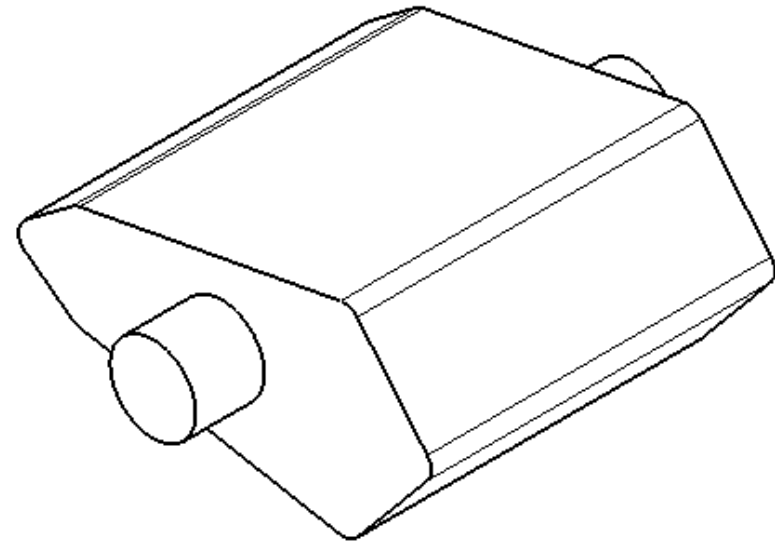


Ilustración 35. Vista isométrica de la pieza de acople.

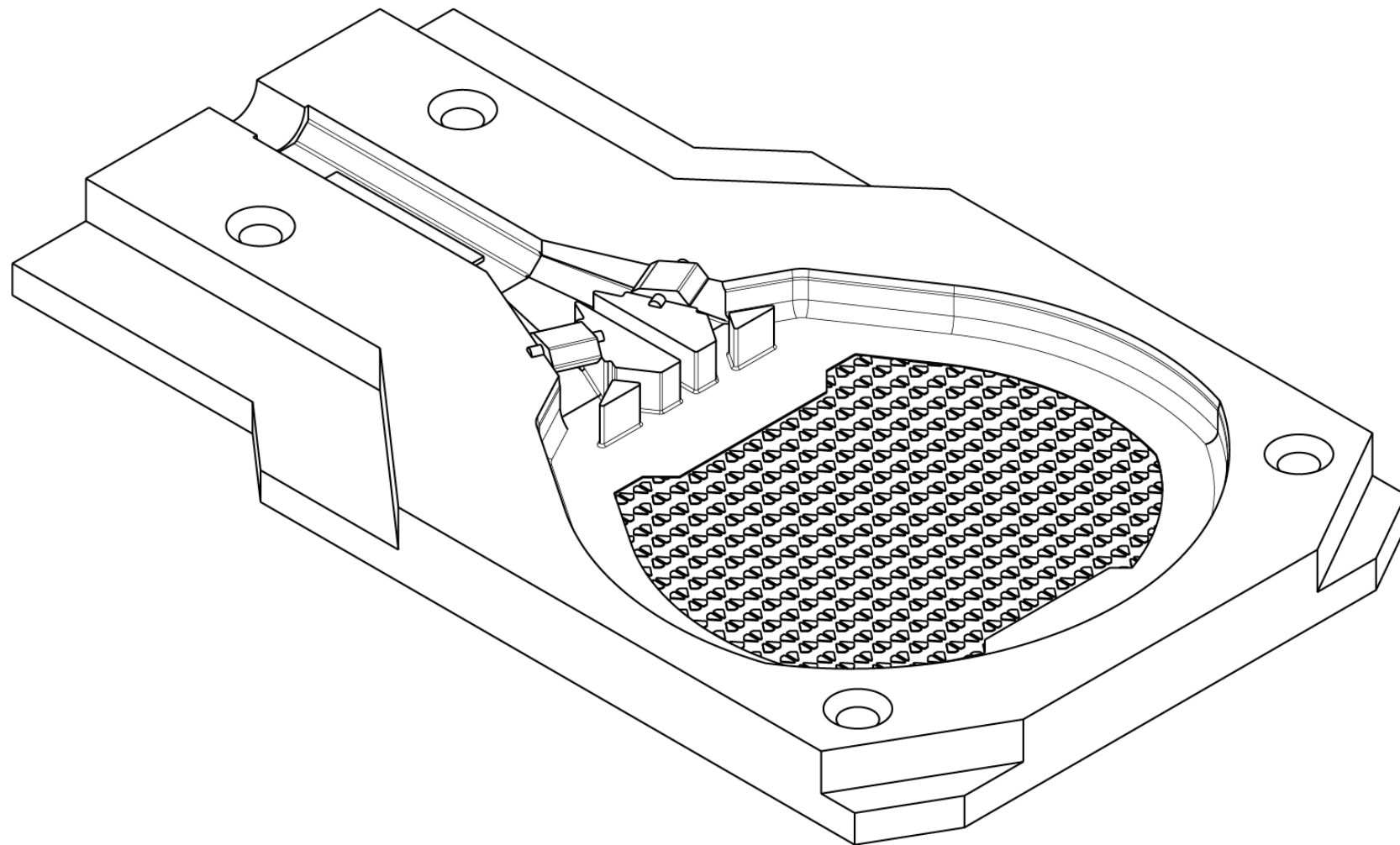


Ilustración 36. Vista isométrica de la placa inferior del molde con las piezas de acople incorporadas.

6.2.4. Ensamblado

Para el ensamblado del conjunto, placa inferior con placa superior del molde, se propone una unión a partir de columnas guía atornilladas a la placa superior, que eviten los desplazamientos laterales durante el curado, además del empleo de un horno prensa específico, que mantenga el cierre de ambas partes del molde.

Se ha diseñado el conjunto de manera que la parte superior encaje sobre el inferior, empleando columnas guía postizas, cada una atornillada a la placa superior con dos tornillos avellanados M4 según norma DIN 7991. El hecho de utilizar estos ejes guía postizos, además de que abarata el molde, permite la sustitución independiente en caso de rotura o desgaste, sin necesidad de cambiar toda la placa superior.

A su vez, para preservar la durabilidad del molde, y evitar en la medida de lo posible el desgaste del Aluminio 7075 con el atornillado de las columnas, los taladros para los tornillos avellanados M4 llevarán incorporados filetes insertos HELICOIL de la correspondiente medida.



Ilustración 37. Ejemplo de Filete Inserto HELICOIL.

El empleo de esta tecnología de filetes insertos aporta una unión atornillada de mayor resistencia y calidad, garantiza elevada resistencia al desgaste y reduce la fricción de la rosca y su rango de dispersión.

En el caso de las piezas de acople para aberturas laterales en el puente, se propone una unión por encaje, sin necesidad de atornillado, facilitando en gran medida el ensamblado del molde. A su vez, son piezas independientes que pueden ser sustituidas con facilidad en caso de rotura o desgaste.

El objetivo del diseño propuesto ha sido simplificar la manejabilidad del molde, así como de reducir tiempos de montaje del conjunto y costes de sustitución o reparación de elementos.

Esta unión es posible gracias al tipo de horno empleado durante el curado de la pala dentro del molde, el cual presenta una serie de prensas paralelas que presionan las placas del molde entre ellas. La presión ejercida sumado a los elementos de encaje que presenta el diseño, es suficiente para evitar desplazamientos verticales u horizontales durante el curado.



Ilustración 38. Ejemplo horno prensa para curado de palas de pádel.

Por último, se muestra la vista isométrica del molde superior y del conjunto ensamblado, así como el detalle de las columnas guía.

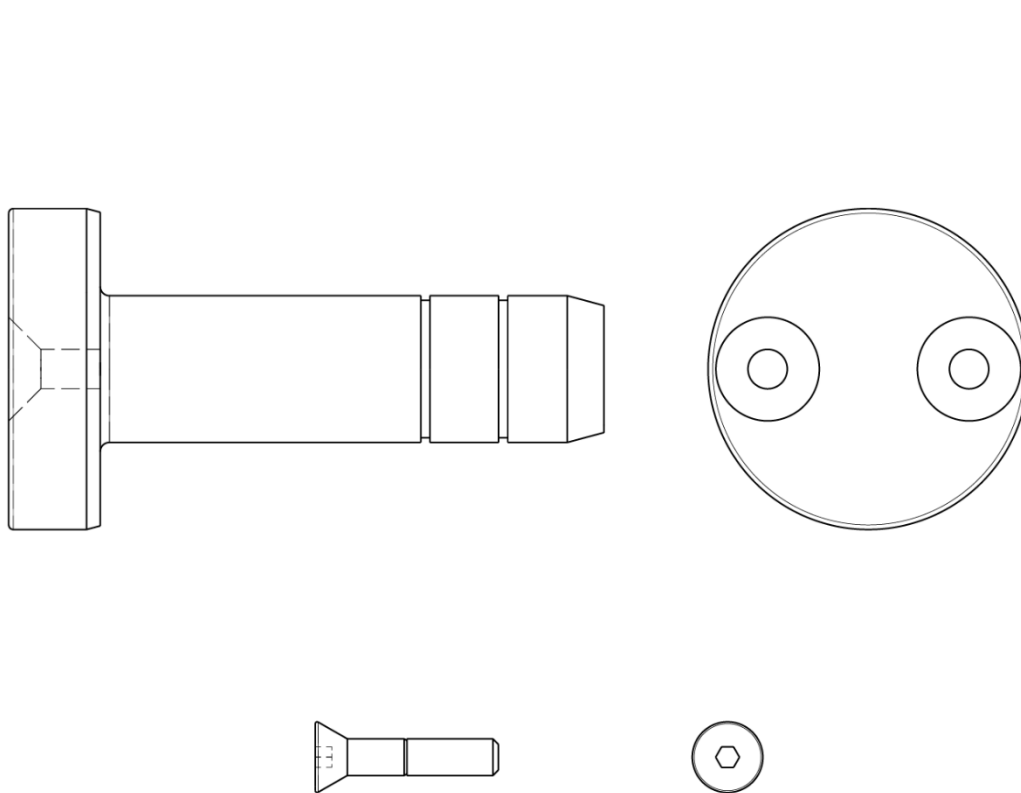


Ilustración 39. Vistas de la columna guía y tornillos M4.

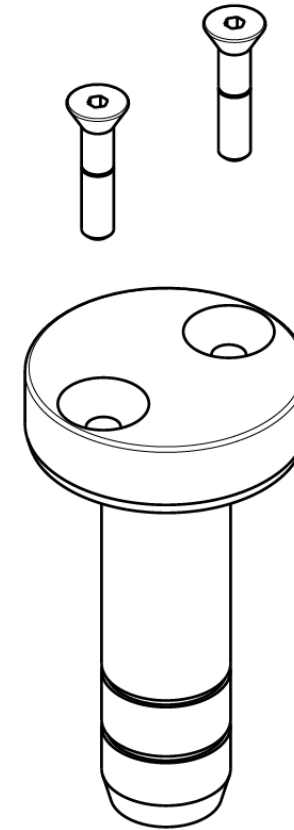


Ilustración 40. Vista isométrica de la unión columna con tornillos M4.

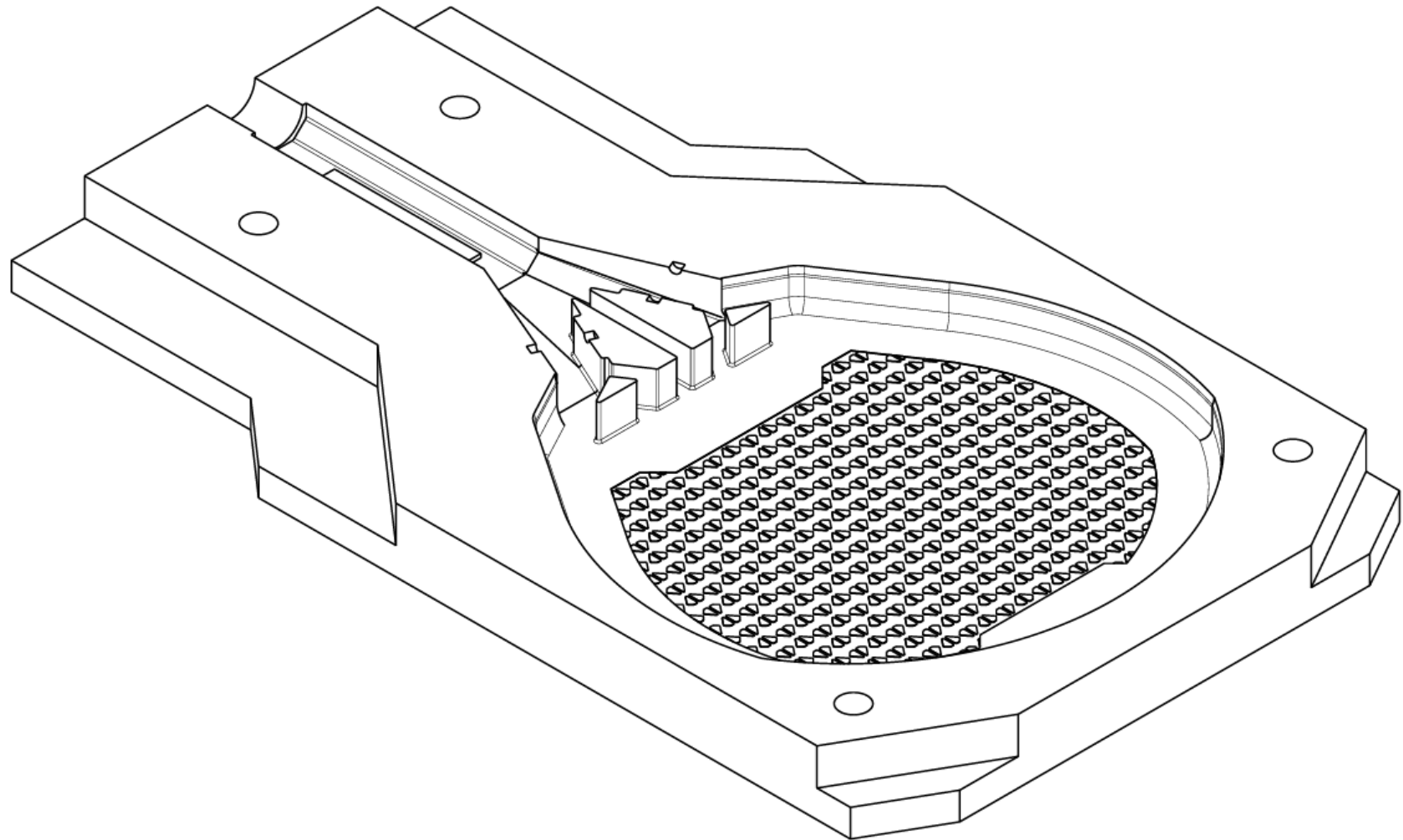


Ilustración 41. Vista isométrica del molde superior.

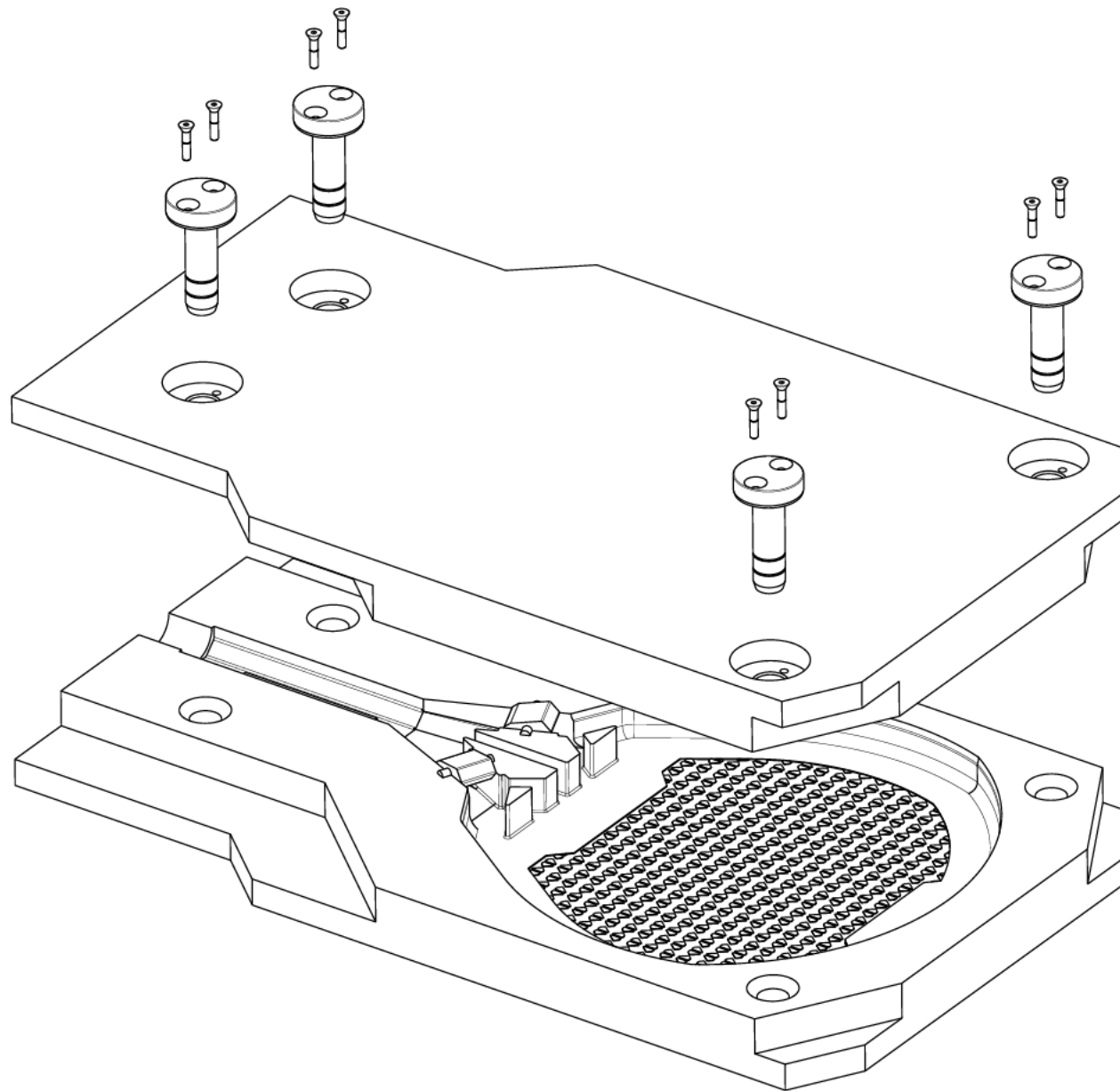


Ilustración 42. Ensamblado del conjunto. Placa superior sobre placa inferior del molde.

7. PROCESOS DE FABRICACIÓN

A continuación, se detallarán las operaciones para el mecanizado del molde, así como las principales etapas presentes en el proceso de fabricación de una pala de pádel [15], desde el ensamblado de los materiales en el molde, hasta su puesta en juego en un partido real.

7.1. Fabricación del Molde

El desarrollo del molde se estructura en tres fases principales: planeado de las superficies, mecanizado por CNC y grabado superficial.

El proceso comienza con dos bloques brutos de aleación de aluminio 7075, partiendo cada placa, superior e inferior, de un espesor de 40 mm.

En la primera fase se realiza un planeado de superficies por fresado, eliminando material hasta alcanzar un espesor final de 35 mm. Este procedimiento asegura superficies paralelas y planas, fundamentales para la correcta alineación del molde durante el cierre. Se consigue una calidad superficial de $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$, conforme a los criterios de acabado medio definidos en la norma ISO 1302:2002 para componentes industriales con contacto funcional. Este nivel de rugosidad es adecuado para moldes que no requieren sellado hermético, pero sí un buen apoyo plano.

Posteriormente, se lleva a cabo el mecanizado CNC de la geometría funcional del molde. Esta operación incluye el perfilado del contorno de la pala, la generación de chaflanes inclinados, así como la perforación de taladros pasantes y roscados, necesarios para el montaje del sistema de cierre y sujeción mediante tornillería estandarizada (M4, conforme a DIN 7991).

La etapa final consiste en la aplicación de un grabado láser 3D sobre la cavidad del molde. Este grabado genera un patrón de rugosidad 3D con función tanto estética como funcional, ya que mejora la adherencia de los materiales compuestos durante la etapa de curado, e influye directamente en la textura superficial final de la pala.

Este conjunto de operaciones asegura la repetitividad, precisión y funcionalidad del molde, clave para una fabricación de palas de pádel con alta calidad dimensional y acabados técnicos adecuados.

7.2. Fabricación de la Pala de Pádel

Las principales etapas involucradas en la producción de la pala de pádel se desarrollan a continuación.

7.2.1 Preparación de los materiales

Una vez seleccionados los materiales que van a componer la pala, el primer paso para fabricar una pala de pádel consiste en la preparación de estos.

Para ello, se lleva a cabo el troquelado del núcleo de la pala, dándole la forma adecuada para su correspondiente molde. A partir de una lámina de Goma EVA (Etil Vinil Acetato) o FOAM (Polietileno), y una máquina de troquelado, se obtiene el núcleo que conformará la pala.

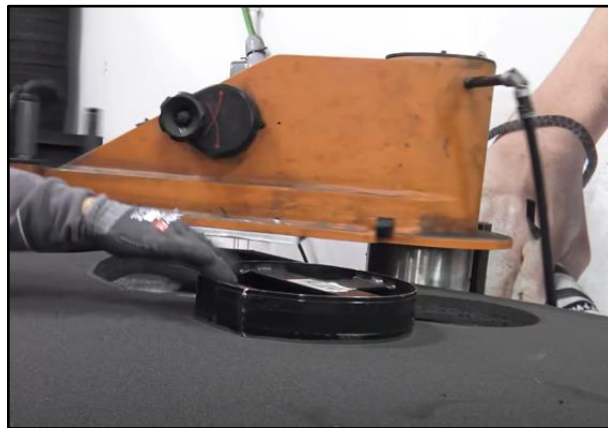


Ilustración 43. Operación de troquelado del núcleo de la pala.

A su vez, es preciso recortar los materiales de refuerzo de la pala, las fibras, también de acuerdo con la forma del molde, atendiendo a la forma del corazón, etc. También se preparará el tubular que formará el marco de la pala.

7.2.2. Preparación del molde

Previo al moldeo, es necesaria la preparación del molde. Este, en nuestro caso particular de aluminio 7075, se somete a un proceso de limpieza, con objeto de eliminar posibles residuos, así como a un precalentamiento alrededor de los 60 °C, para agilizar el futuro proceso de desmoldeo y curación de las fibras.



Ilustración 44. Aplicación de agente desmoldeante sobre la superficie del molde.

Tras el precalentamiento, se aplica sobre la superficie del molde una capa de un agente desmoldeante, que facilitará la extracción de la pala cuando finalice el proceso de curado, evitando dañar su estructura.

7.2.3. Colocación de los materiales

Ya adaptada la forma de los materiales al molde de la pala, y preparado el molde adecuadamente, se procede al ensamblado de los materiales.

Primeramente, se colocan las fibras recortadas, pudiendo combinar diferentes materiales para formar un determinado perfil en función de las propiedades finales que se le pretendan otorgar a la pala. Durante la colocación de las fibras estructurales de ambas caras del molde, se va aplicando a cada una ellas una mezcla de resina epoxi con un catalizador especial, utilizando un pincel. Esta impregnación de las capas con resina ofrece una alta adherencia entre los componentes tras el curado, obteniendo de esta manera una estructura compacta y resistente.

Tras colocar las capas de fibras, se procede a la colocación del elemento tubular, una malla con forma típicamente cilíndrica que compone el marco de la pala. Una vez impregnado en resina, el doble tubular se coloca alrededor del perímetro del molde. En el interior de este se encuentran tubos de aire, los cuales se presurizarán durante el calentamiento del molde en el horno.



Ilustración 45. Malla tubular del marco de la pala.

Por último, se coloca el núcleo de goma troquelado en la parte central del molde, de forma que este resulte envuelto por el tubular, y se cierra el molde.



Ilustración 46. Colocación del núcleo troquelado en el molde.

7.2.4. Curado

El molde cerrado se introduce en un horno, permaneciendo este aproximadamente 20 minutos a una temperatura de 60 °C. Durante la estancia del molde en el horno, se presurizan los tubos de aire del interior del doble tubular, para que este adquiera la forma del molde sin dejar huecos.



Ilustración 47. Presurizado de los tubos de aire dentro de la malla tubular.

7.2.5. Extracción del molde

Finalizado el curado, se extrae la pala del molde con facilidad gracias al agente desmoldeante aplicado con anterioridad, y se somete a un enfriamiento controlado, de manera gradual para evitar posibles deformaciones internas que puedan comprometer la calidad final.

7.2.6. Acabado superficial

La pala según sale del molde, presenta rebaba alrededor de sus extremos y en el puente, por lo que es necesario eliminar todo este material sobrante mediante un proceso de **rebarbado**.



Ilustración 48. Operación de rebarbado para eliminar el material sobrante.

Tras eliminar el exceso de material de la pala, esta se encuentra sucia del polvo generado durante en rebarbado, por ello es necesario someterla a un proceso exhaustivo de **lavado** con agua y jabón. La limpieza de la pala es una etapa clave para garantizar la calidad de los procesos futuros.

Posterior al lavado viene el **enmasillado**, proceso manual a través del cual se rellenan las imperfecciones/poros presentes en la superficie, mediante una masilla. Después se lleva a cabo la **imprimación**, proceso consistente en la aplicación de un aerosol que proporciona un acabado superficial favorable para la capa de pintura.

Alcanzado este punto, las palas se trasladan a una cámara de calor, a temperaturas superiores a los 40 °C, ya que estas requieren de un proceso de secado previo a la pintura. Este procedimiento contribuye a una correcta curación del composite.



Ilustración 49. Proceso de secado en la cámara de calor previo a pintura.

Tras un adecuado secado, la pala se encuentra en perfectas condiciones para aplicar la pintura. Una vez terminado el proceso de pintado, se ponen las calcas, pegatinas las cuales tienen un fin plenamente estético.



Ilustración 50. Operación de aplicación de pintura y colocación de calcas.

Finalmente, posterior al proceso de taladrado, es común aplicar un barniz y/o lacado para aportar a la pala un acabado brillante, satinado o mate, haciendo de esta un producto premium y elegante.

7.2.7. Taladrado

Proceso automatizado que consiste en la mecanización de los agujeros existentes en la cara de las palas. El patrón de agujereado varía en función del modelo a fabricar, estando distribuidos los orificios de distinta manera, incluso empleando brocas de distintos diámetros. El patrón de agujereado diseñado para nuestra pala, requiere de 3 brocas diferentes, de 9, 11 y 13 mm de diámetro.



Ilustración 51. Operación de taladrado del patrón de agujereado.

Este proceso de mecanizado se suele realizar con un sistema de Taladrado CNC.

7.2.8. Ensamblaje de la empuñadura

El último paso para rematar la fabricación de la pala es introducir el cordón de seguridad con su correspondiente tapón en la base del mango, para después recubrir la empuñadura con el conocido “grip”, que permitirá al jugador agarrar la pala con firmeza.

Una pala recién salida del proceso de producción presenta la empuñadura cubierta de un plástico termo-retráctil que permita identificar a esta como producto terminado.



Ilustración 52. Plástico termo-retráctil de la empuñadura.



7.2.9. Control de calidad

Es común que durante la fabricación de una pala de pádel se lleven a cabo varios controles de calidad, en puntos críticos del proceso.

El primer control de calidad se produce cuando la pala sale del curado, una vez rebarbada. En este punto se comprueba el peso de la pala y su aspecto superficial. Aquellas palas que incumplan las tolerancias establecidas, o presenten imperfecciones superficiales no reparables son desechadas, y no continúan con el proceso.

Para finalizar el proceso, se desarrolla un último control de calidad antes de añadir el plástico termo-retráctil en el mango. Se comprueban las condiciones finales de la pala, y se realiza un último pesaje.

8. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Una vez terminada la fase de diseño, se realizará un análisis de elementos finitos empleando la herramienta GSA (Generative Structural Analysis) integrada en el propio Catia V.5.

El empleo de esta herramienta de ensayo permitirá simular el comportamiento del diseño realizado, cuando este se somete a diferentes cargas. El objetivo del análisis de elementos finitos será comprobar las tensiones a las que se encuentran sometidas las diferentes partes del sólido al aplicar una fuerza perpendicular en una superficie de este, para determinar si existe fallo en el material o no.

Primeramente, se establecen las condiciones de simulación.

8.1. Condiciones de contorno

8.1.1. Material

La realización del análisis de elementos finitos precisa de las propiedades mecánicas de los materiales que forman el sólido, sin embargo, en nuestro caso, el sólido consiste en un laminado compuesto que se comporta como un material homogéneo equivalente, presentando un conjunto de propiedades mecánicas promedio que representen el comportamiento global del material, ya que la herramienta de análisis Generative Structural Analysis (GSA) de Catia V.5. solo permite asociar un material al sólido diseñado.

De esta manera, se pretende obtener una aproximación a la respuesta global de la pala frente a un esfuerzo superficial, pero no se tienen en cuenta los esfuerzos internos entre las capas.

Para la definición de un material homogéneo equivalente, será necesario calcular valores promedios de las propiedades del conjunto de materiales que forman la pala, tales como el Módulo de Young, la densidad, el coeficiente de Poisson, o el límite elástico.

A continuación, se detallan los cálculos, para los cuales se considera que todas las capas de material ocupan el mismo área, además, dado que las capas se encuentran laminadas en paralelo, se empleará un promedio ponderado por espesor:

Módulo de Young Equivalente

$$E_{eq} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{E_i \cdot e_i}{e_{total}} \right)$$

Ecuación 1. Módulo Elástico Equivalente

Siendo:

- E_i : El Módulo de Young de cada material.
- e_i : El espesor de cada capa de material.
- e_{total} : El espesor total del sólido.

Densidad Equivalente

$$\rho_{eq} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\rho_i \cdot V_i}{V_{total}} \right) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\rho_i \cdot e_i}{e_{total}} \right)$$

Ecuación 2. Densidad Equivalente

Donde:

- ρ_i : El Módulo Elástico de cada material.
- e_i : El espesor de cada capa de material.
- e_{total} : El espesor total del sólido.

Coefficiente de Poisson Equivalente

$$\nu_{eq} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\nu_i \cdot e_i}{e_{total}} \right)$$

Ecuación 3. Coeficiente de Poisson Equivalente

Donde:

- ν_i : El Coeficiente de Poisson de cada material.
- e_i : El espesor de cada capa de material.
- e_{total} : El espesor total del sólido.

Límite Elástico Equivalente

$$\sigma_{eq} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\sigma_i \cdot e_i}{e_{total}} \right)$$

Ecuación 4. Límite Elástico Equivalente

Donde:

- σ_i : El Límite Elástico de cada material.
- e_i : El espesor de cada capa de material.
- e_{total} : El espesor total del sólido.

A continuación, se exponen las propiedades de los materiales seleccionados para formar la cabeza de la pala de pádel:

Material	Módulo de Young (MPa)	Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de Poisson	Límite Elástico (MPa)
Fibra de Carbono	240.000	1.780	0,2	2.500
Fibra de Basalto	89.000	2.670	0,26	1.100
Goma EVA de Baja Densidad	0,1	20	0,48	0,015
Goma EVA de Alta Densidad	0,46	45	0,48	0,05

Tabla 15. Propiedades de los materiales de la cabeza de la pala.

Tras realizar los cálculos pertinentes, empleando la ponderación en función del espesor de cada material, se obtienen las siguientes propiedades mecánicas para el material homogéneo equivalente:

	Módulo de Young (GPa)	Densidad (kg/m ³)	Coefficiente de Poisson	Límite Elástico (MPa)
Material Homogéneo Equivalente	11,80	210,97	0,46	131,08

Tabla 16. Propiedades mecánicas del material homogéneo equivalente.

8.1.2. Fuerza aplicada

Para que la simulación sea lo más fiel a la realidad de un partido de pádel, será necesario calcular la fuerza que ejerce una pelota de pádel reglamentaria sobre el plano de la pala durante el impacto.

De acuerdo con la Federación Internacional de Pádel [4], la pelota deberá ser una esfera de goma con una superficie exterior uniforme de color blanco u amarillo, cuyo diámetro debe medir entre 6,35 y 6,77 centímetros y su peso estará comprendido entre 56,0 y 59,4 gramos.

El problema se resuelve partiendo de la Segunda Ley de Newton o Ley Fundamental de la Dinámica, la cual establece que la aceleración de un objeto es directamente proporcional al sumatorio de fuerzas que actúan sobre él, e inversamente proporcional a la cantidad de materia de dicho objeto, su masa [40].

$$\sum_{i=0}^n \vec{F}_i - m \cdot \vec{a}_G = 0$$

Ecuación 5. Segunda Ley de Newton

Dicha ecuación se puede expresar de forma diferencial de la siguiente manera:

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

Ecuación 6. Segunda Ley de Newton (Diferencial)

Al integrar ambos lados en un intervalo de tiempo, desde el instante justo antes del impacto t_0 , hasta el instante justo después del impacto t_1 , la expresión queda:

$$\int_{t_0}^{t_1} F dt = m \int_{v_0}^{v_1} dv$$

Ecuación 7. Segunda Ley de Newton (Integral)

De forma que, si consideramos la pelota como un sólido rígido que impacta contra la pala durante un intervalo de tiempo determinado, es posible expresar la fuerza media equivalente como:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{(\vec{v}_f - \vec{v}_i)}{\Delta t}$$

Ecuación 8. Fuerza media equivalente en un intervalo de tiempo

Donde:

- m : Masa de la pelota de pádel (kg).
- \vec{v}_i : Velocidad de la pelota previa al impacto (m/s).
- \vec{v}_f : Velocidad de la pelota posterior al impacto (m/s).
- Δt : Tiempo de contacto de la pelota con la pala (s).

Se obtendrá la fuerza media equivalente de una situación “desfavorable” para la pala diseñada, aquella en la que el jugador trate de transmitir la mayor velocidad posible a la pelota al realizar un remate potente.

Las condiciones de contorno establecidas para el cálculo de la fuerza sobre la pelota son las siguientes:

- El intervalo de masa establecido por el FIP para una pelota de pádel se encuentra entre 56,0 y 59,4 gramos [4]. Por ello, la masa de la pelota será el caso más desfavorable, siendo este la pelota más pesada de 59,4 gramos.
- La pelota alcanza al jugador dispuesto para el remate a una velocidad de juego media-alta, en torno a los 70 km/h, y saldrá disparada tras el impacto a una velocidad superior a los 100 km/h. Se han llegado a registrar velocidades de pelota de 120 km/h tras “smashes” en el pádel profesional.
- Se considera la dirección del movimiento después del impacto como positiva.
- Se estima que el tiempo de contacto de la pelota con la pala se encuentra en el rango de 5 milisegundos.

Se cambian las unidades de la velocidad de la pelota a metros por segundo, unidad del SI:

$$v_i = 70 \frac{km}{h} \cdot 1000 \frac{m}{km} \cdot 3600 \frac{h}{s} = 19,44 \text{ (m/s)}$$

$$v_f = 120 \frac{km}{h} \cdot 1000 \frac{m}{km} \cdot 3600 \frac{h}{s} = 33,33 \text{ (m/s)}$$

Ecuación 9. Factor de conversión velocidad

Una vez impuestas las condiciones del cálculo, se obtiene el siguiente valor de fuerza media:

$$F_M = m \cdot \frac{(v_f - v_i)}{\Delta t} = 0,0594 \cdot \frac{(33,33 - (-19,44))}{0,005} = 626,95 \text{ N}$$

Otra consideración a tener en cuenta es que la naturaleza de la pelota de pádel hace que esta se deforme en el momento del impacto con la pala, de

forma que la carga no se aplica de manera puntual sobre, sino que esta se reparte sobre un área equivalente a la deformación de la pelota contra la pala, comportándose como una fuerza distribuida en un área circular.

Para obtener una representación realista con el análisis de elementos finitos, así como eliminar posibles concentraciones de tensiones irreales en la pala, fruto de aplicar la fuerza en un único punto, se aplicará la carga como una presión distribuida en un área circular.

Al impactar con la pala una pelota de pádel, esta sufre una deformación elástica. El área de contacto de la pelota con la pala se obtendrá a partir del cálculo del radio de contacto [41]. La ecuación aproximada para el radio de contacto en impactos elásticos viene dada por:

$$R_C \approx \sqrt{\delta \cdot D}$$

Ecuación 10. Radio de Contacto Aproximado

Donde:

- δ : Deformación de la pelota (mm)
- D : Diámetro de la pelota (mm)

La magnitud de la deformación que experimenta la pelota durante el impacto está determinada por su rigidez estructural y de la fuerza aplicada sobre ella. Investigaciones previas sobre pelotas con propiedades similares, como las utilizadas en tenis o squash, indican que en colisiones de alta intensidad la deformación suele situarse en un rango de 3 a 5 mm [42].

En este caso particular, se prevé un impacto de alta intensidad. Bajo esta condición, se empleará un valor de deformación en torno a los 4 mm. Además, se considera un diámetro de pelota de 67,7 mm, el valor de diámetro máximo permitido por la FIP [4].

Con los parámetros mencionados, se calcula el radio de contacto:

$$R_C \approx \sqrt{\delta \cdot D} = \sqrt{4 \cdot 67,7} = 16,45 \text{ mm} = 1,645 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Siendo el área de contacto:

$$A = \pi \cdot R_C^2$$

Ecuación 11. Área de contacto

$$A = \pi \cdot R_C^2 = \pi \cdot (16,45^2) = 850,74 \text{ mm}^2 = 8,5074 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$



Por último, se calcula la presión distribuida generada sobre la pala. La magnitud presión mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, de la siguiente forma:

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

Ecuación 12.Presión

Para la obtención de la presión, se considerará el valor de la fuerza media calculada para el caso desfavorable detallado previamente, y el área de contacto calculada:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{626,95}{8,5074 \cdot 10^{-4}} = 736.946,66 \text{ Pa}$$

$$P \approx 0,737 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 0,737 \text{ MPa}$$

Este valor de presión se aplicará como carga distribuida en un área circular para la realización del análisis de elementos finitos, a través de la herramienta Generative Structural Analysis (GSA) de Catia V.5.

8.2. Análisis de Elementos Finitos

Se estudiará el comportamiento del diseño de la pala de pádel frente a fuerzas superficiales, sometidas en diferentes puntos de esta, mostrados a continuación:

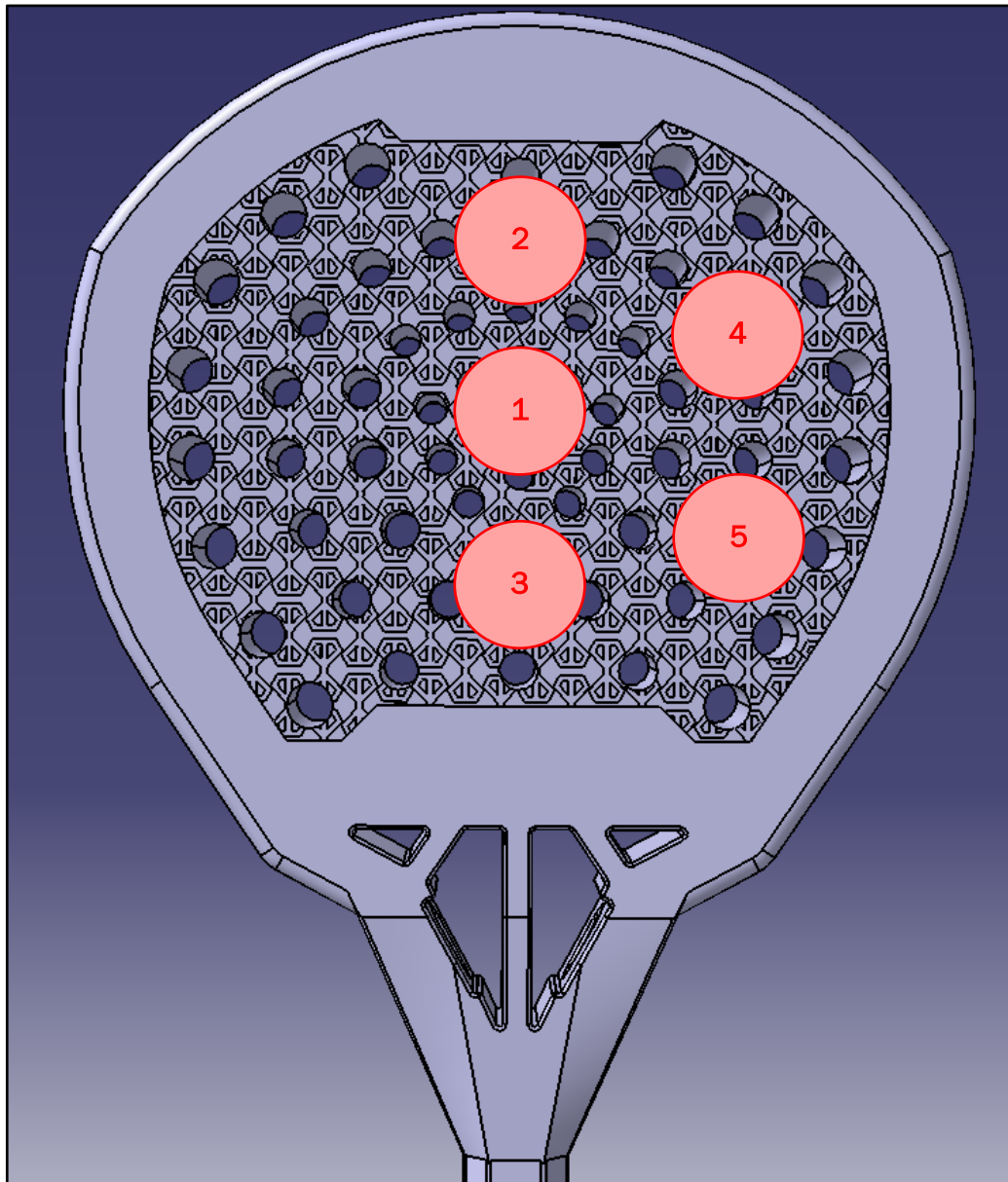


Ilustración 53. Puntos propuestos de estudio para el análisis de elementos finitos.

Los puntos elegidos son considerados los de mayor probabilidad de impacto en un partido real. Se omite el estudio de los puntos opuestos al número 4 y 5, ya que su comportamiento será idéntico por simetría.

Una vez establecidos los puntos de estudio, se imponen las condiciones de contorno en base a las cuales se realizará el análisis de elementos finitos en CATIA V.5, a través de la herramienta Generative Structural Analysis.

En primer lugar, se establece el tamaño de malla para realizar el análisis. En este caso se opta por un elemento finito de 2 mm, que aporta una simulación equilibrada, con buena precisión sin requerir tiempos de computado muy elevados.

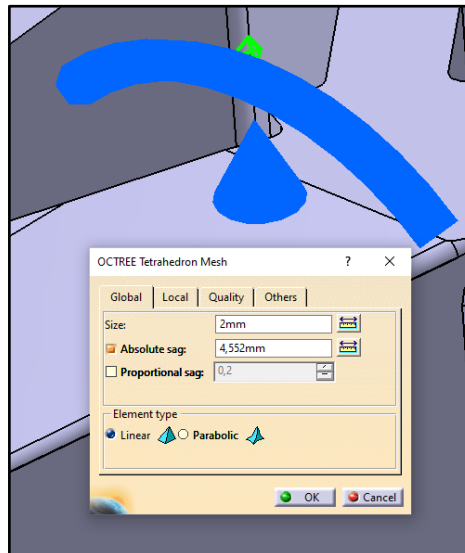


Ilustración 54. Tamaño de la malla. Generative Structural Analysis.

Después, será necesario definir las propiedades del material homogéneo equivalente calculadas. Esto es posible modificando las propiedades del material previamente establecido:

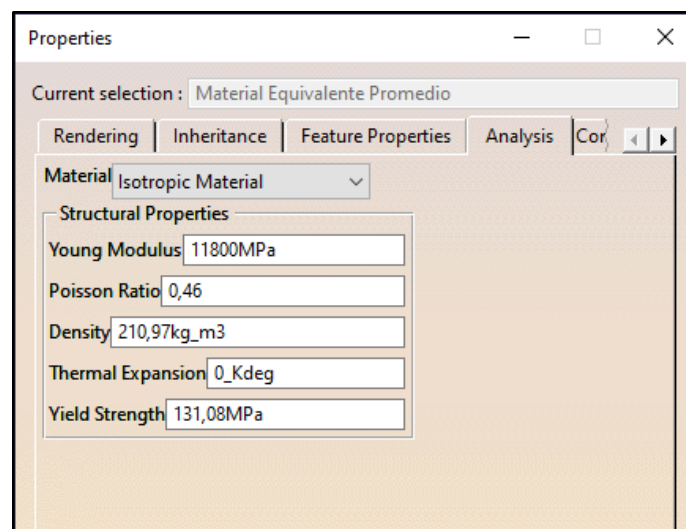


Ilustración 55. Propiedades del material promedio equivalente. Generative Structural Analysis.

Posteriormente, para la aplicación de la fuerza, se define una superficie equivalente al área de contacto de la pelota con la pala, y a través del comando “Pressure”, se establece el valor de la presión en MPa sobre dicha superficie, de la siguiente manera:

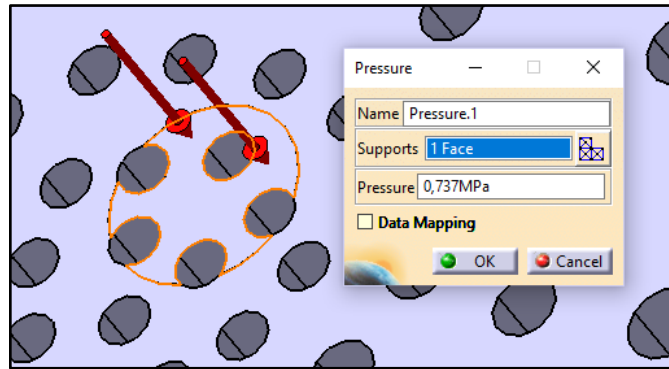


Ilustración 56. Fuerza equivalente al impacto de la pelota con la pala. Generative Structural Analysis.

Por último, será necesario declarar las superficies de la pala que se comportan como bancada, es decir que se encuentran fijas. Estas superficies se establecerán en función de donde se pretenda analizar la distribución de las tensiones.

En nuestro caso concreto, al no poder realizar la simulación del material laminado por capas, sino llevar a cabo el análisis del comportamiento de manera aproximada, englobando las propiedades de los materiales en un material homogéneo equivalente, lo correcto es observar la distribución de las tensiones en la cabeza de la pala, ya que es la parte compuesta por todos estos materiales.

No sería correcto observar el comportamiento del puente o de la empuñadura, ya que estas partes no presentan el núcleo de Goma EVA.

Para comprobar esta distribución, se fija el contorno de la cabeza de la pala a través del comando “Clamps”, de la siguiente manera:

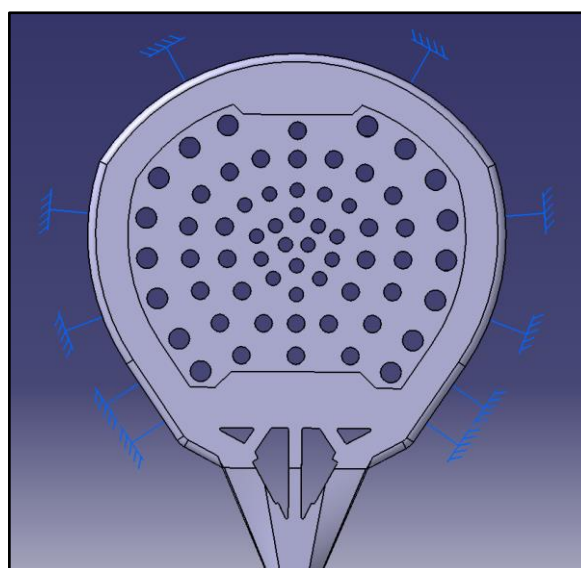
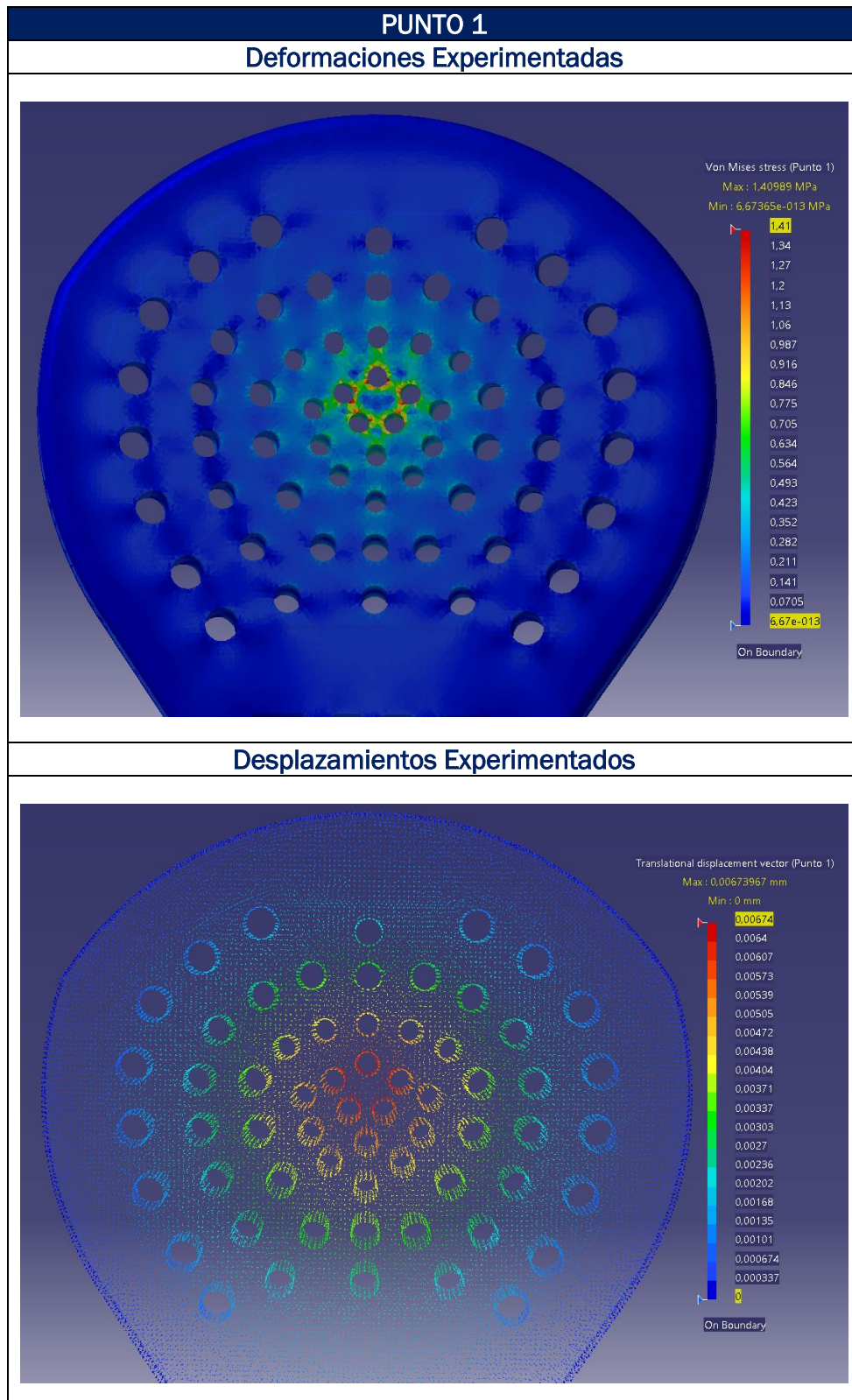
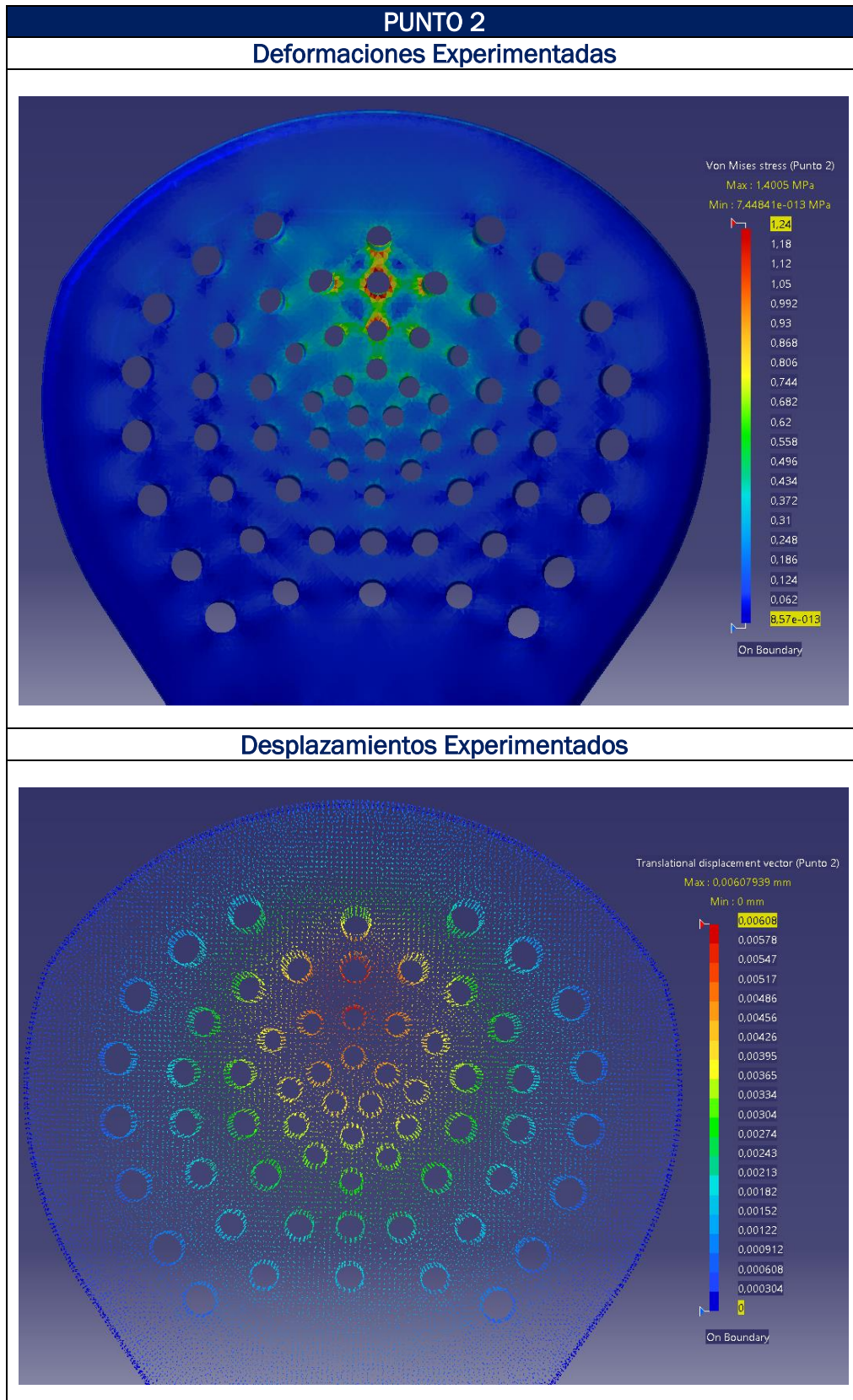
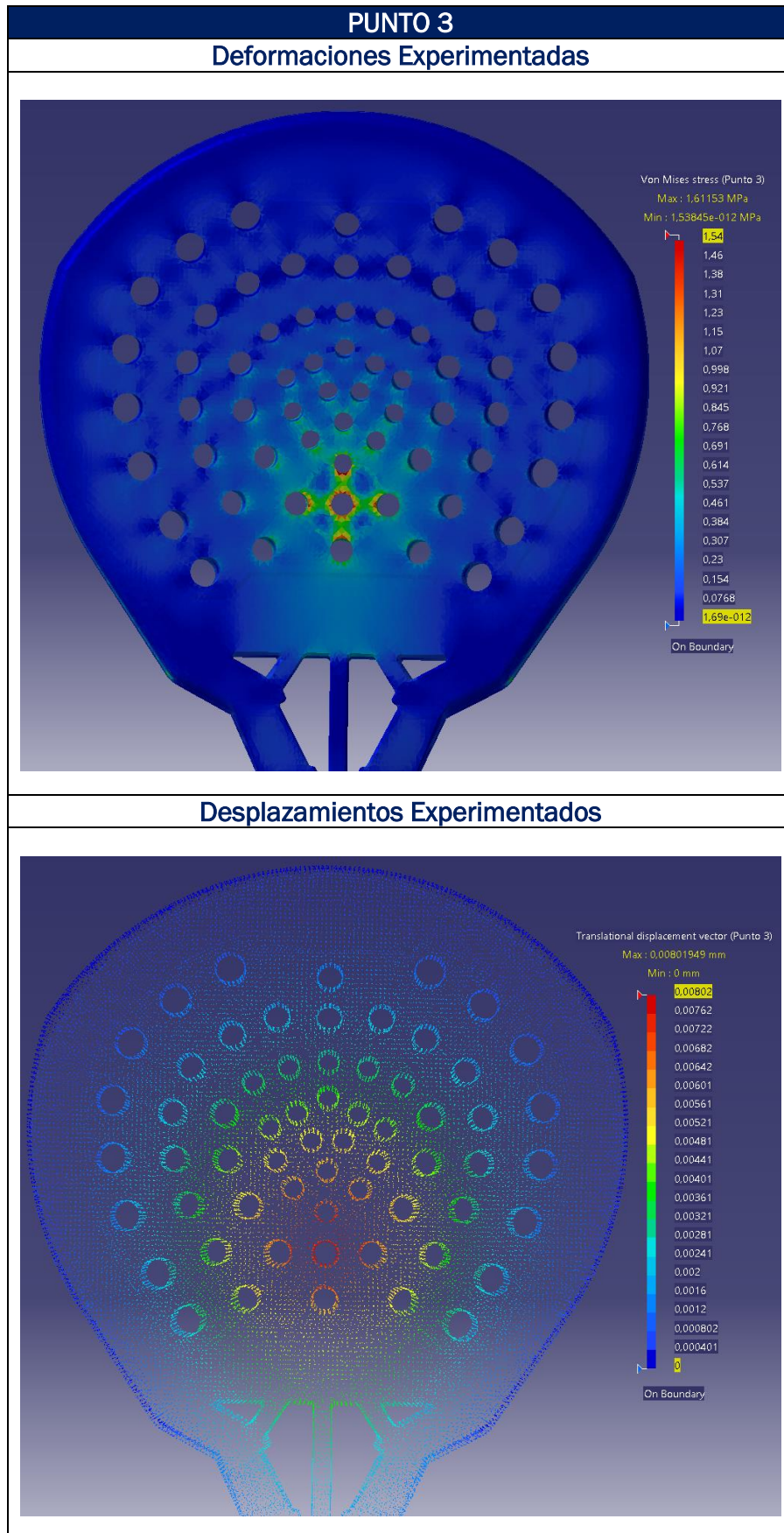


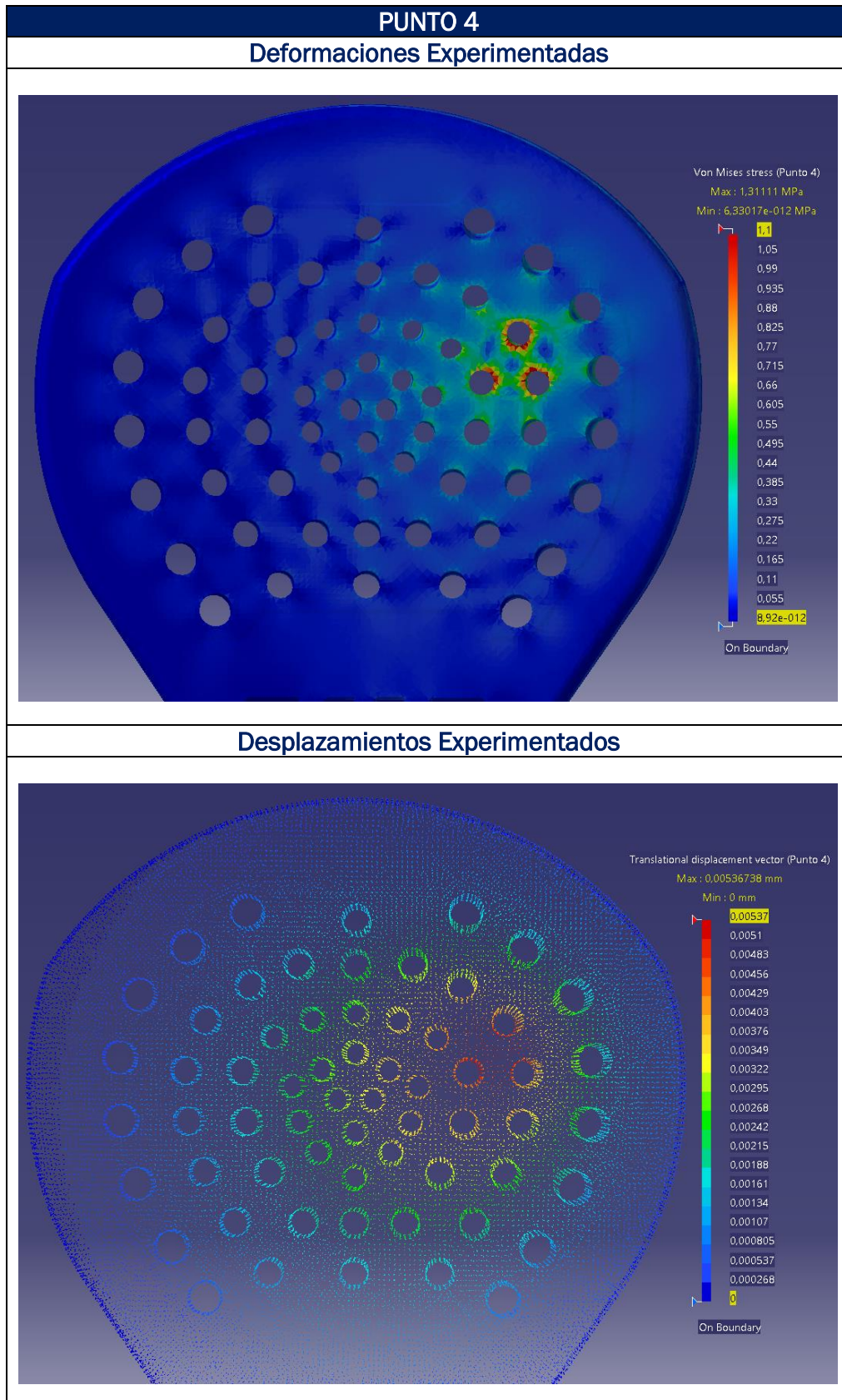
Ilustración 57. Elementos fijos de la pala. Generative Structural Analysis.

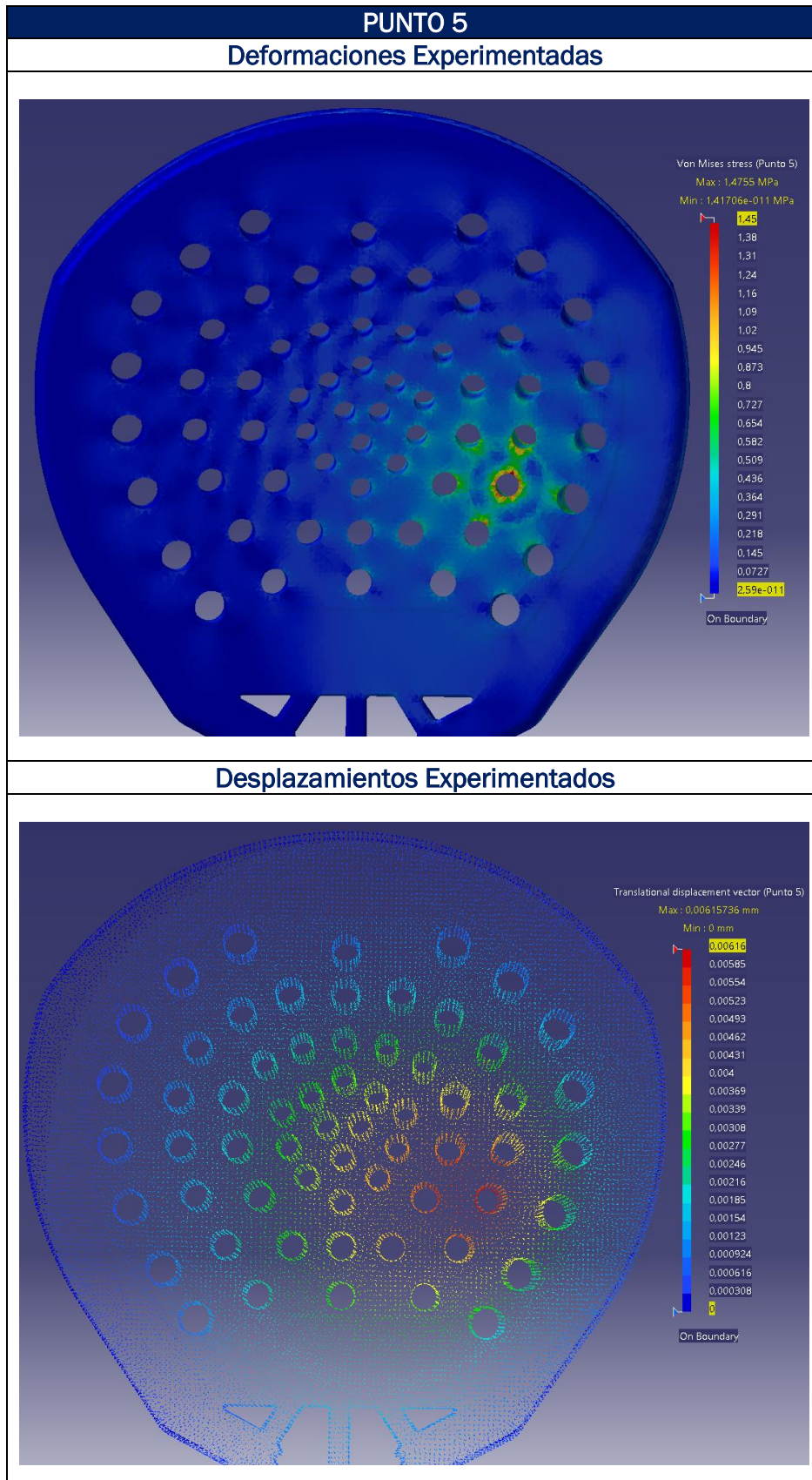
Una vez establecidos los parámetros necesarios para llevar a cabo el análisis de elementos finitos, es posible correr la simulación. Los resultados obtenidos han sido los siguientes:













8.3. Discusión de los resultados

El impacto que alcanza la mayor tensión es el del punto 3, en la parte central inferior de la pala, con una tensión máxima de 1,61 MPa, y de igual manera, el desplazamiento máximo se da también en el punto mencionado, siendo este de 0,008 mm.

En términos generales, las tensiones generadas en las diferentes ubicaciones estudiadas de la pala son similares, entre 1,3 y 1,6 MPa, en ningún caso superando la tensión admisible del material equivalente. Lo mismo ocurre con los desplazamientos, que son prácticamente despreciables, abarcando valores entre 0,005 y 0,008 mm.

Se observa como la distribución de tensiones en torno a la superficie de impacto de la pelota se da de manera uniforme, concentrándose los picos de tensión en el contorno del taladrado de la pala cercano al punto de golpeo, lo cual es coherente.

Del análisis de elementos finitos realizado, a partir de las condiciones de contorno impuestas, se determina que el comportamiento global de la pala es realista y acorde a lo que se podría esperar.

Si bien, sería recomendable repetir el análisis con una herramienta que permita dividir el sólido en capas, y poder analizar las tensiones y desplazamientos sufridos por cada una de las láminas de forma individual, para poder simular el comportamiento verdadero de la pala.

9. PRESUPUESTO

Para finalizar el desarrollo de la pala de pádel diseñada, se procede a analizar la viabilidad económica de la producción de una unidad. Si bien, se prevé un coste unitario muy elevado, ya que se consideran los costes de la fabricación del molde, que suponen una gran inversión inicial.

No obstante, la inversión en la fabricación del molde es de cara a una producción en serie de palas de pádel, proceso que será rentable a largo plazo.

El presupuesto se estructura en diferentes bloques de la siguiente manera, coste de los materiales, costes de la maquinaria involucrada en el proceso de fabricación, costes de mano de obra, y por último el bloque de precios del producto terminado.

MATERIALES DE LA PALA DE PÁDEL				
Nº	Denominación del material	Coste Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
1	Tejido de Fibra de Carbono 12K	27,95 €/m ²	0,6 m ²	16,77 €
2	Fibra de Basalto	28,86 €/m ²	1 m ²	28,86 €
3	Plancha de Goma EVA (Baja Densidad)	31,80 €/m ² (10 mm)	0,15 m ²	4,77 €
4	Plancha de Goma EVA (Alta Densidad)	30,10 €/m ² (15 mm)	0,075 m ²	2,26 €
5	Malla Tubular Fibra de Carbono 3K	13,07 €/malla	2 mallas	26,14 €
6	Resina Epoxi Flexible	36,24 €/kg	0,5 kg	18,12 €
COSTE TOTAL				96,92 €

Tabla 17. Coste de los materiales de la pala de pádel.

MATERIALES DEL MOLDE Y PIEZAS				
Nº	Denominación del material	Coste Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
1	Aleación Aluminio 7075 Molde	5,50 €/kg	40 kg	220,00 €
2	Aleación Aluminio 7075 Piezas	5,50 €/kg	2 kg	11,00 €
3	Tornillos M4 DIN 7991 Acero Clase 8.8	7,90 €/100 u.	8 u.	0,63 €
COSTE TOTAL				231,63 €

Tabla 18. Coste de los materiales del molde y sus piezas.

FABRICACIÓN DEL MOLDE Y PIEZAS		
Nº	Denominación de la operación	Coste Operación (€)
1	Fase de Programación del Mecanizado CNC	500,00 €
2	Fase de Mecanizado CNC	1.650,00 €
3	Fase de pulido, ajuste, y montaje	500,00 €
4	Fase de Grabado Láser de la superficie rugosa	400,00 €
COSTE TOTAL		3.050,00 €

Tabla 19. Coste de la fabricación del molde y sus piezas.

FABRICACIÓN DE LA PALA DE PÁDEL					
Nº	Operario	Designación de la tarea	Coste Hora (€/h)	Horas (h)	Total (€)
1	Peón	Preparación de los materiales	10	1	10,00 €
2	Especialista	Preparación del molde y colocación de materiales	18	1,5	27,00 €
3	Peón	Transportar molde al horno de curado y extracción	10	0,25	2,50 €
4	Técnico de calidad	Control de calidad	18	0,25	4,50 €
5	Técnico de mecanizado	Acabado superficial y Taladrado	16	2	32,00 €
6	Montador	Ensamblaje de la empuñadura	12	0,5	6,00 €
7	Técnico de calidad	Inspección de producto final	18	0,25	4,50 €
COSTE TOTAL					82,00 €

Tabla 20. Coste de la fabricación de la pala de pádel.

CUADRO DE PRECIOS PRODUCCIÓN DE UNA PALA DE PÁDEL		
Nº	Designación	Coste Operación (€)
1	Materiales de la Pala de Pádel	96,92 €
2	Materiales del Molde y Piezas	231,00 €
3	Fabricación del Molde y Piezas	3.050,00 €
4	Fabricación de la Pala de Pádel	92,00 €
COSTE TOTAL		3.469,92 €

Tabla 21. Cuadro de precios global de la producción de una pala de pádel.

Se observa como efectivamente la inversión inicial es elevada, por ello, a continuación, se realizará un cálculo aproximado del número de palas de pádel a producir, necesarias para amortizar los costes de fabricación del molde.

Atendiendo al estudio de mercado previo, y a las características de las cuales dispone la pala de pádel diseñada, se estima que el precio de mercado se encuentre en 250-300 euros. El cálculo de la amortización se plantea para un escenario intermedio, con un precio de mercado para nuestra pala de 275 euros.



Inversión inicial total para amortizar

- Materiales del molde y piezas: 231,63 €
- Mecanizado del molde y piezas: 3.050,00 €

$$\text{Total inversión inicial} = 261,63 \text{ €} + 3.050,00 \text{ €} = 3.281,63 \text{ €}$$

Coste total de fabricar una pala de pádel (unidad)

- Materiales de la pala: 96,92 €
- Mano de obra por pala: 82,00 €

$$\text{Total coste unitario} = 96,92 \text{ €} + 82,00 \text{ €} = 178,92 \text{ €}$$

Beneficio por pala (escenario de venta intermedio)

- Precio de venta: 275,00 €
- Coste unitario por pala: 178,92 €

$$\text{Beneficio unitario} = 275,00 - 178,92 \text{ €} = 96,08 \text{ €}$$

Nº de palas requerido para amortizar la inversión inicial

- Inversión inicial: 3.281,63 €
- Beneficio unitario: 96,08 €

$$\text{Nº de palas} = \frac{3.281,63 \text{ €}}{96,08 \text{ €}} = 34,16 \approx \mathbf{35 \text{ palas}}$$



10. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El pádel se encuentra en una fase de notable expansión a nivel internacional, consolidándose como uno de los deportes con mayor crecimiento en los últimos años. Esta evolución impone a las empresas del sector deportivo un exigente ritmo de innovación tecnológica continua, especialmente en el diseño y fabricación del equipamiento técnico. En este contexto, las palas de pádel representan aún un campo fértil para la mejora funcional, estructural y material, con un amplio margen para la implementación de tecnologías emergentes.

El presente Trabajo de Fin de Grado ha permitido desarrollar de forma integral una pala de pádel destinada al ámbito profesional, implementando los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación en Ingeniería de Tecnologías Industriales. El proceso metodológico ha incluido un análisis detallado del mercado, la selección técnica de materiales de altas prestaciones, el diseño tridimensional asistido por ordenador tanto de la pala como de su molde de fabricación, y la validación estructural mediante análisis de elementos finitos.

La solución propuesta en el presente trabajo se caracteriza por la utilización optimizada de materiales compuestos avanzados, entre los cuales destacan la fibra de carbono y el grafeno. La selección de dichos materiales no ha sido arbitraria, sino que responde a un riguroso estudio técnico que ha considerado parámetros fundamentales como las propiedades mecánicas, químicas y procesos de obtención de diversos materiales. Este análisis ha permitido identificar los compuestos más idóneos para satisfacer los requerimientos funcionales y estructurales de una pala de alto rendimiento deportivo.

Adicionalmente, se han implementado tecnologías funcionales de carácter innovador, orientadas a mejorar el comportamiento genérico del producto final. Estas tecnologías han contribuido significativamente a optimizar la respuesta del material ante el impacto, incrementando la ligereza, el control y la eficiencia en la transmisión de esfuerzos, aspectos esenciales en el contexto de uso deportivo de este tipo de equipamiento.

En cuanto al diseño del molde, este ha sido concebido desde una perspectiva industrial, con el objetivo de garantizar una óptima precisión geométrica, atendiendo a la eficiencia del proceso de fabricación y la sostenibilidad del sistema productivo. Paralelamente, se han tenido en cuenta criterios operativos como la facilidad y ergonomía durante el montaje, la calidad de los acabados superficiales y el estricto cumplimiento de tolerancias dimensionales, factores que resultan determinantes para asegurar una elevada repetibilidad y consistencia en los procesos de producción en serie.



Desde el punto de vista económico, el análisis de viabilidad ha revelado que, si bien la inversión inicial asociada a la fabricación de una unidad es considerable, especialmente debido al elevado coste del mecanizado del molde, condicionado por sus exigencias técnicas, dicho molde ha sido diseñado para ser integrado en una línea de producción continua y eficiente.

Del cálculo de amortización, se obtiene un valor aproximado de 35 palas de pádel vendidas para rentabilizar la inversión, lo cual es un resultado realista y posible, reforzando de esta manera la viabilidad económica del proyecto. En definitiva, la propuesta satisface los requisitos actuales del sector en términos de calidad, durabilidad, incorporación tecnológica y competitividad en el mercado.

En conjunto, este trabajo demuestra la aplicabilidad real de la ingeniería industrial en el desarrollo de productos de alto valor añadido en el sector del deporte profesional.

Como proyección futura del trabajo desarrollado, se plantean las siguientes líneas de investigación y mejora:

- **Profundización en la simulación estructural multicapa:** Emplear software de simulación avanzada que permita modelar el comportamiento independiente de cada capa del laminado compuesto, asignando propiedades específicas por capa. Esto permitirá analizar de manera más realista la interacción interna del sistema multicapa ante cargas dinámicas.
- **Investigación en materiales sostenibles y reciclabilidad:** Explorar materiales alternativos de origen biológico o reciclado con bajo impacto ambiental como sustitutos de los materiales actuales. Paralelamente, definir estrategias de reciclaje y reaprovechamiento al final del ciclo de vida útil de la pala.
- **Validación comparativa experimental de materiales:** Diseñar ensayos controlados de impacto para evaluar el comportamiento real de distintos compuestos estructurales frente a sollicitaciones dinámicas propias del juego, complementando los datos obtenidos por simulación numérica.
- **Prototipado funcional y validación experimental:** Fabricación física del modelo propuesto, seguido de su validación mediante ensayos estructurales, de durabilidad y de comportamiento en juego, permitiendo contrastar con precisión la correlación entre el modelo teórico y el desempeño real del producto.



PLANOS

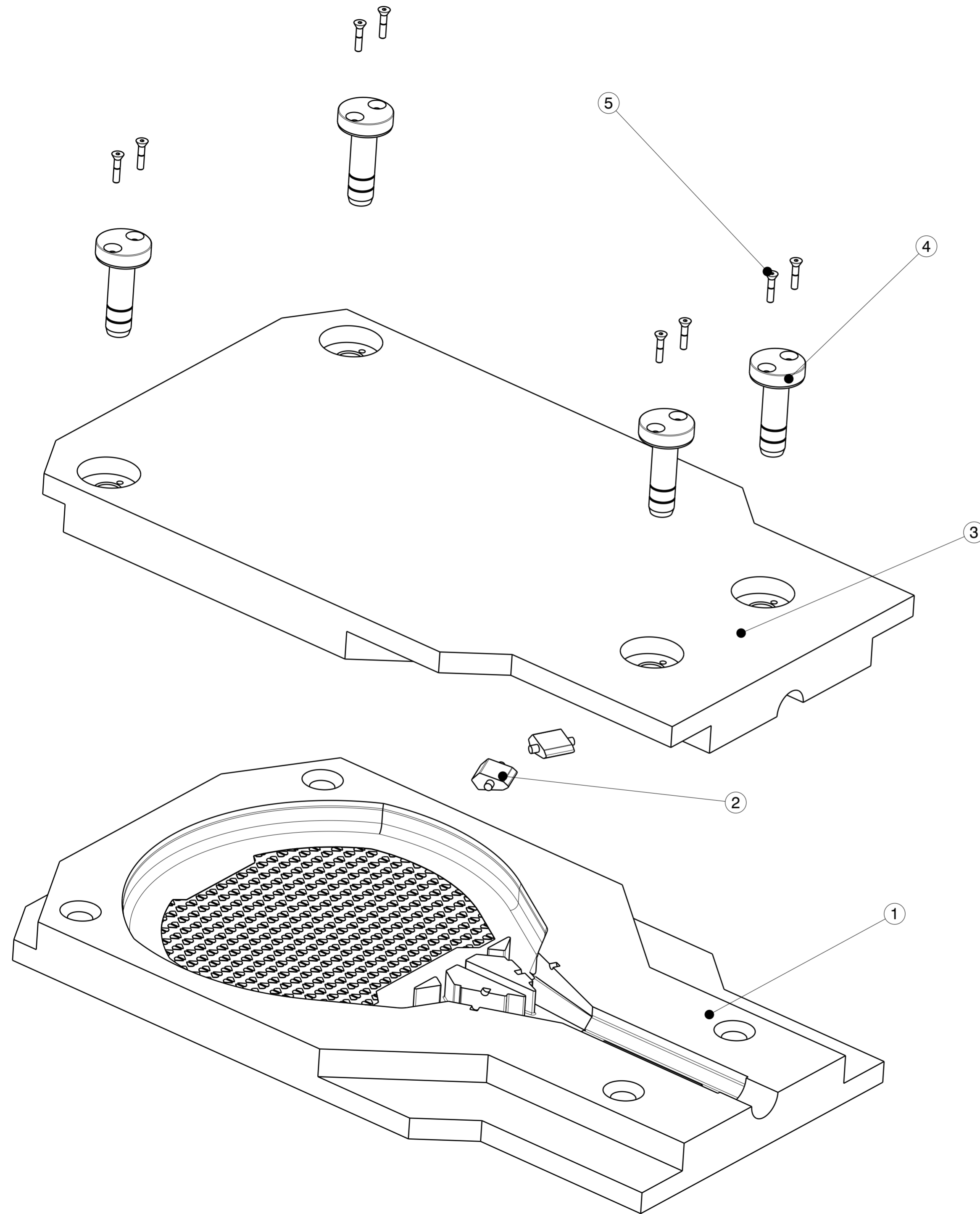
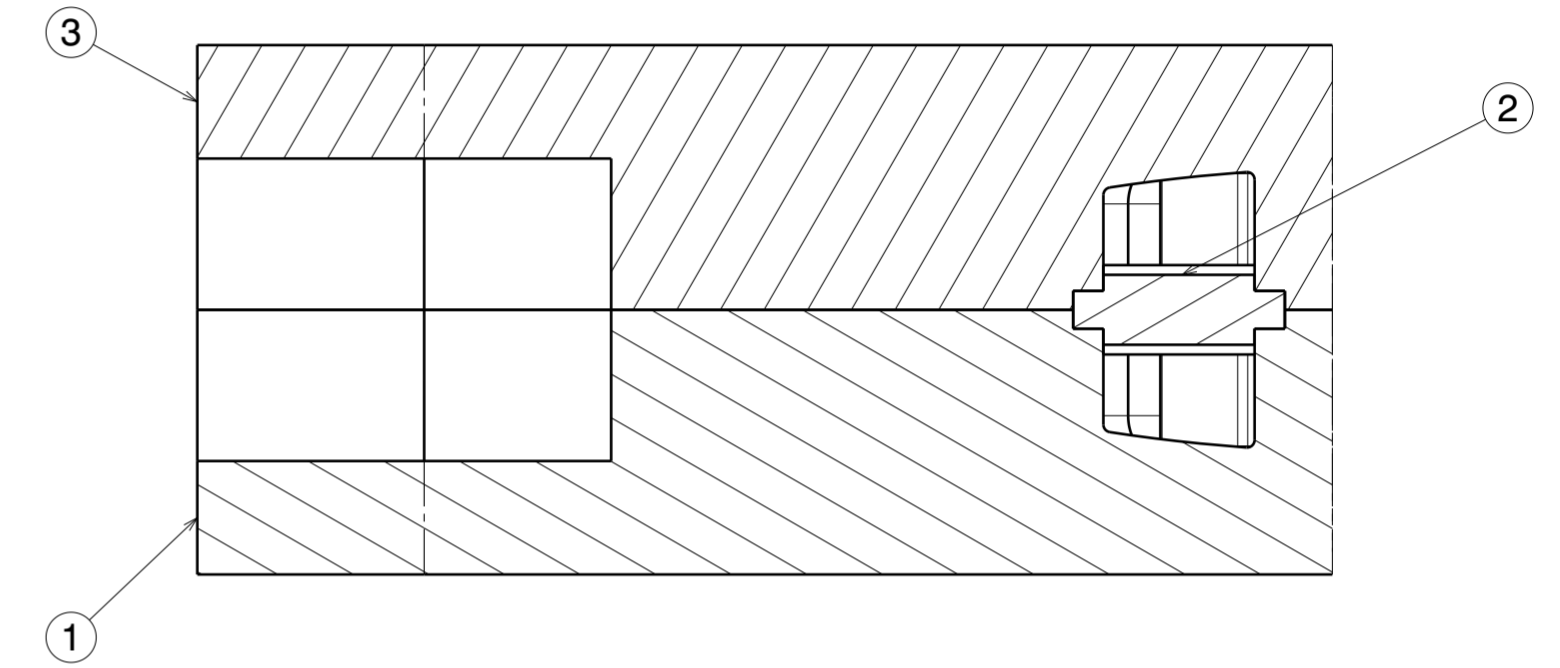
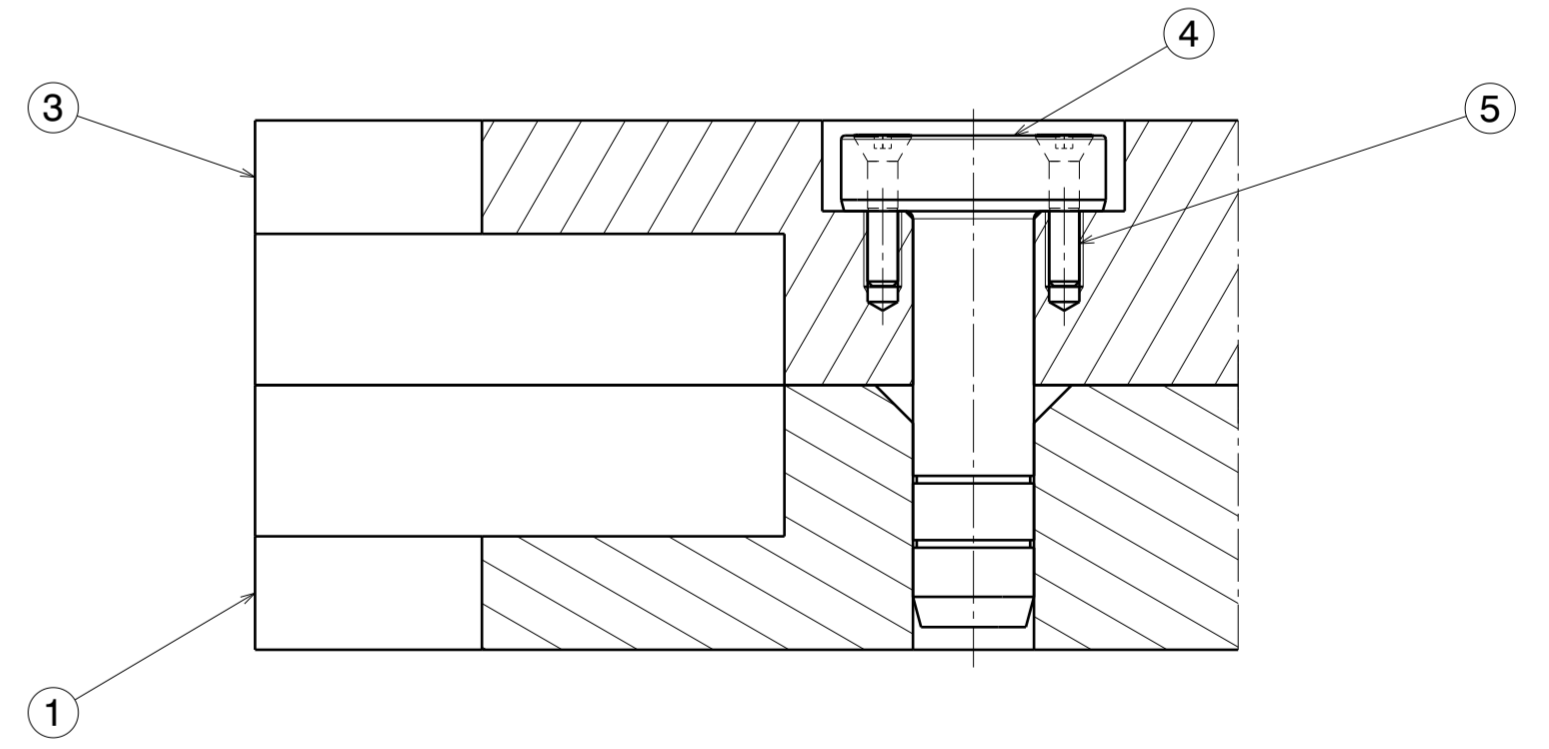


Tabla de Elementos: Molde de Fabricación			
Marca	Denominación	Cantidad	Material
1	Placa Inferior del Molde	1	Aluminio 7075
2	Acople para Aberturas Laterales	2	Aluminio 7075
3	Placa Superior del Molde	1	Aluminio 7075
4	Columna Guía	4	Aluminio 7075
5	Tornillo DIN 7991 M4x20	8	Acero Clase 8.8

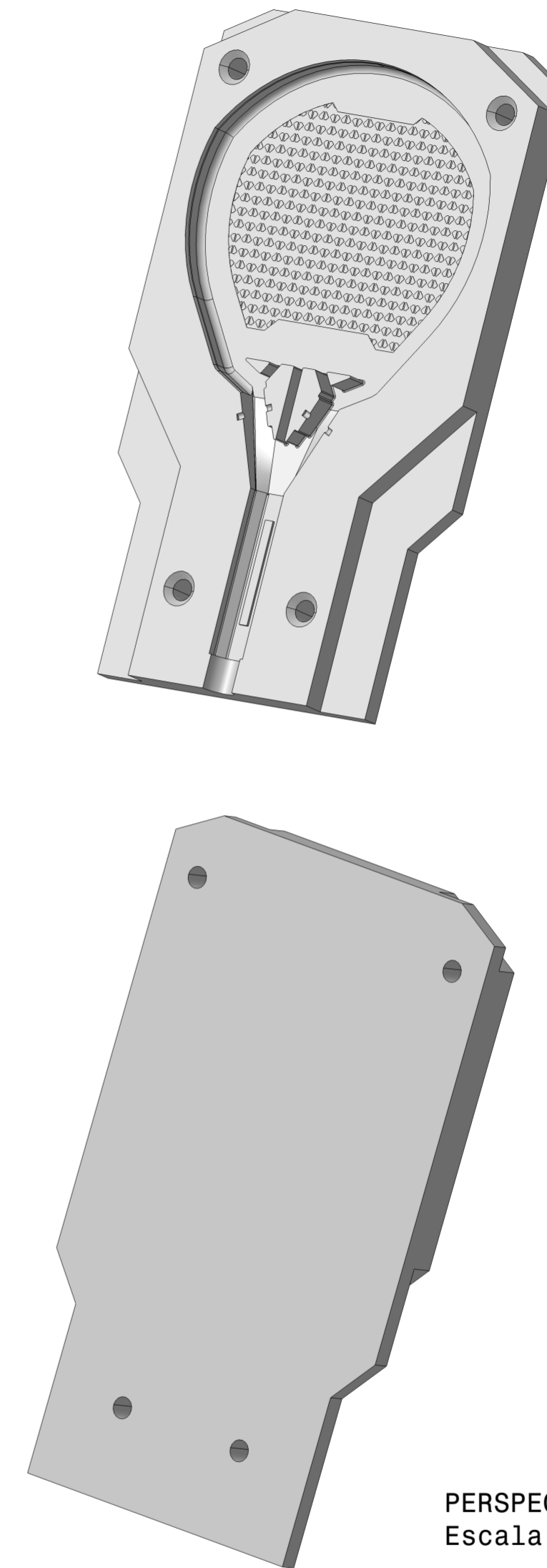
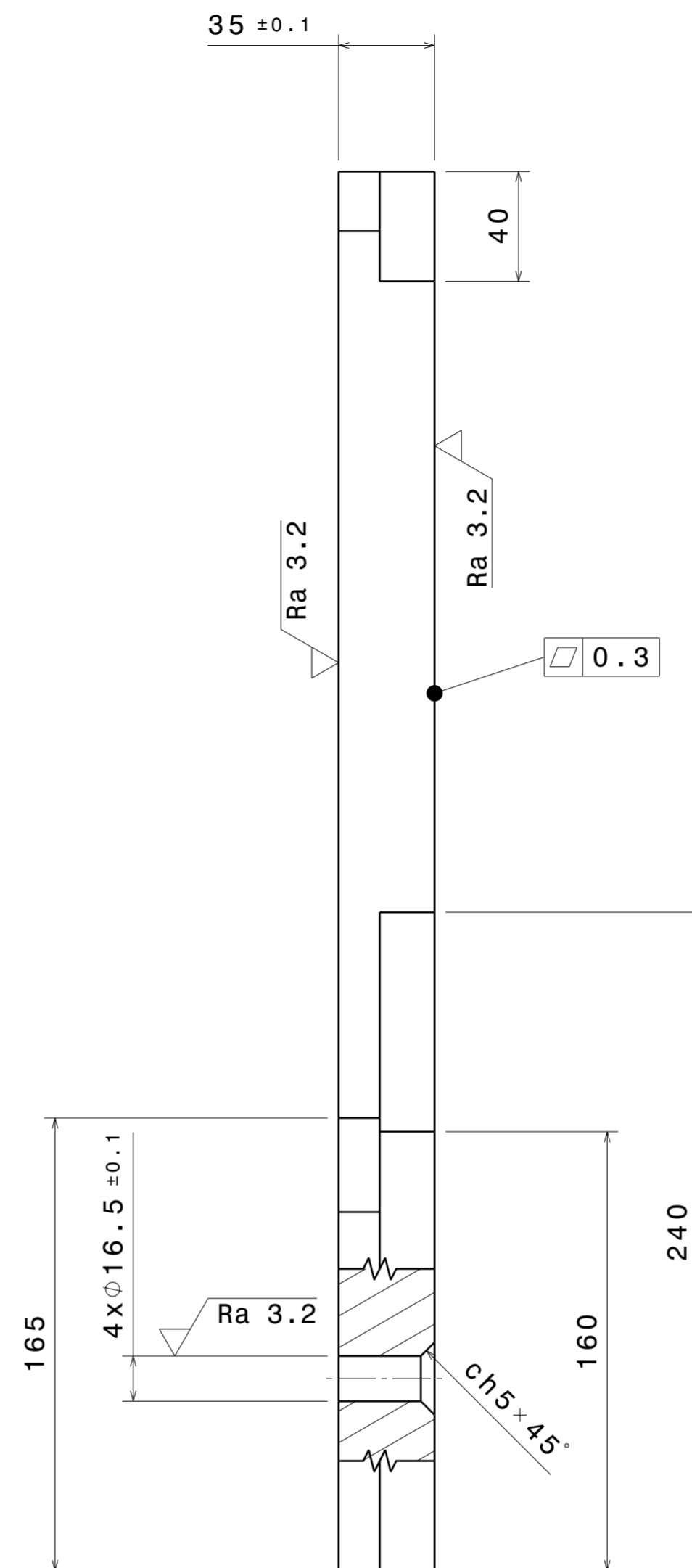
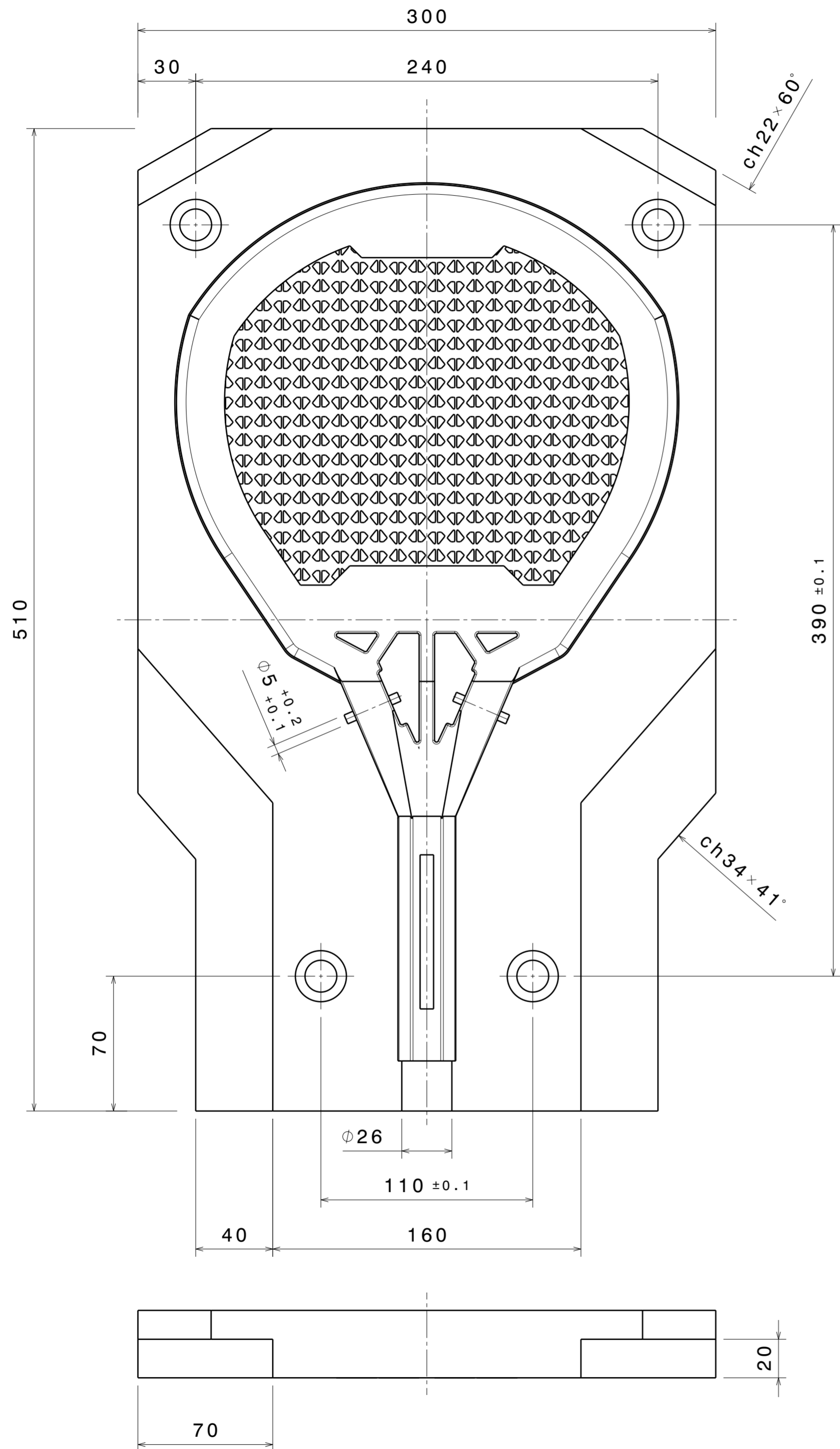
SECCIÓN DE LA UNIÓN PLACAS - ACOPLE
Escala: 1:1



SECCIÓN DE LA UNIÓN PLACAS - COLUMNA GUÍA
Escala: 1:1

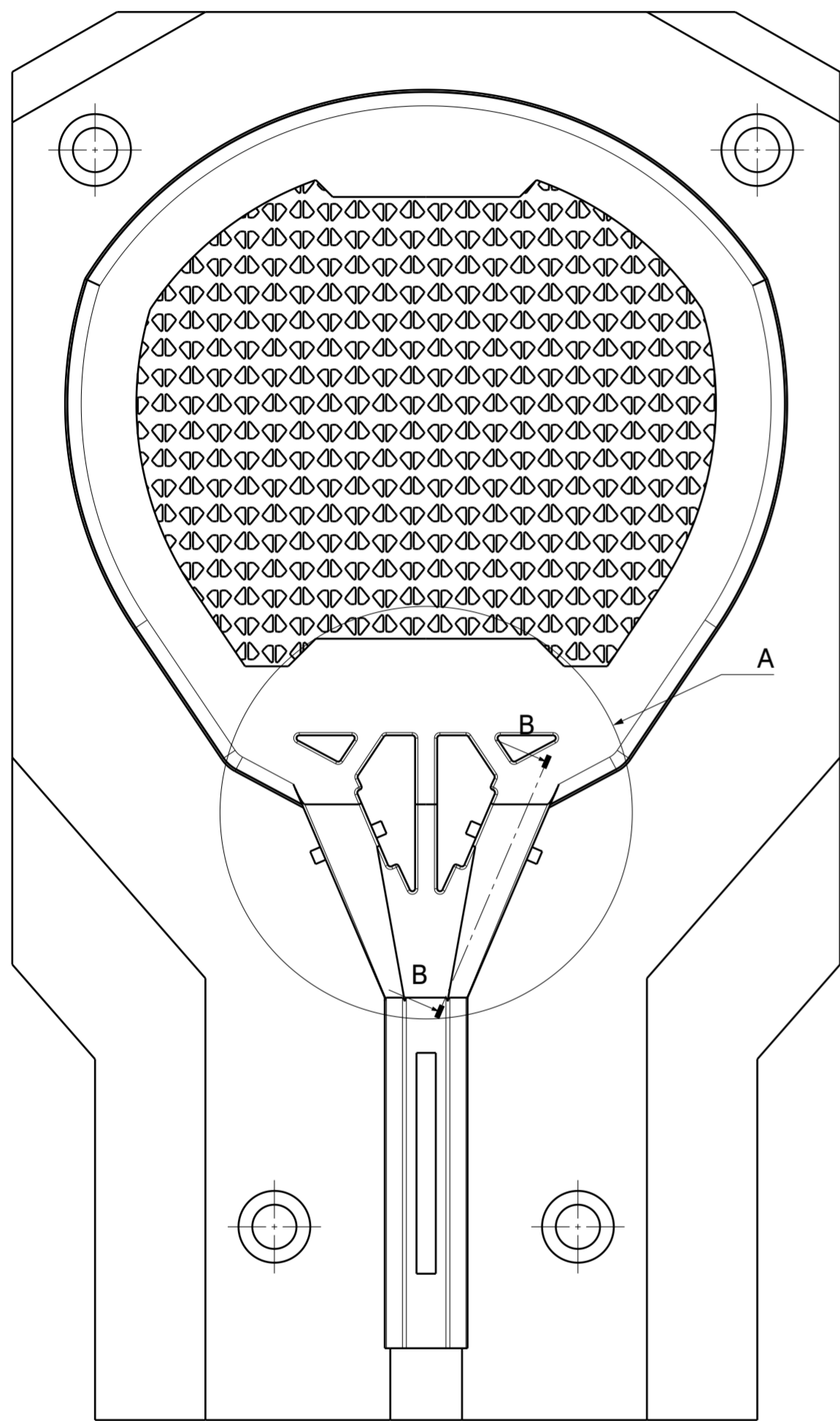


Universidad de Valladolid		DESIGNACIÓN	
Escuela de Ingenierías Industriales		MOLDE DE FABRICACIÓN	
 		PLANO	
AUTOR		EXPLOSIONADO DEL CONJUNTO	
M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA	Nº PLANO
FECHA		1:2	1/1
10/05/2025		FORMATO	
		A2	

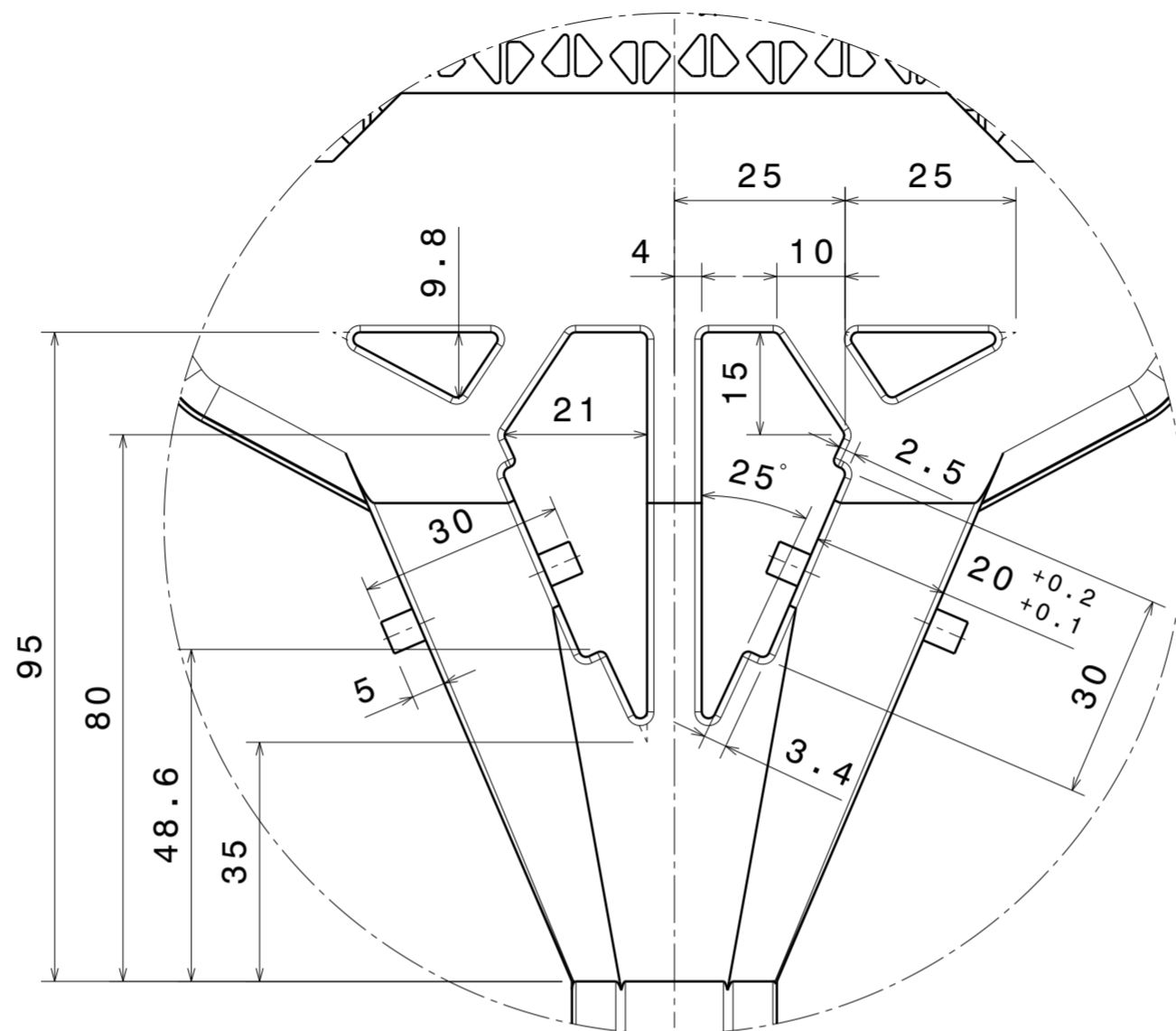


Nota: Matar todas las aristas vivas

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		PLANO PLACA INFERIOR DEL MOLDE	
FECHA 10/05/2025		ESCALA 1:2	Nº PLANO 1/3
		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	

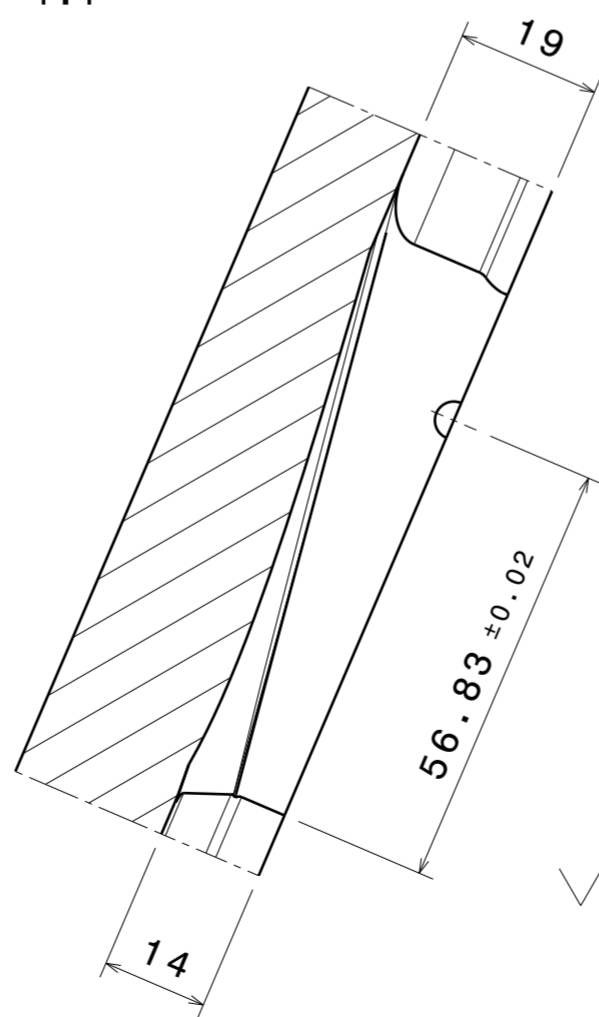


DETALLE A
Escala: 1:1

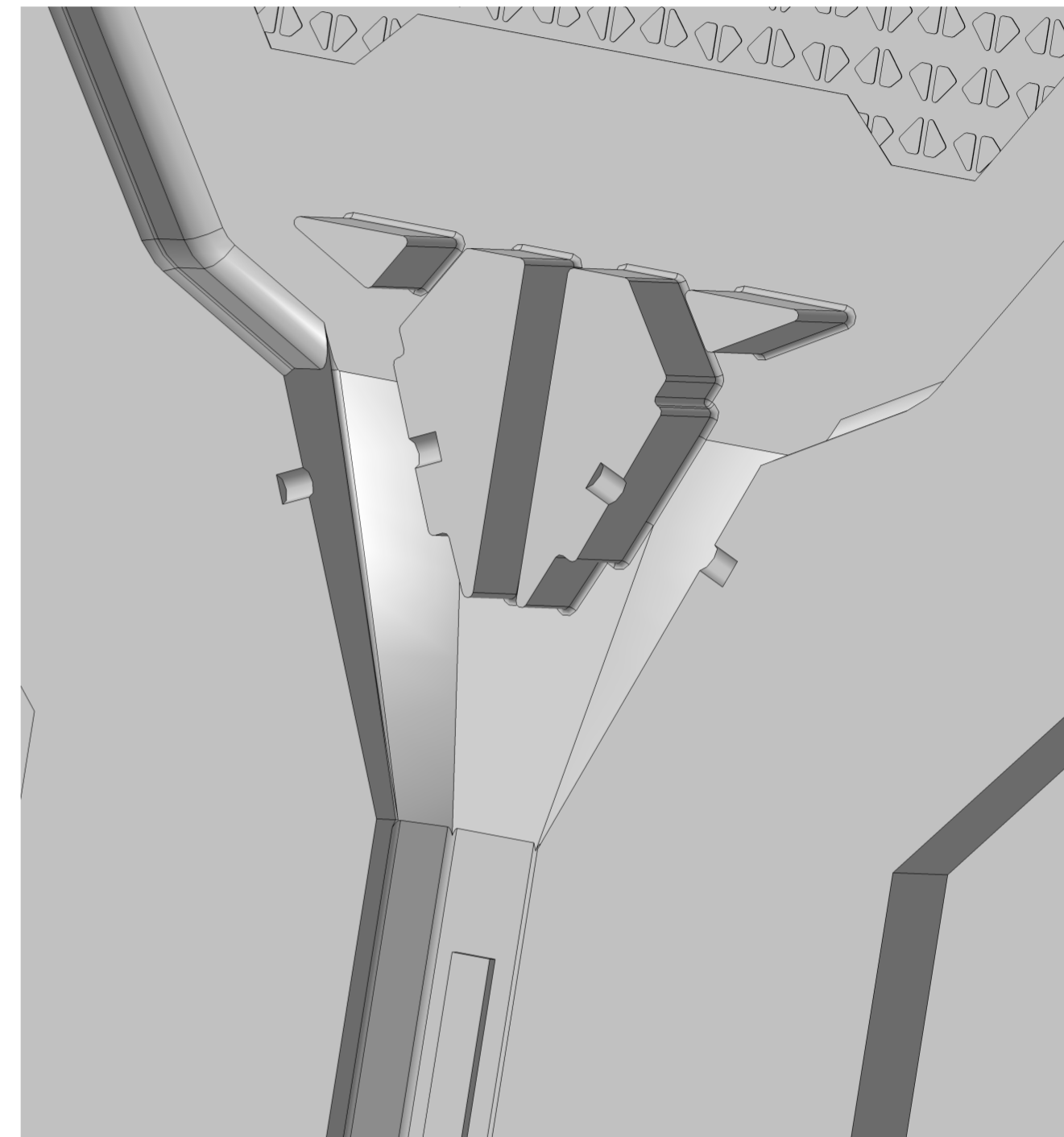


Nota: Redondeos NO Acotados R=1

SECCIÓN B
Escala: 1:1



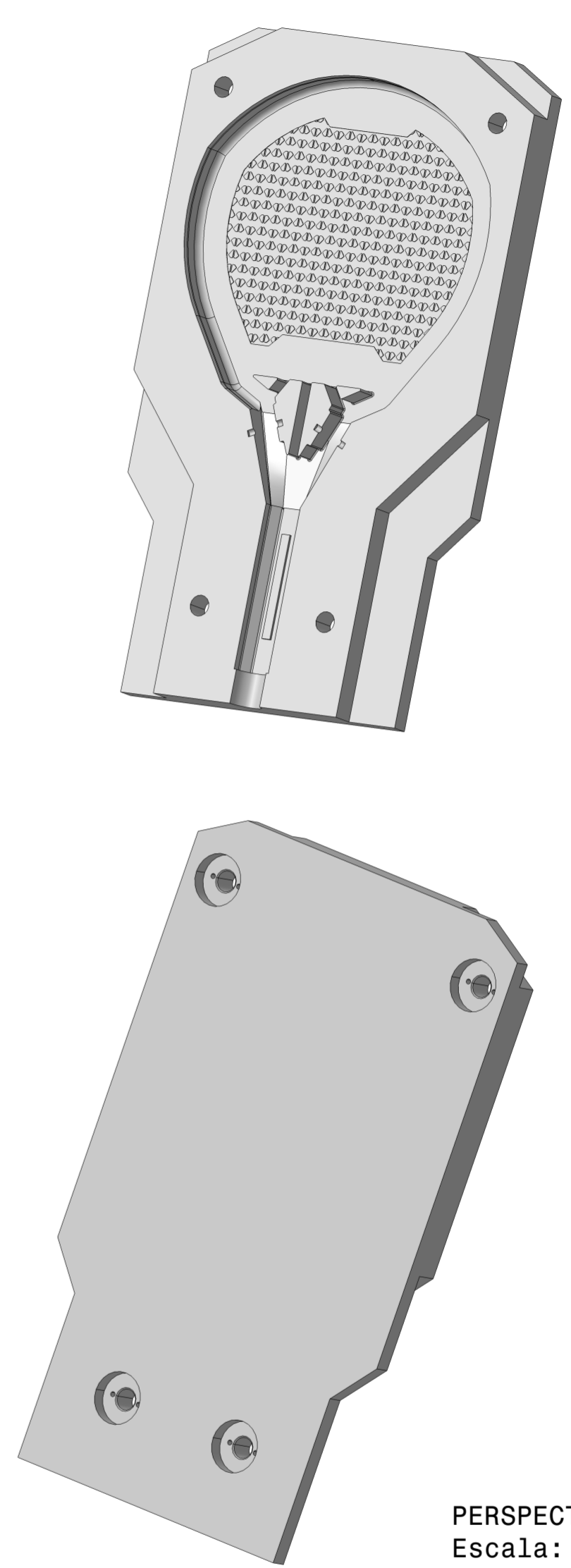
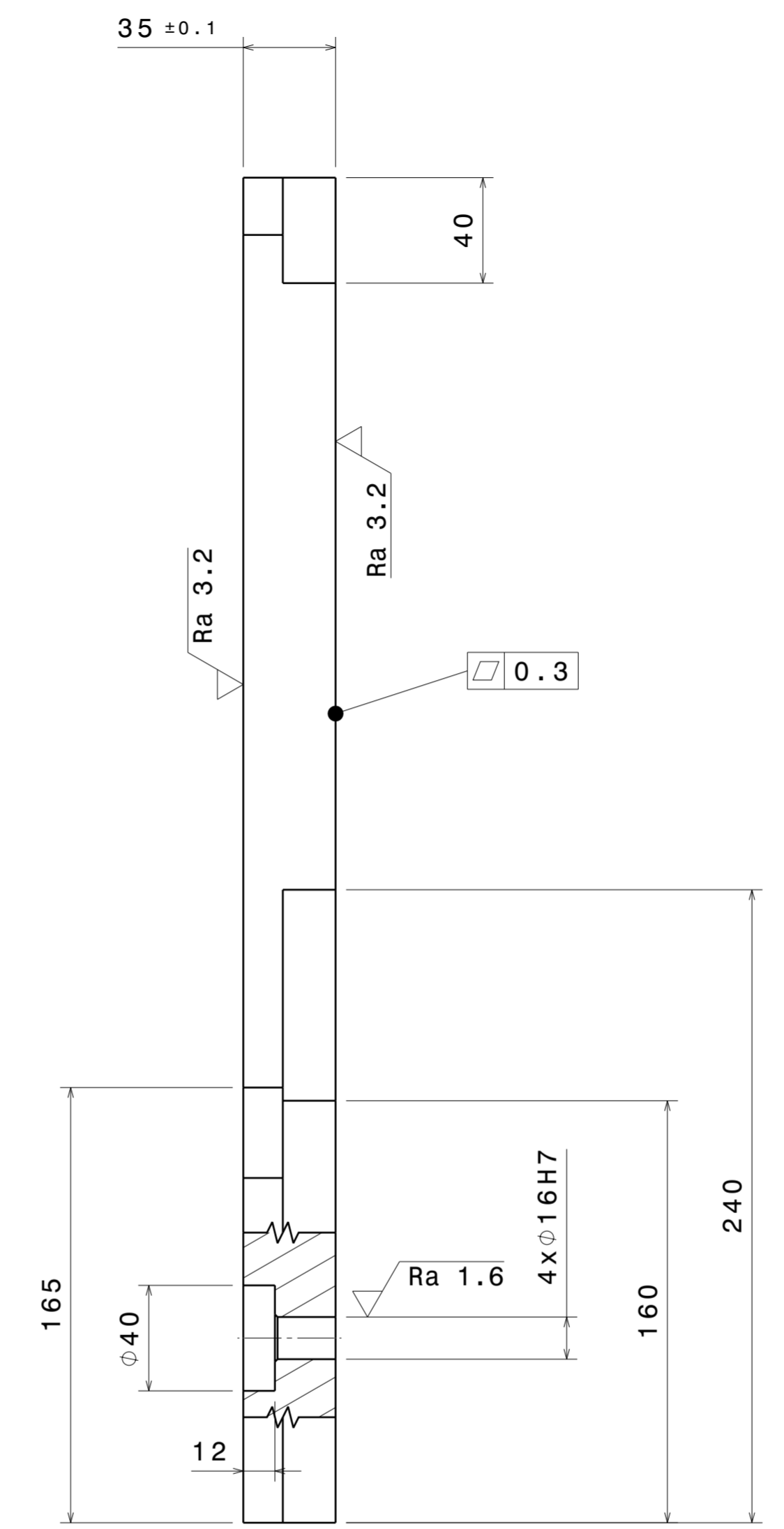
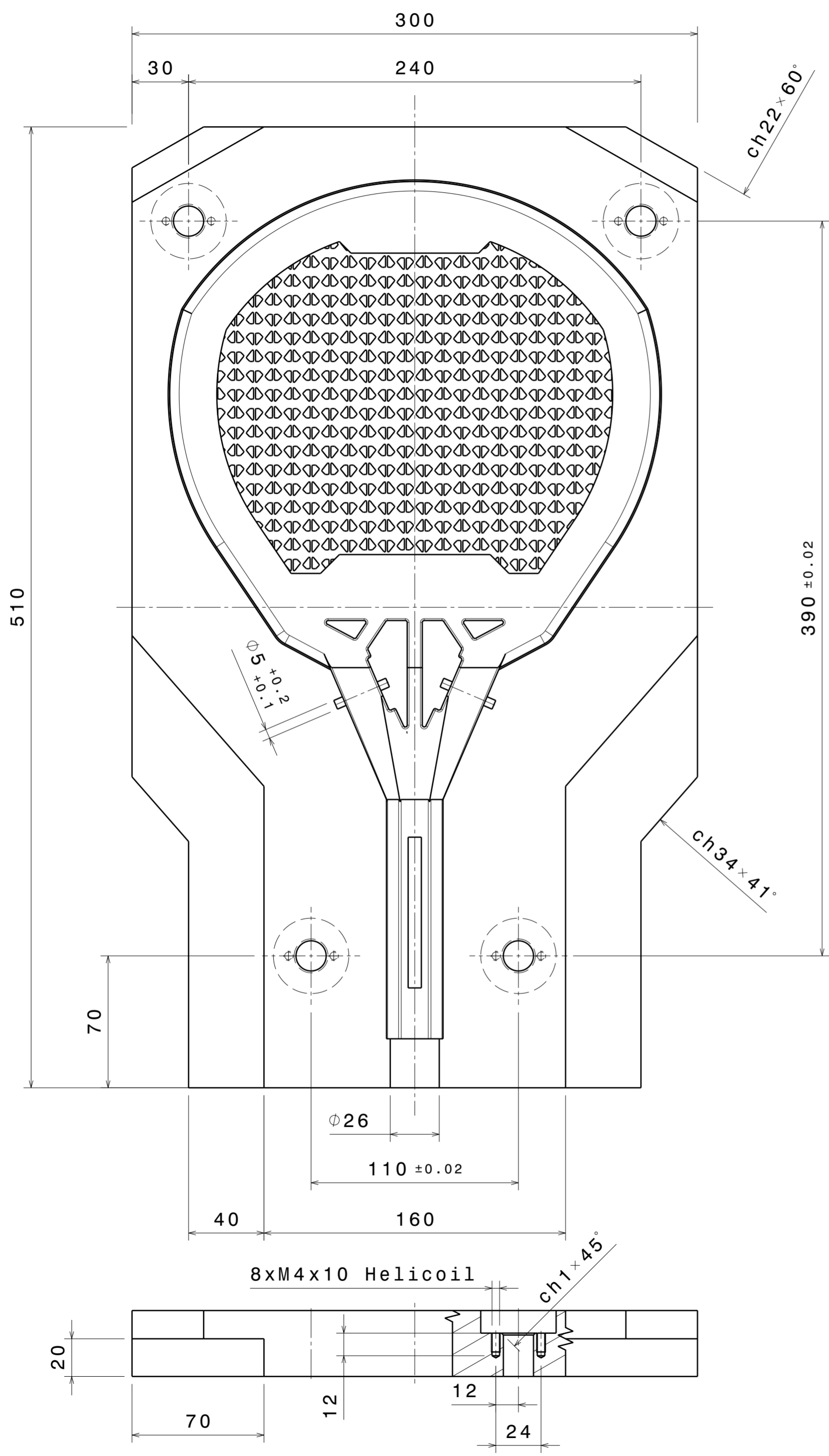
cotas indicadas
Ra 3.2



DETALLE ISOMÉTRICO
Escala: 1:1

Nota: Matar todas las aristas vivas

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		PLANO PLACA INFERIOR DEL MOLDE	
FECHA 10/05/2025		ESCALA 1:2	Nº PLANO 3/3
		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	

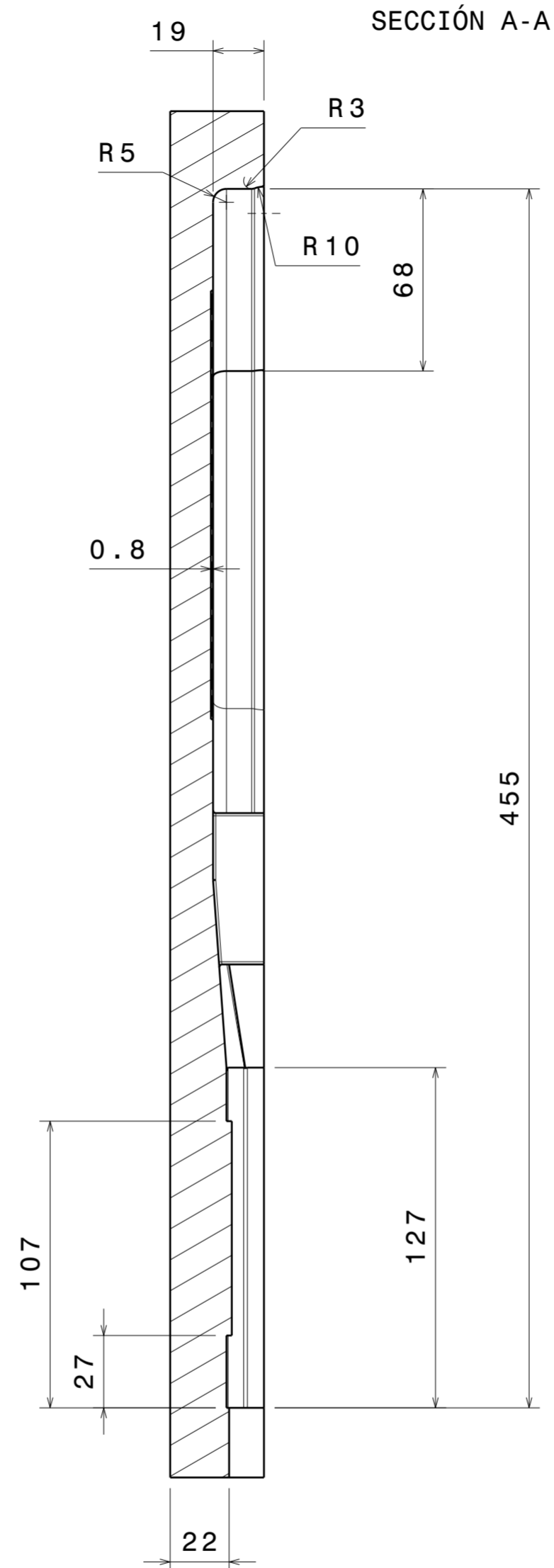
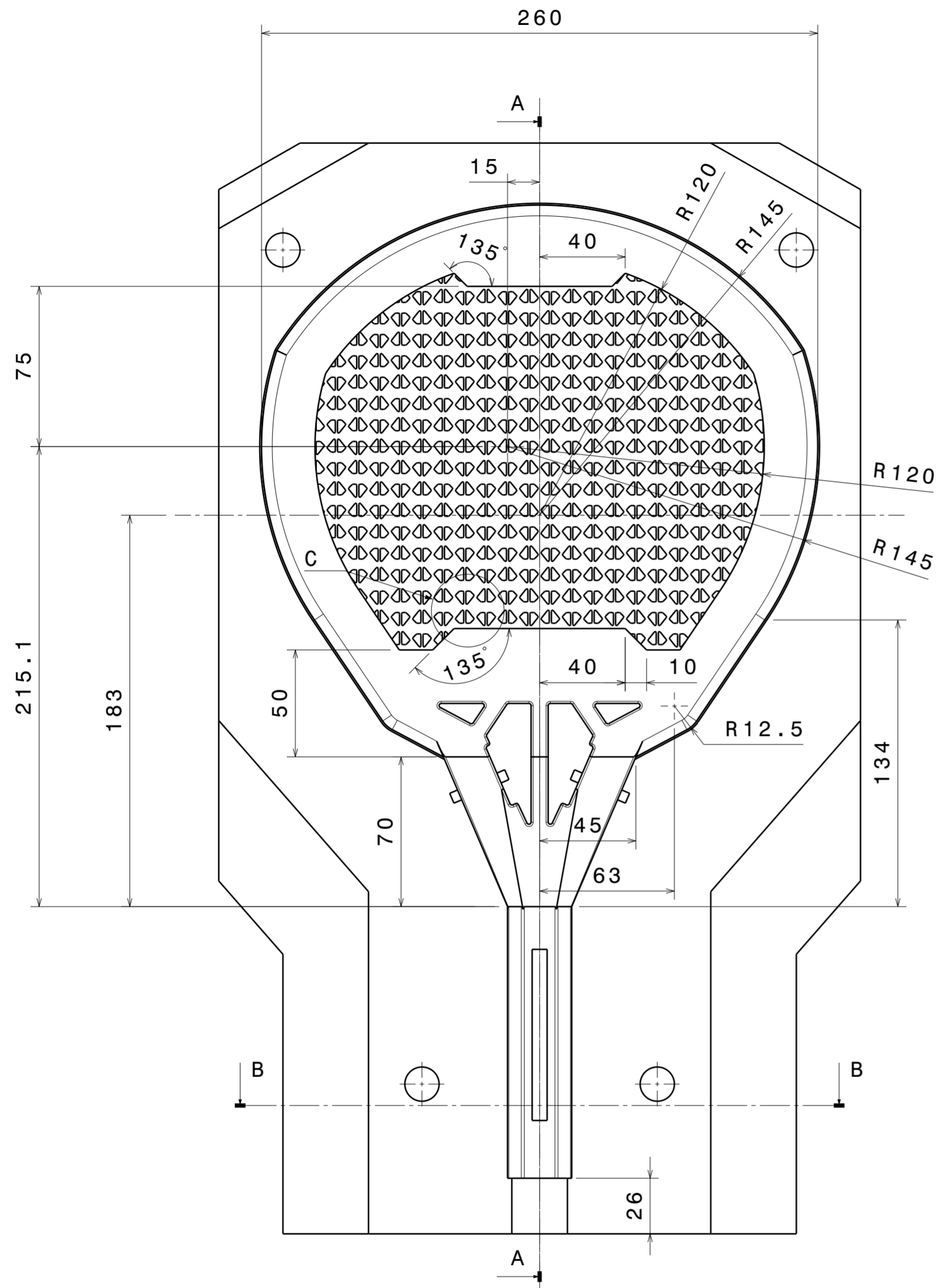


PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
Escala: 1:4

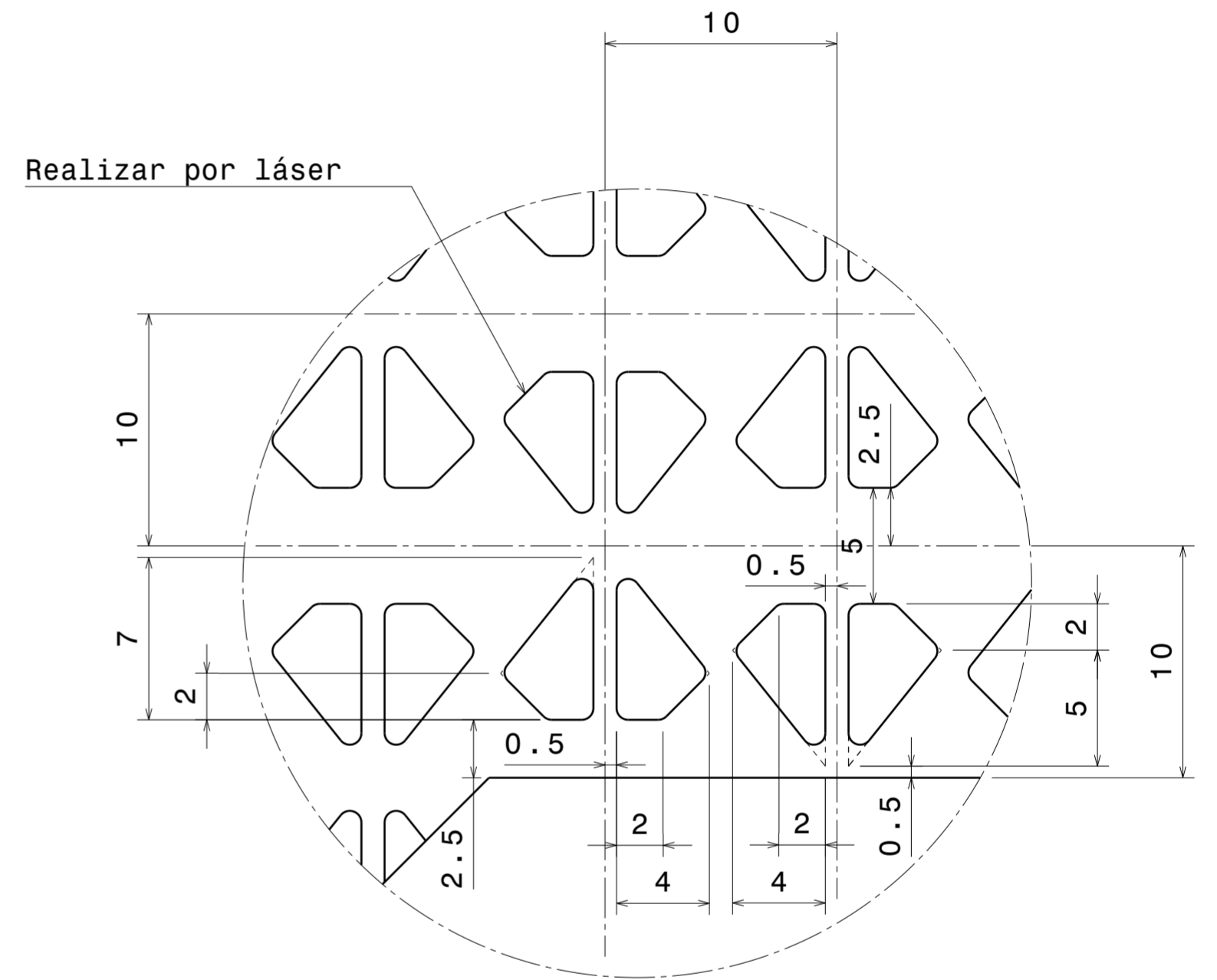
Nota: Matar todas las aristas vivas

✓ Ra 6.3 (Ra 3.2 , Ra 1.6)

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
 		PLANO PLACA SUPERIOR DEL MOLDE	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA 1:2	Nº PLANO 1/3
FECHA 10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	



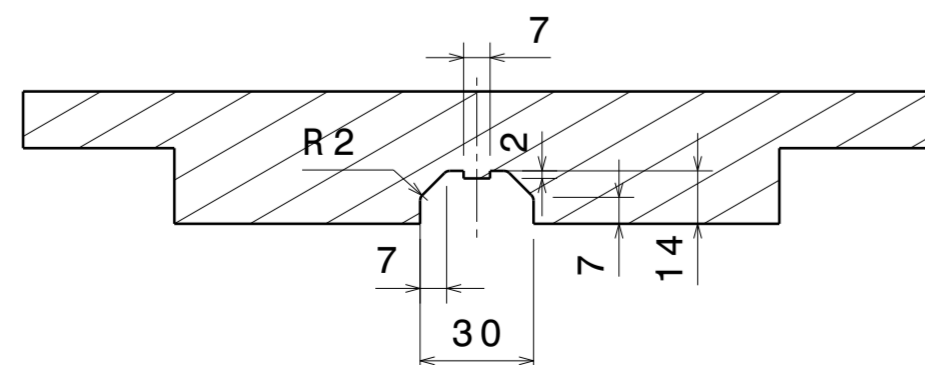
Detalle C
Escala: 4:1



Nota: Redondeos NO Acotados R=0.5

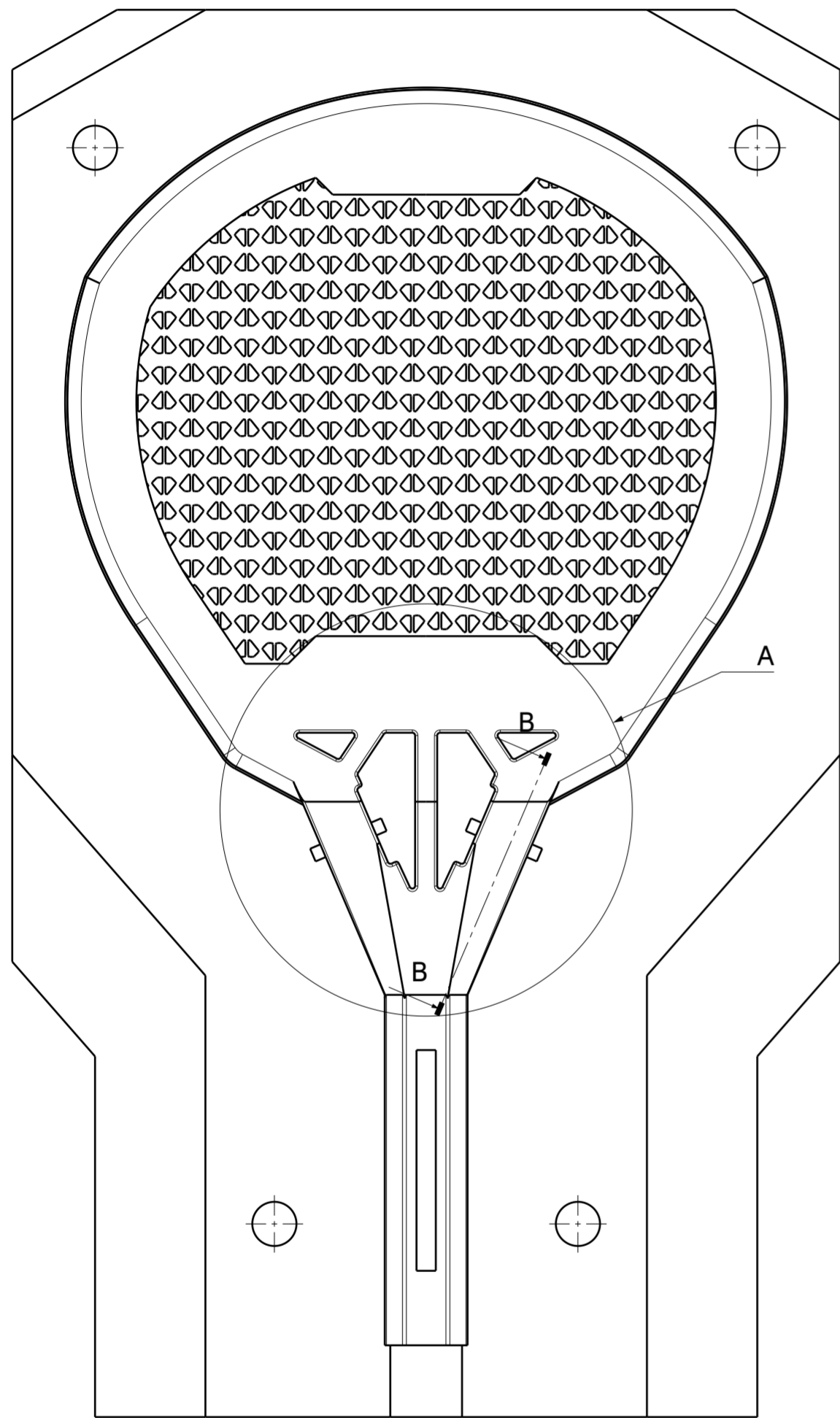
Nota: Matar todas las aristas vivas

SECCIÓN B-B

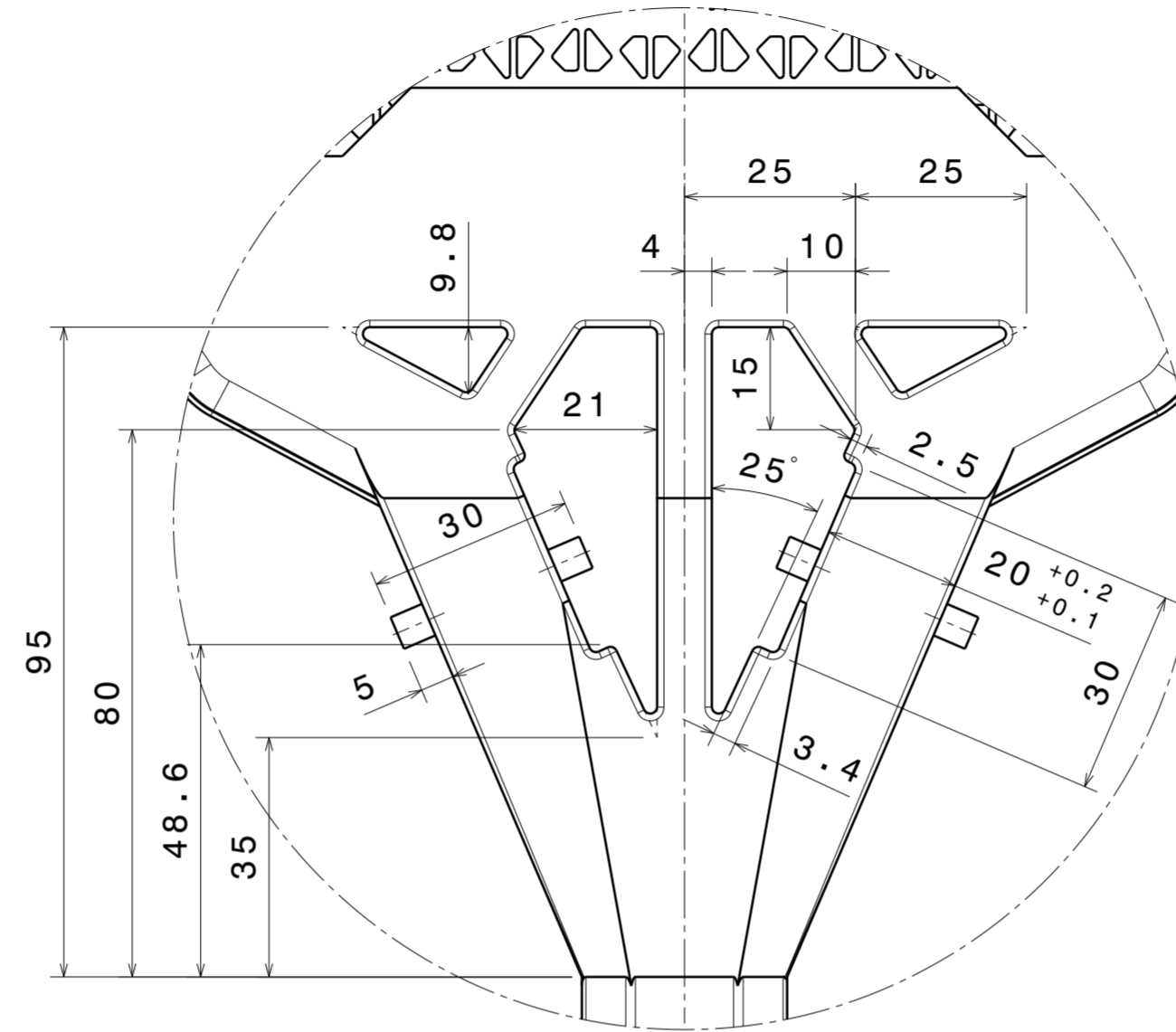


cotas indicadas
Ra 3.2

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		PLANO PLACA SUPERIOR DEL MOLDE	
FECHA 10/05/2025		ESCALA 1:2	Nº PLANO 2/3
		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	

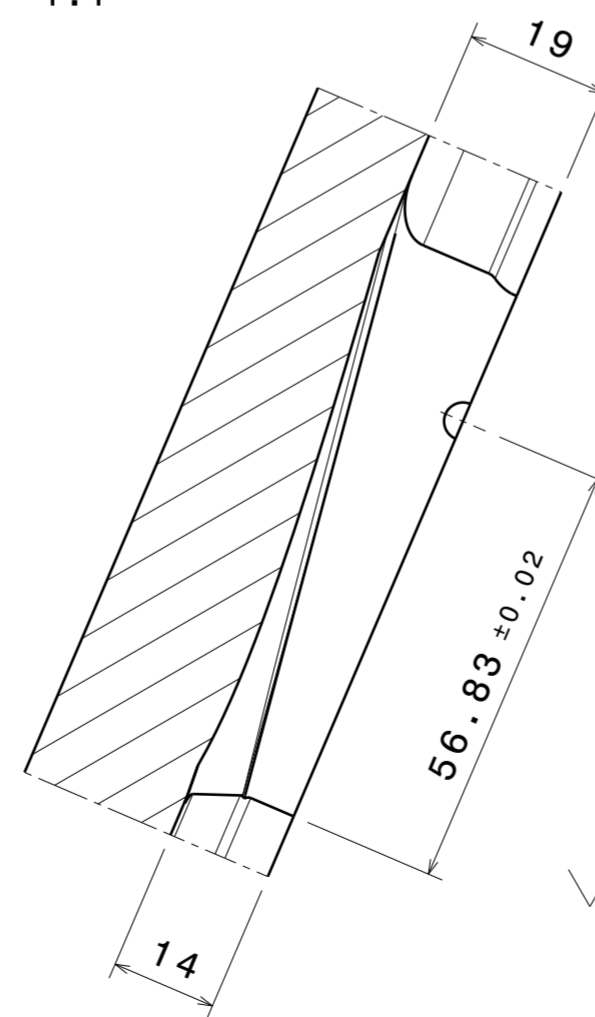


DETALLE A
Escala: 1:1

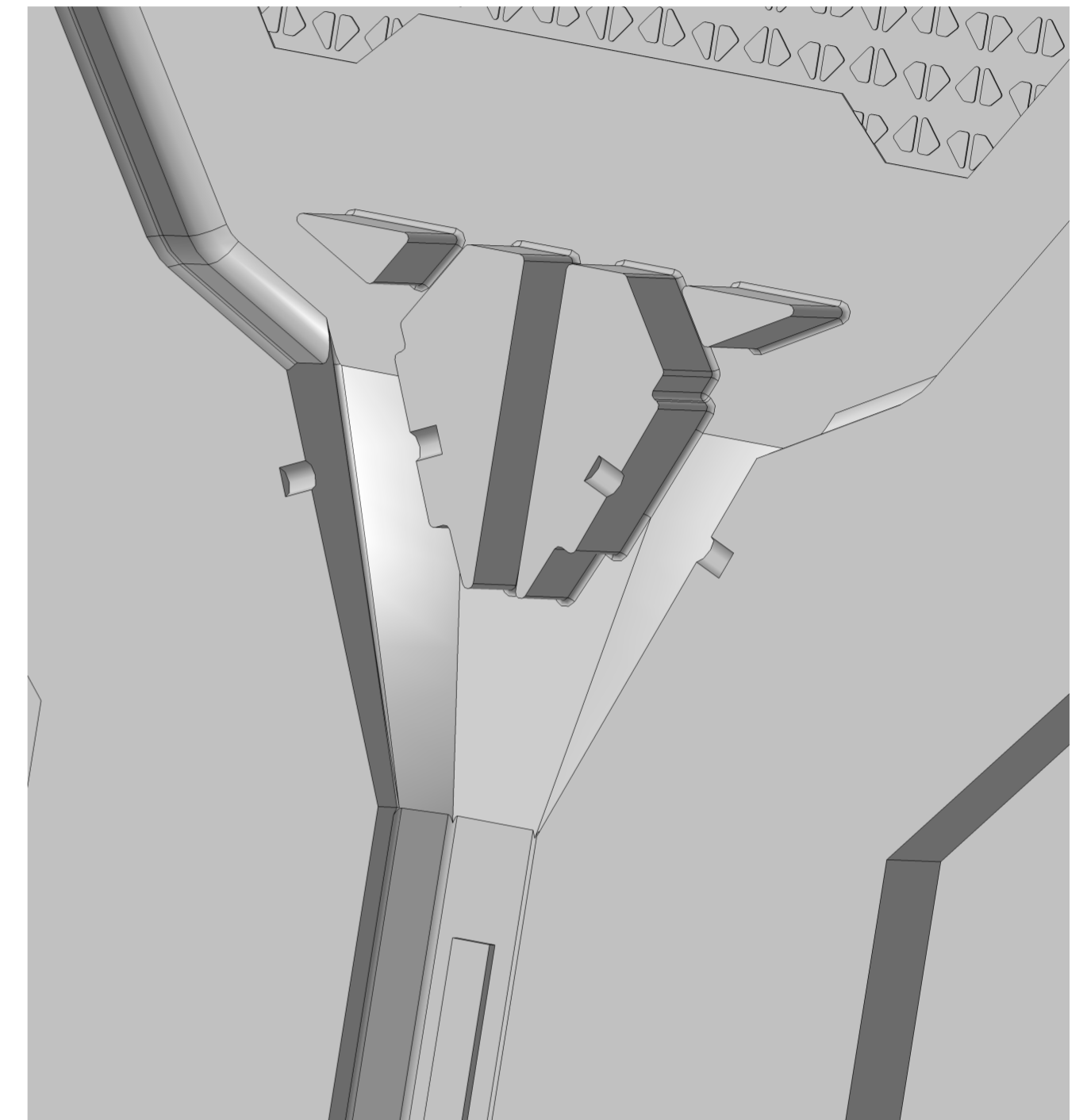


Nota: Redondeos NO Acotados R=1

SECCIÓN B
Escala: 1:1



cotas indicadas
Ra 3.2

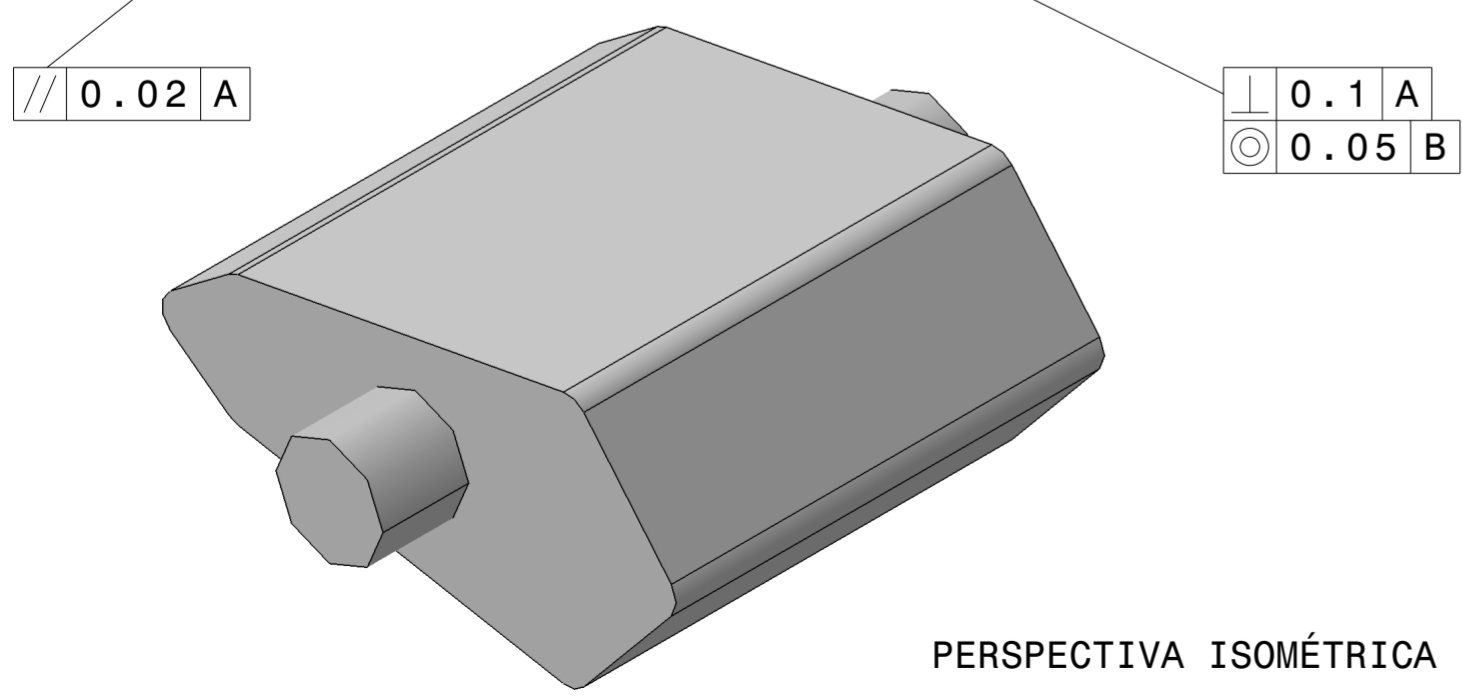
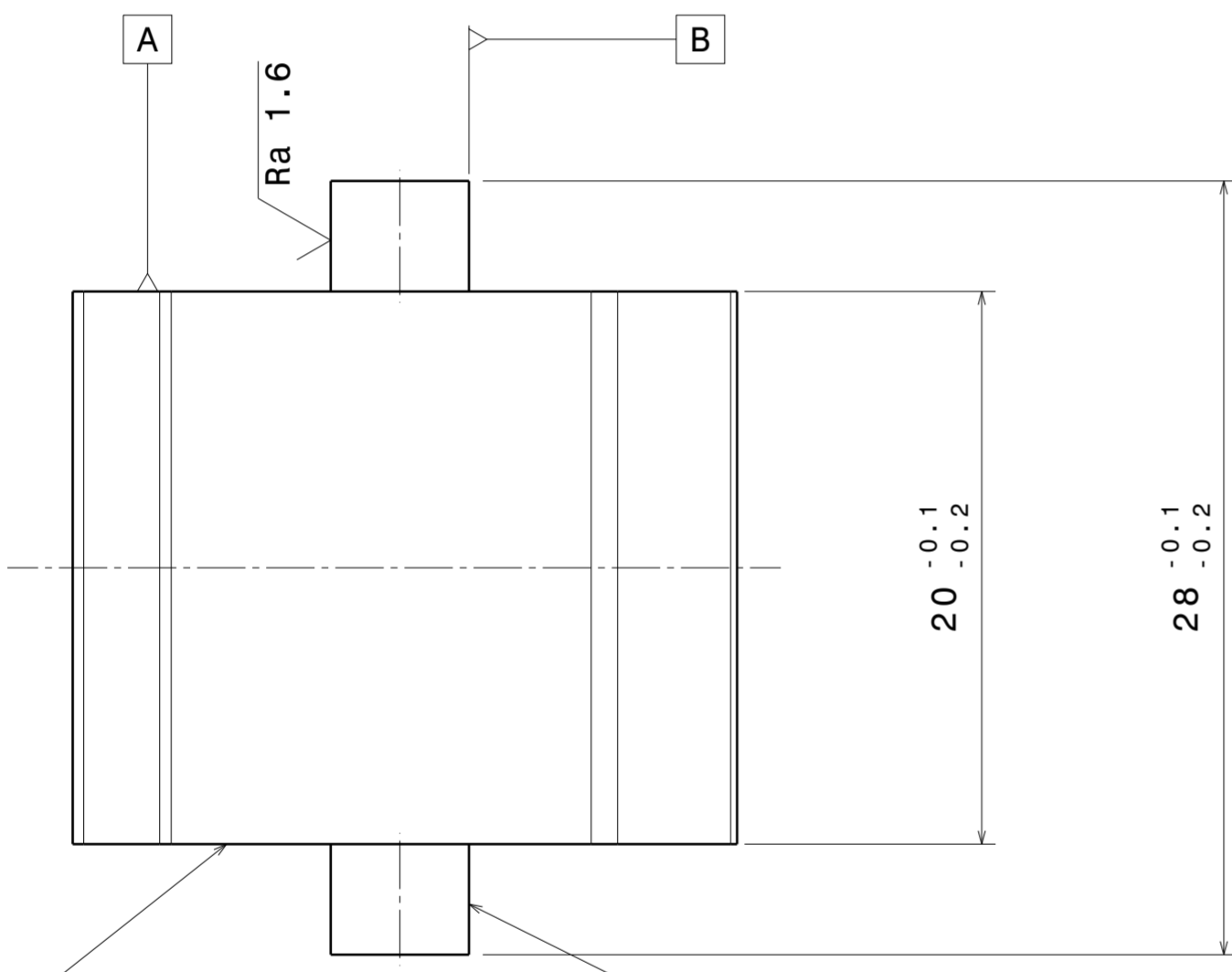
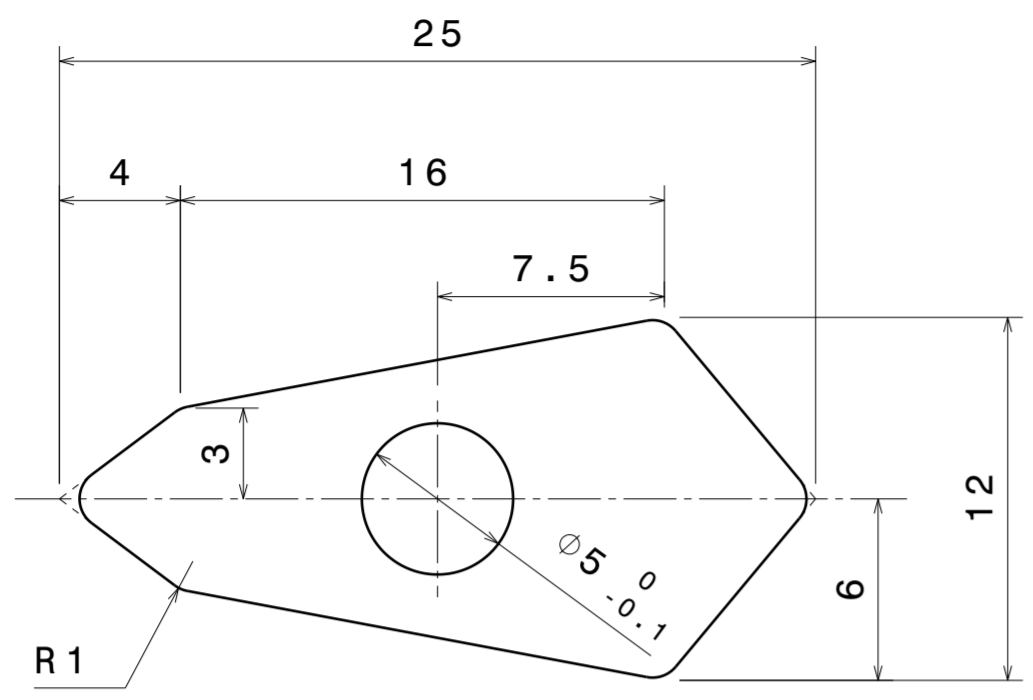


DETALLE ISOMÉTRICO
Escala: 1:1

Nota: Matar todas las aristas vivas

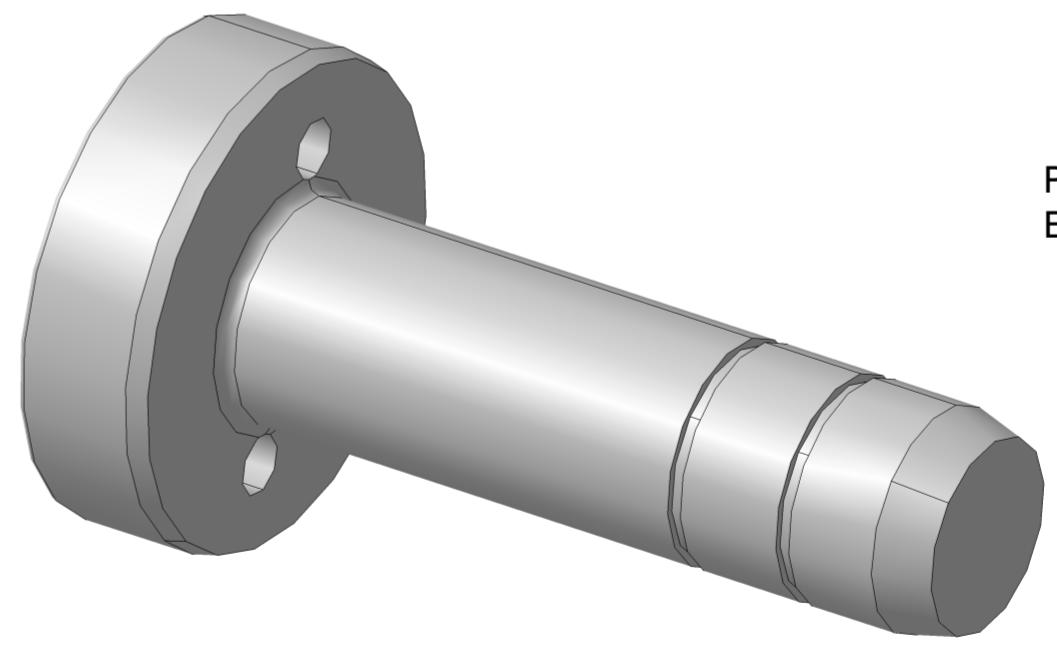
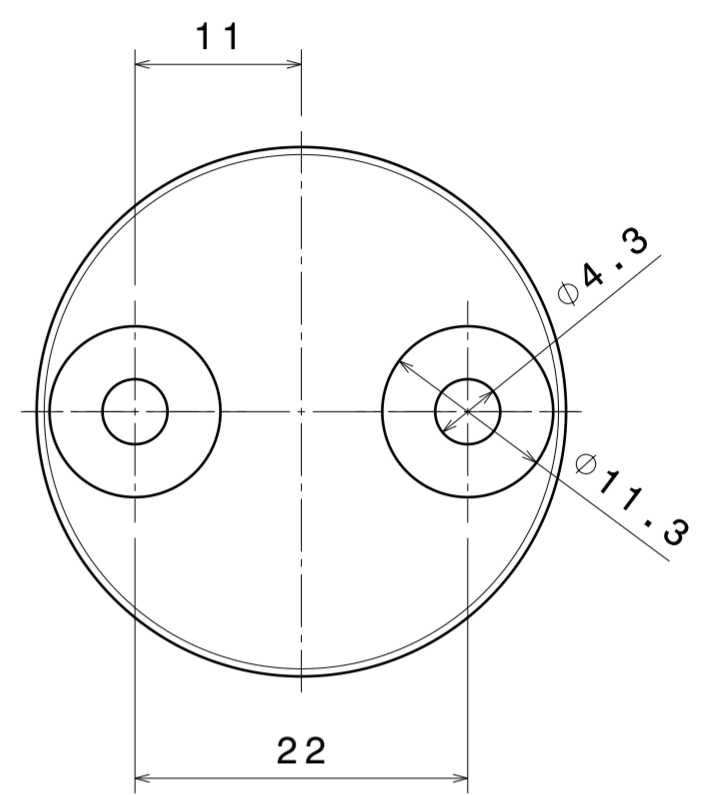
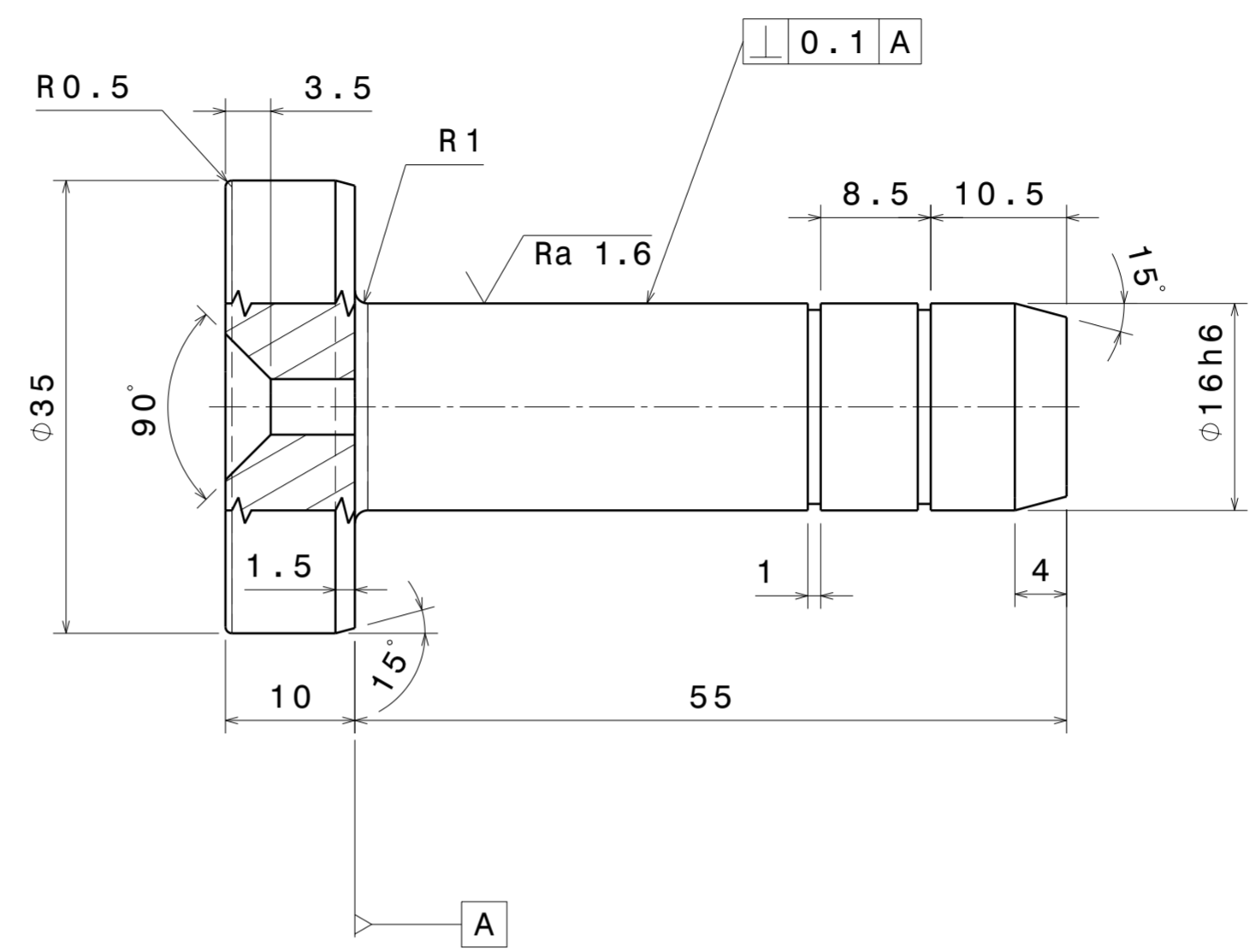
Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		PLANO PLACA SUPERIOR DEL MOLDE	
FECHA 10/05/2025		ESCALA 1:2	Nº PLANO 3/3
		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	

ACOPLE PARA ABERTURAS LATERALES
Escala: 4:1



PERSPECTIVA ISOMÉTRICA

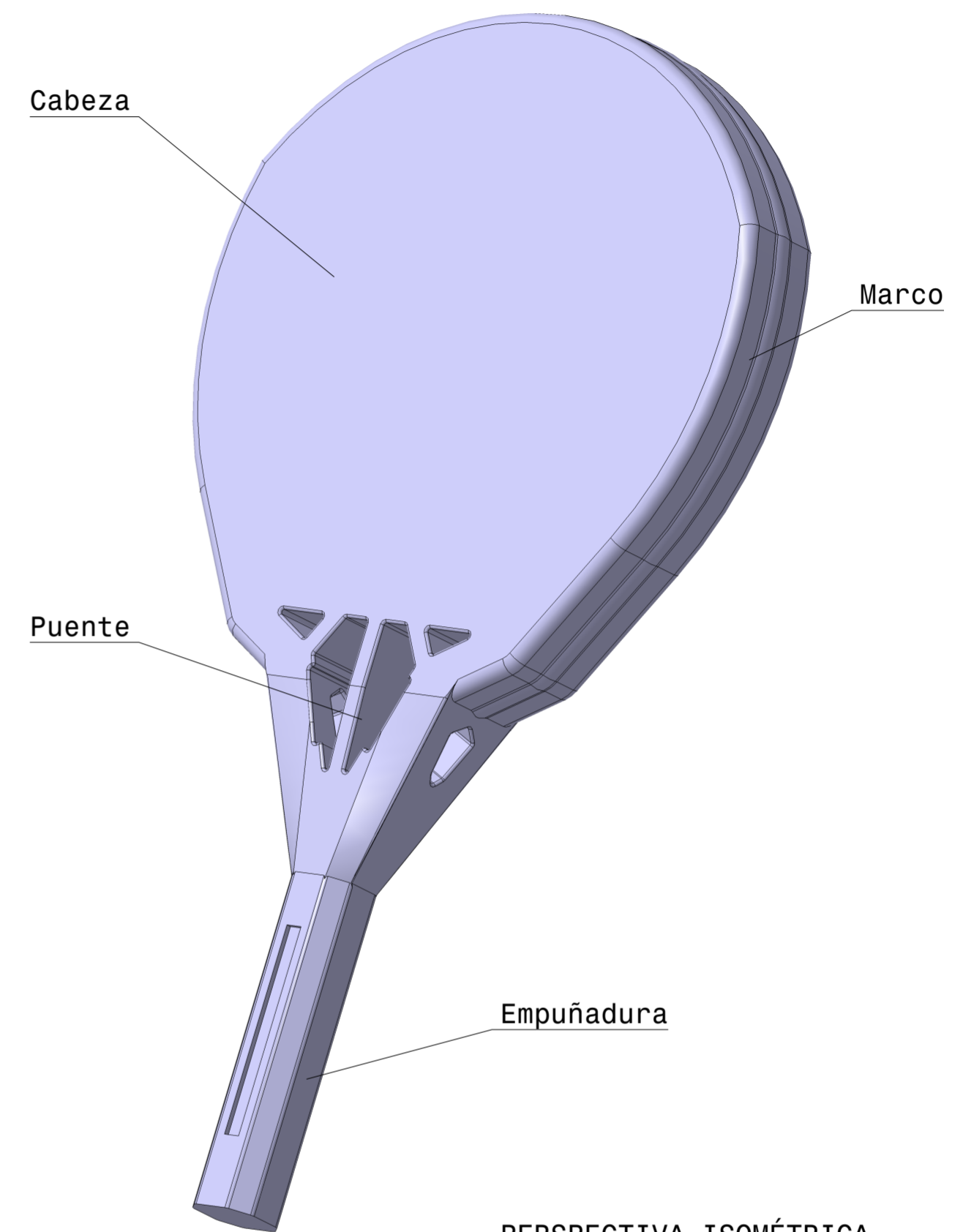
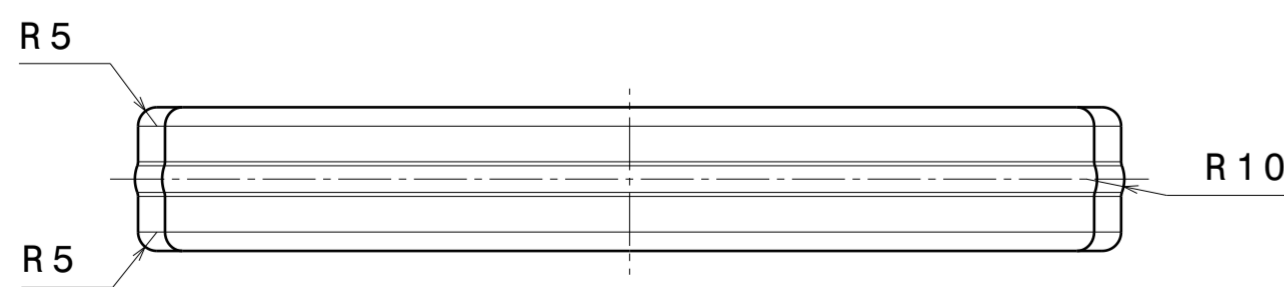
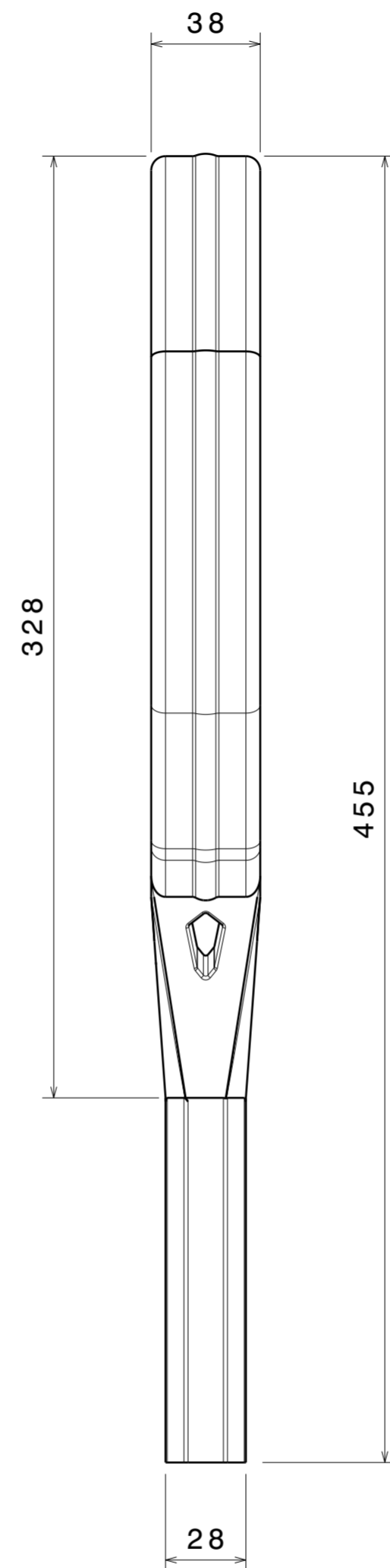
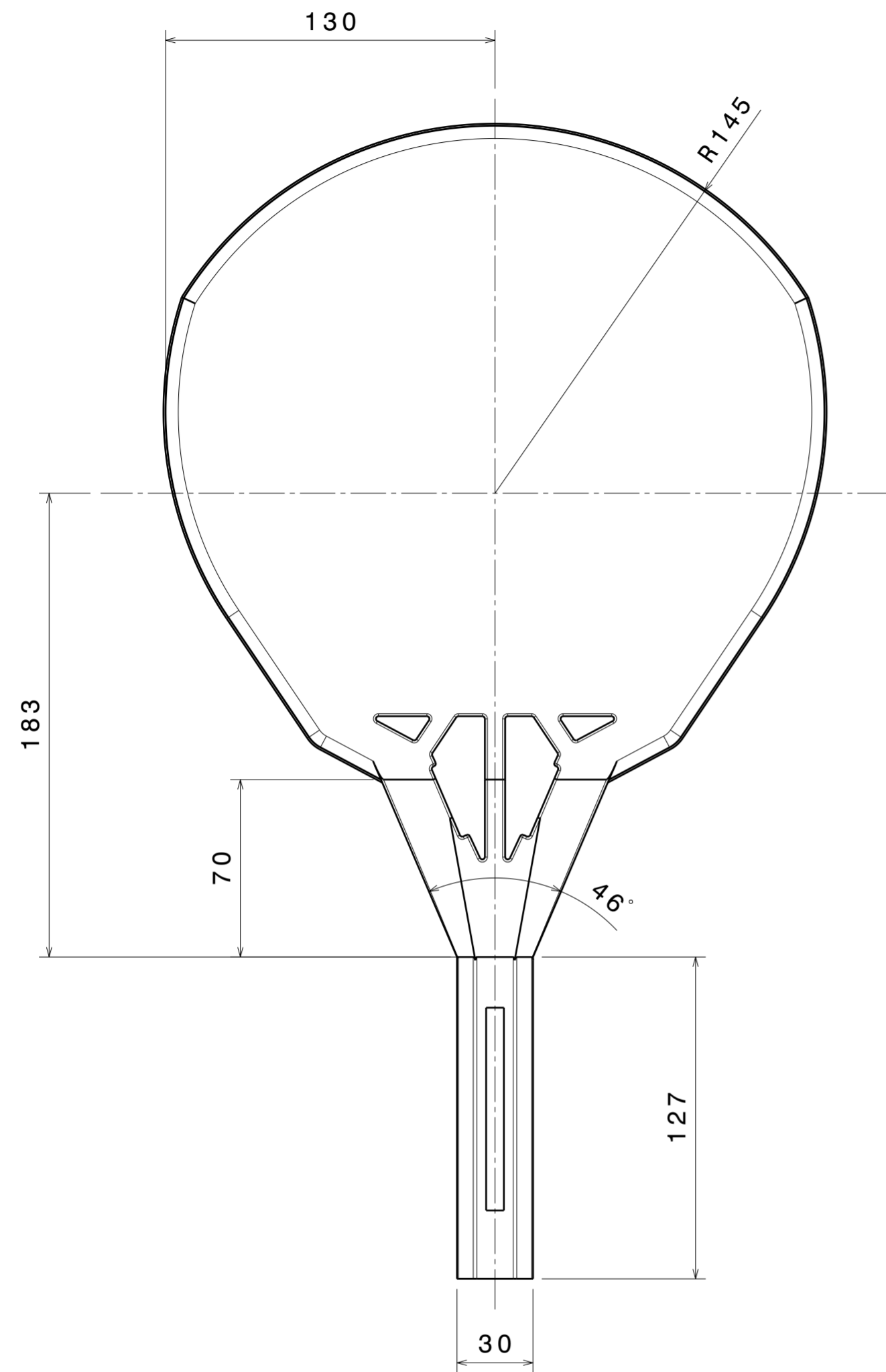
COLUMNA GUÍA
Escala: 2:1



PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
Escala: 2:1

√ Ra 3.2 (√ Ra 1.6)

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN MOLDE DE FABRICACIÓN	
			
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		PLANO PIEZAS DEL CONJUNTO	
FECHA 10/05/2025		ESCALA	Nº PLANO 1/1
		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	



PERSPECTIVA ISOMÉTRICA

Procesos previos al taladrado
Rebado (En todos los contornos). - Eliminación de la rebaba generada durante el proceso de moldeo.

Nota: Ciertas dimensiones están sujetas a variaciones propias del proceso de moldeo y de los procesos posteriores

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN PALA DE PÁDEL	
 		PLANO DIMENSIONES GENERALES	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA 1:2	Nº PLANO 1/6
FECHA 10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	

H

G

F

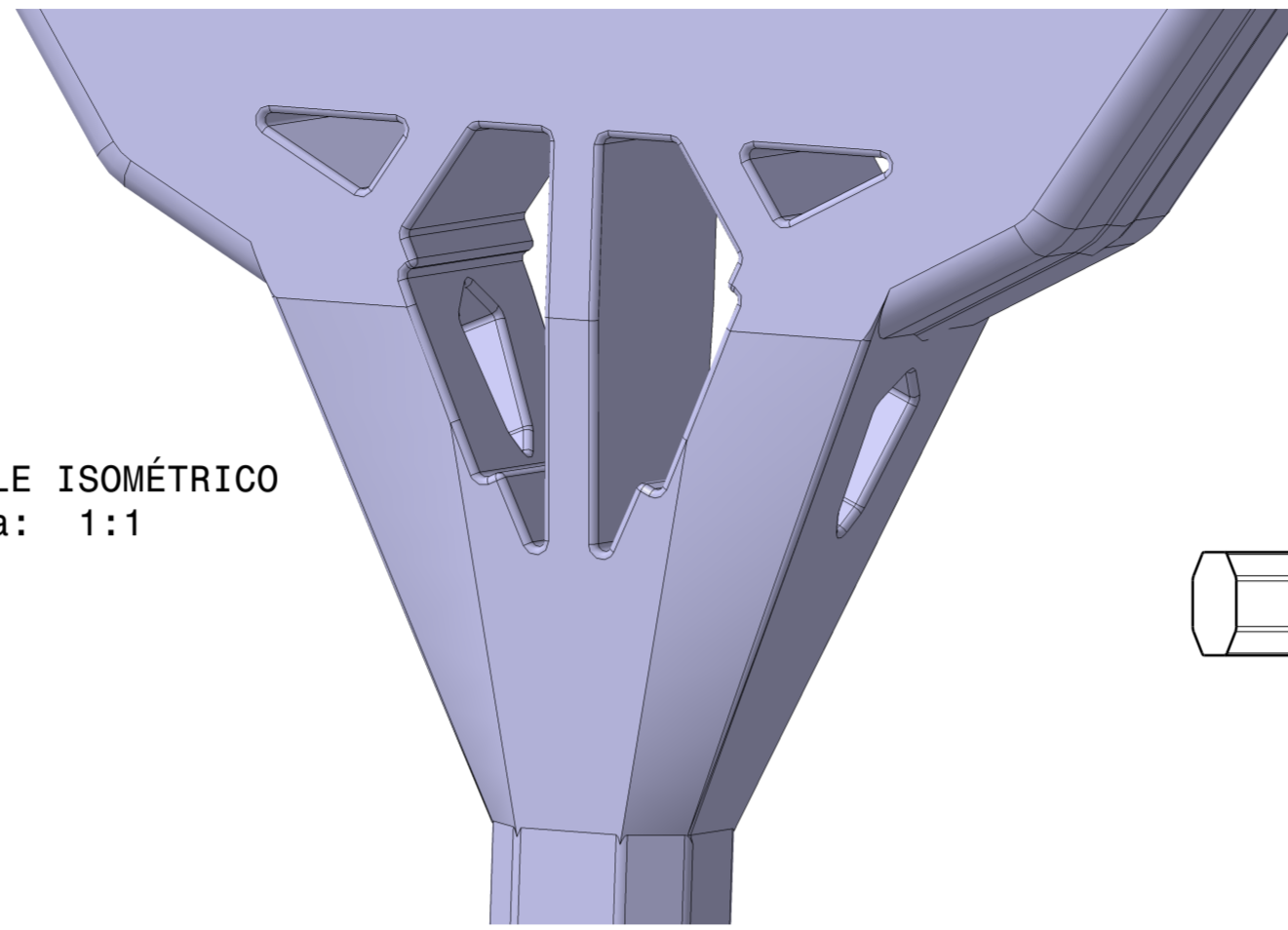
E

D

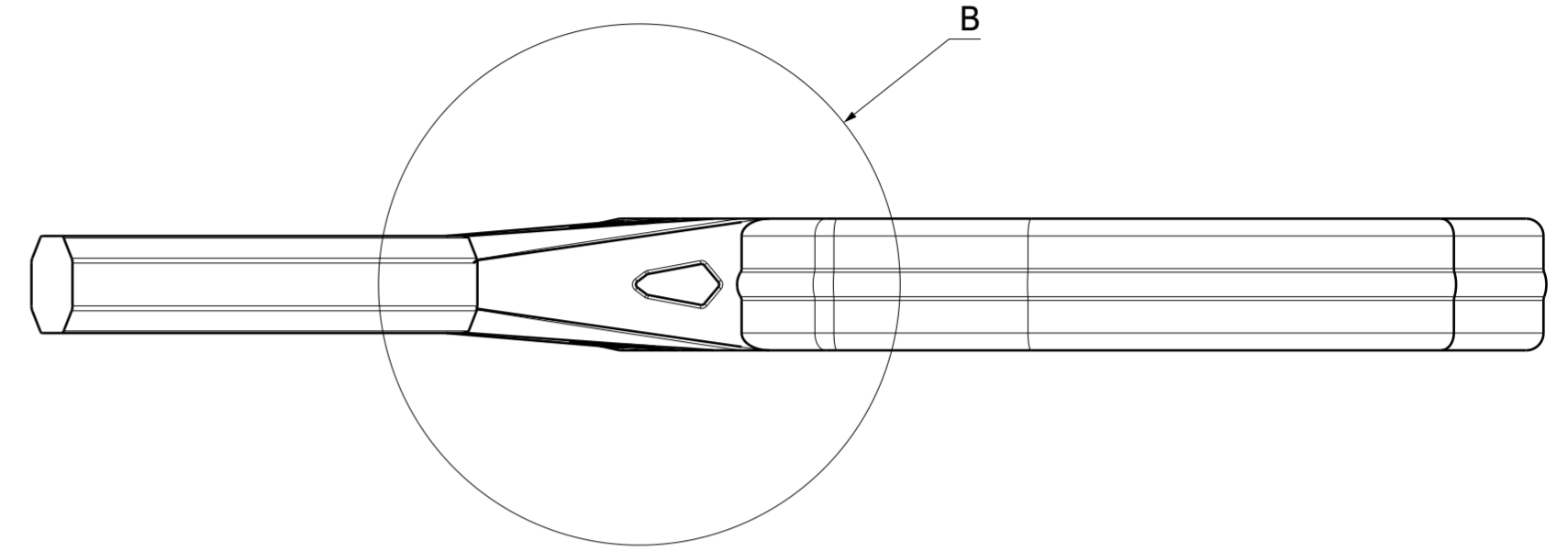
C

B

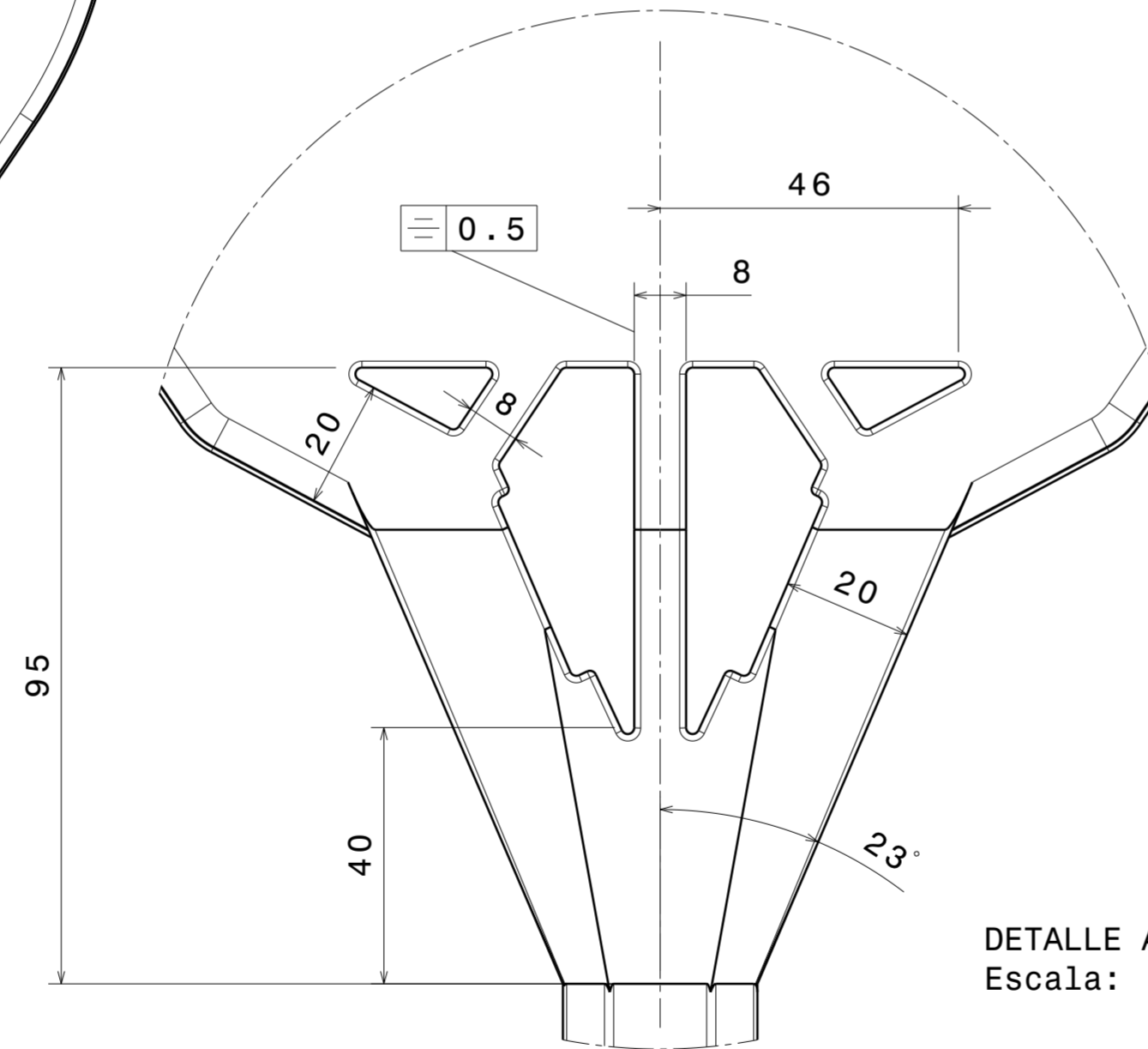
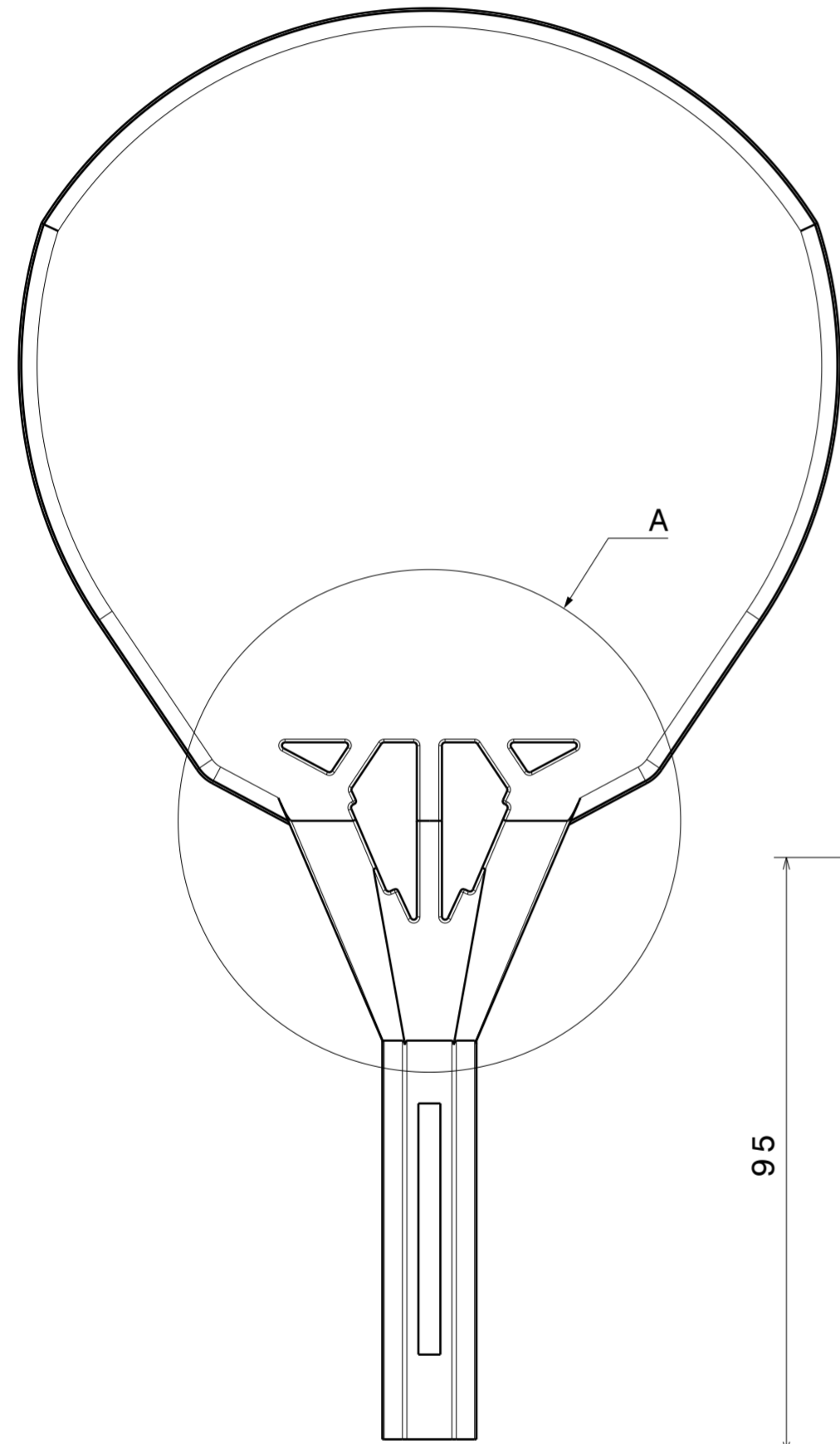
A



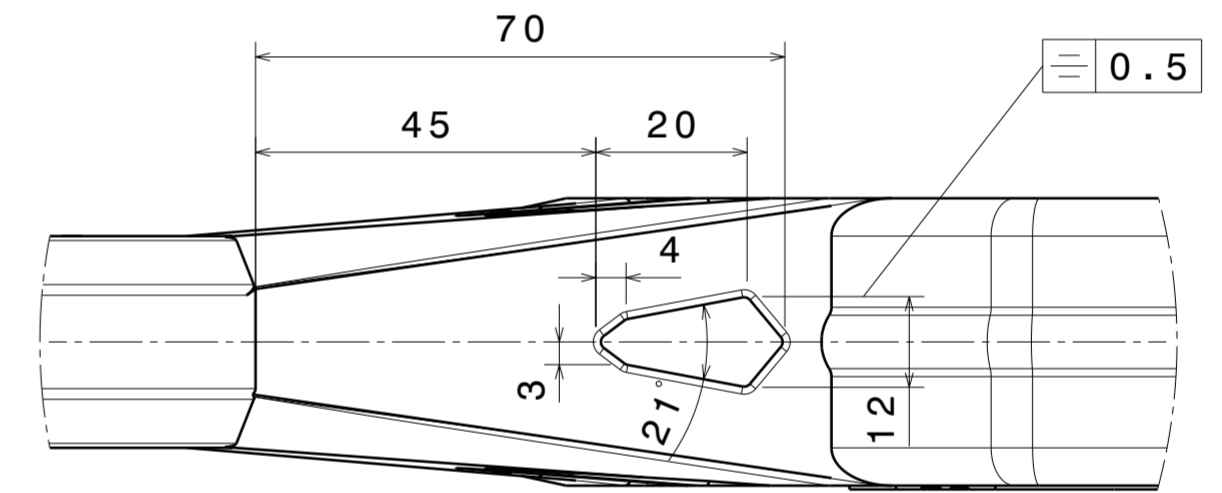
DETALLE ISOMÉTRICO
Escala: 1:1



DETALLE B
Escala: 1:1



DETALLE A
Escala: 1:1



Nota: Redondeos NO Acotados R=1

Procesos previos al taladrado
Rebarbado (En todos los contornos). - Eliminación de la rebaba generada durante el proceso de moldeo.

Nota: Redondeos NO Acotados R=1

Nota: Ciertas dimensiones están sujetas a variaciones propias del proceso de moldeo y de los procesos posteriores

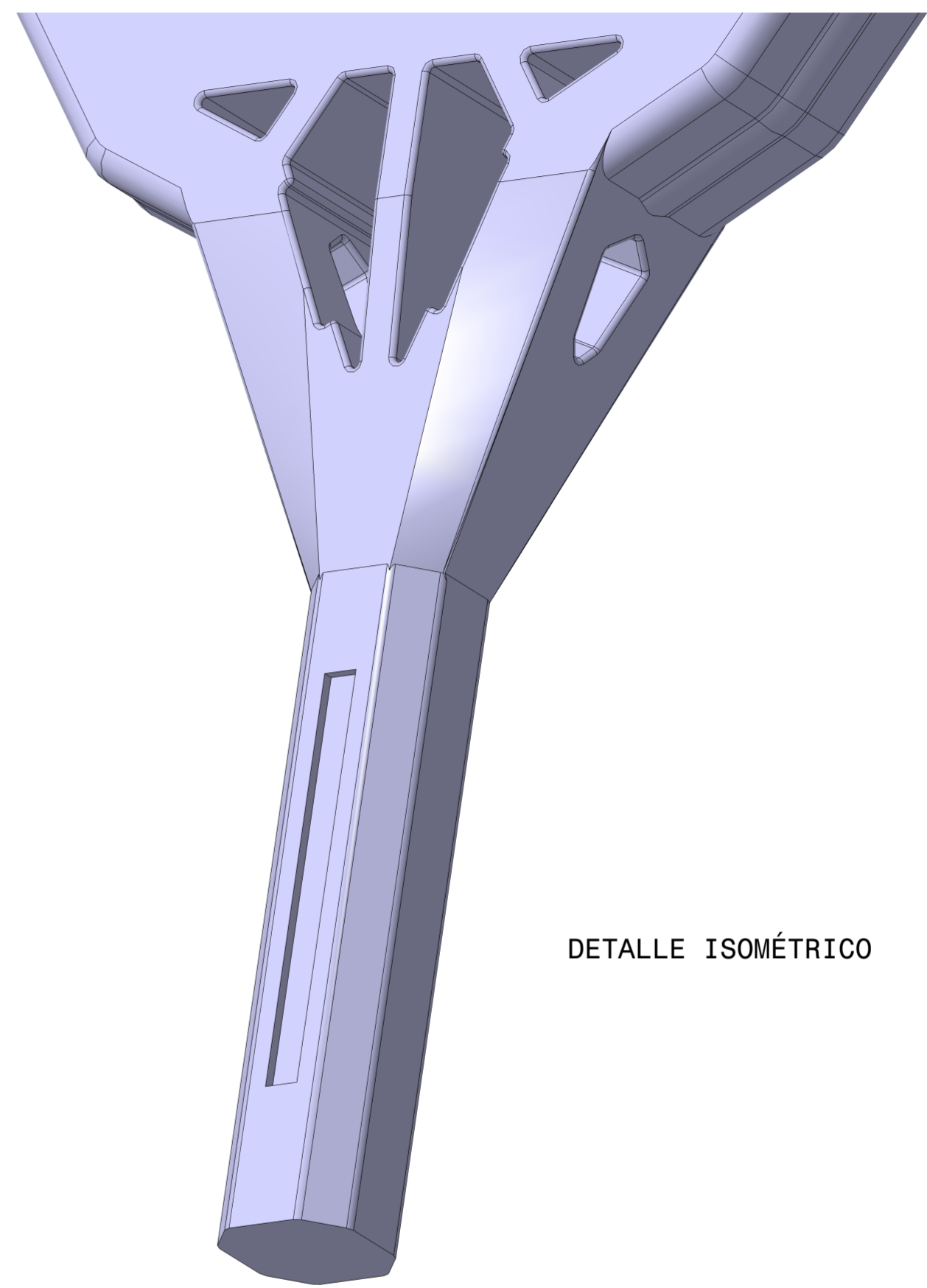
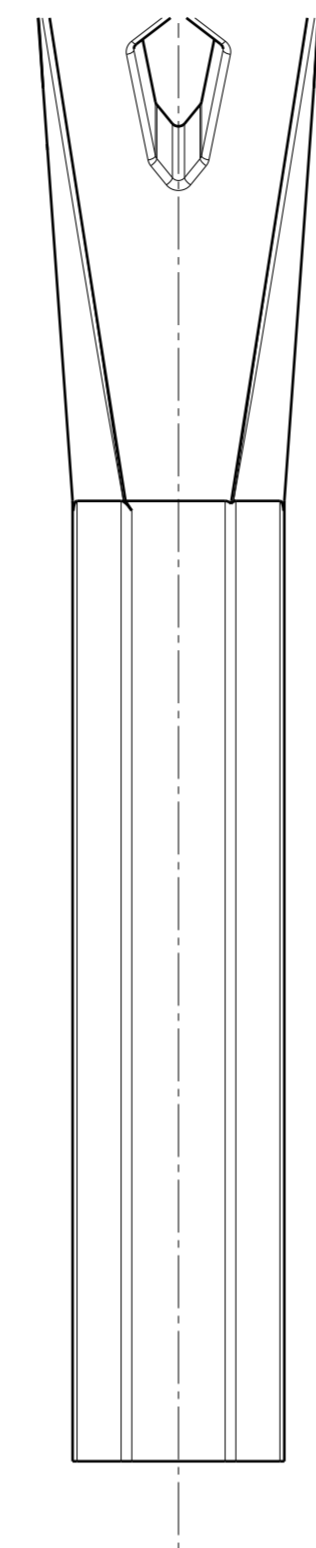
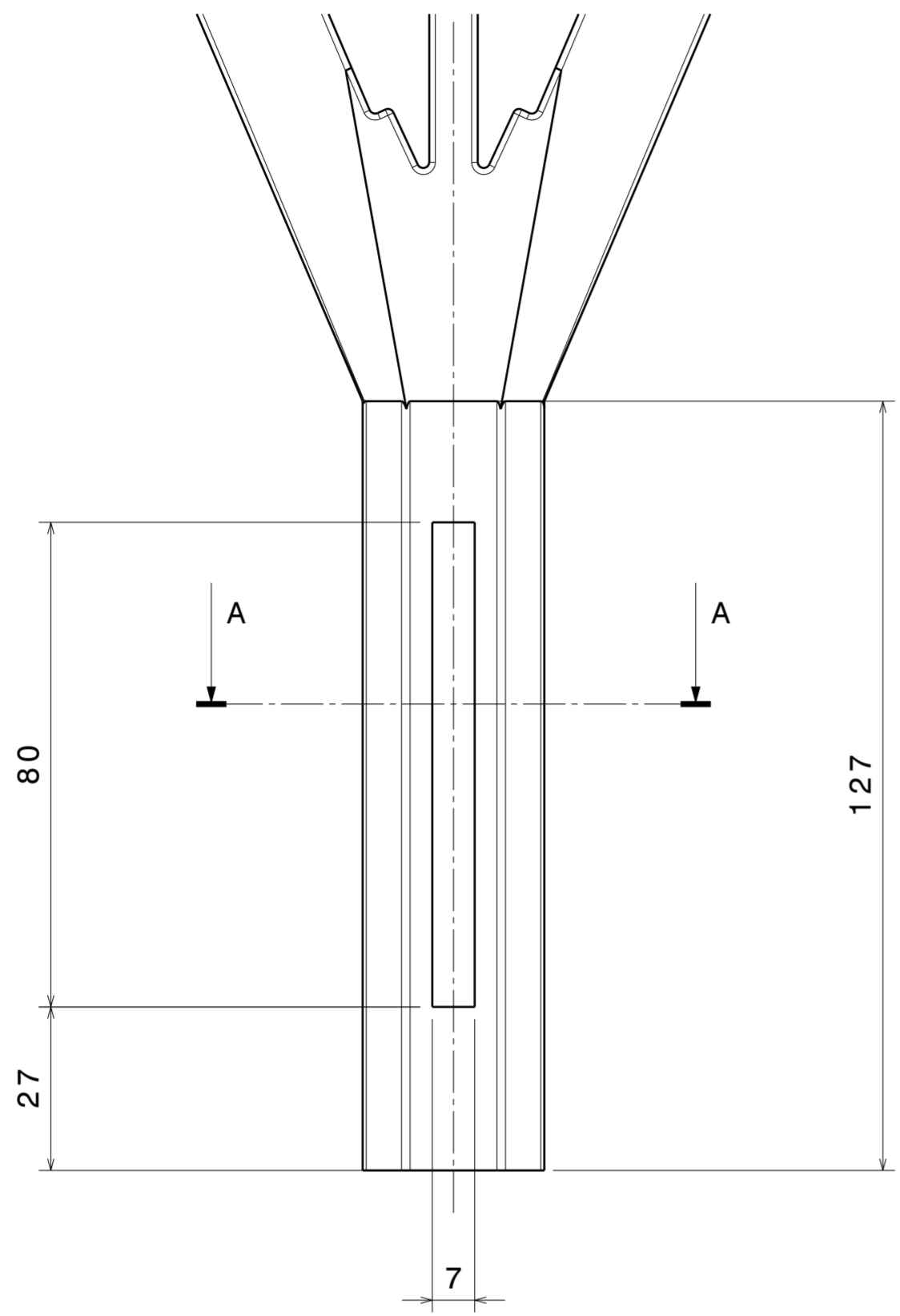
Universidad de Valladolid		DESIGNACIÓN	
Escuela de Ingenierías Industriales		PALA DE PÁDEL	
		PLANO	
AUTOR		DETALLES PUENTE (CORAZÓN)	
M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA	Nº PLANO
FECHA		1:2	2/6
10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	FORMATO
			A2

H

G

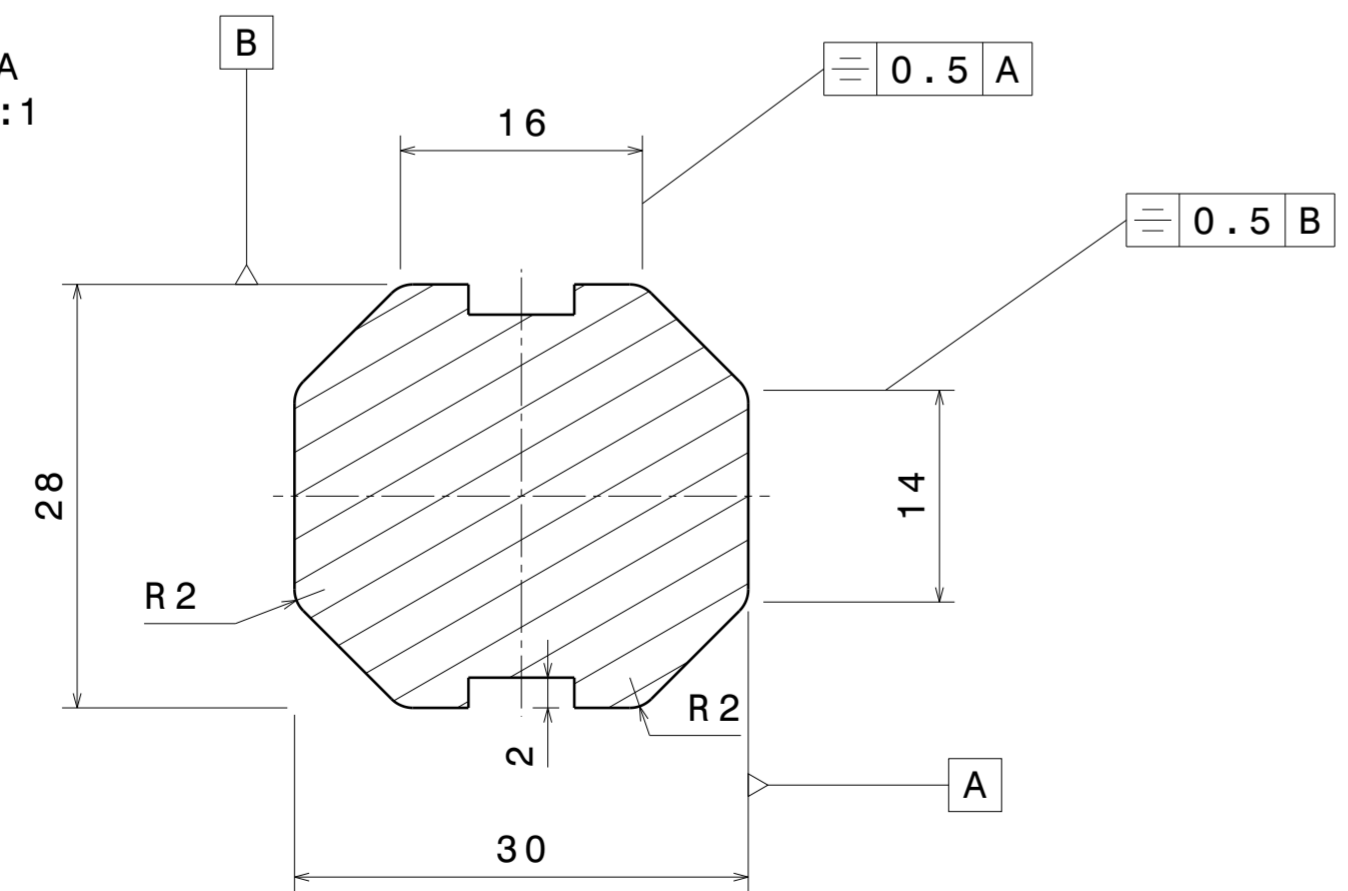
B

A



DETALLE ISOMÉTRICO

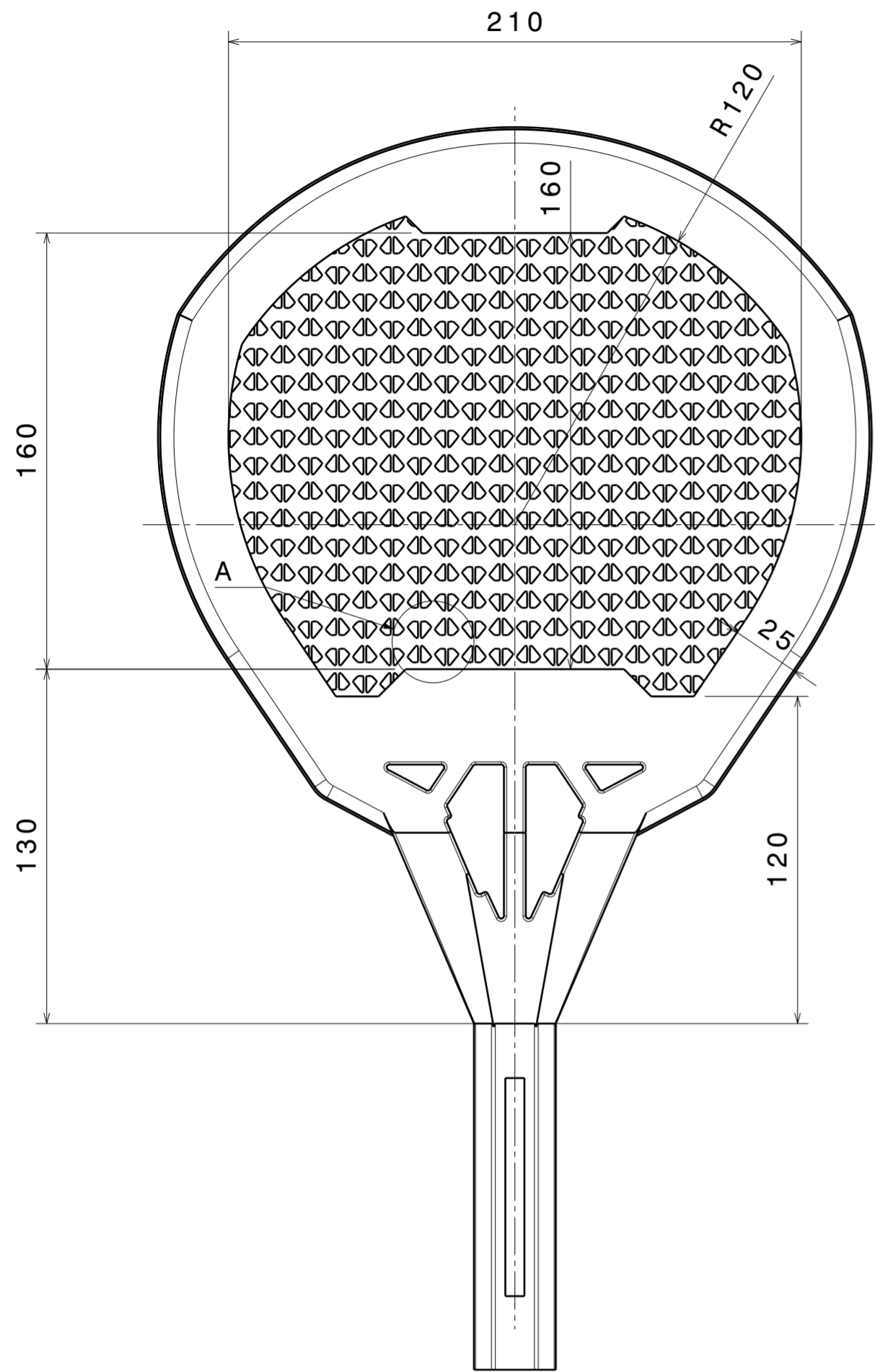
SECCIÓN A-A
Escala: 2:1



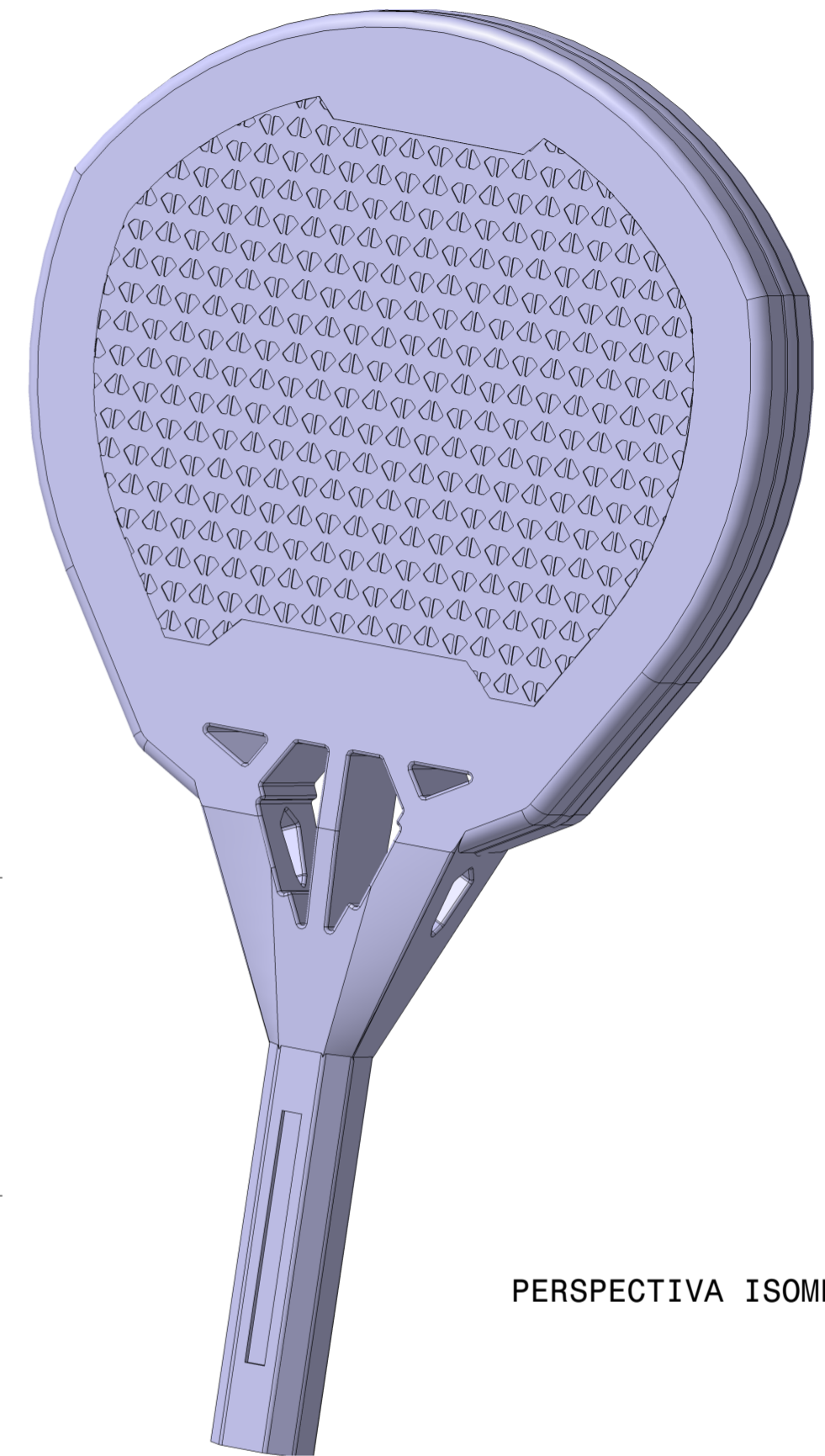
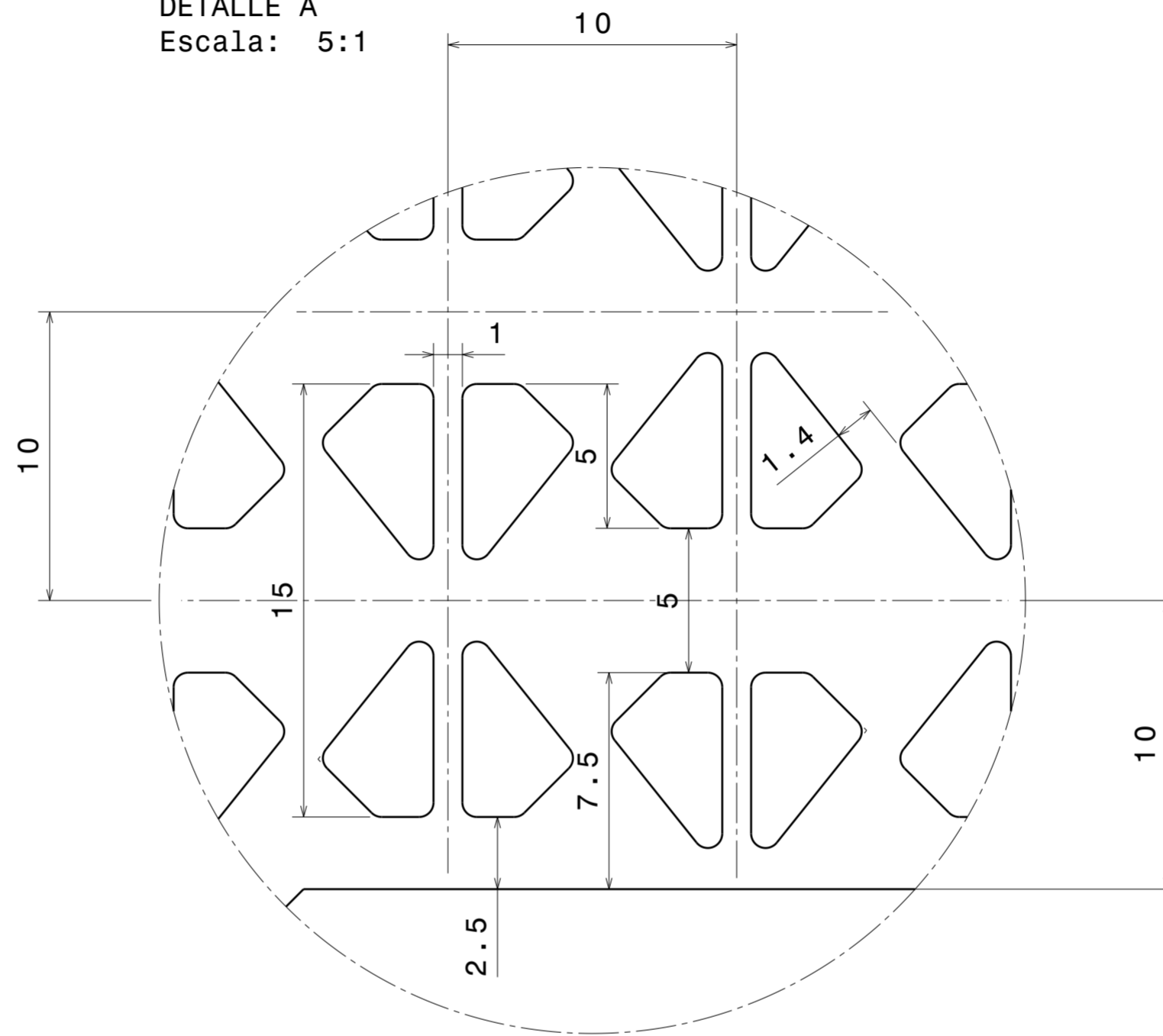
Nota: Ciertas dimensiones están sujetas a variaciones propias del proceso de moldeo y de los procesos posteriores

Procesos previos al taladrado
Rebarbado (En todos los contornos). - Eliminación de la rebaba generada durante el proceso de moldeo.

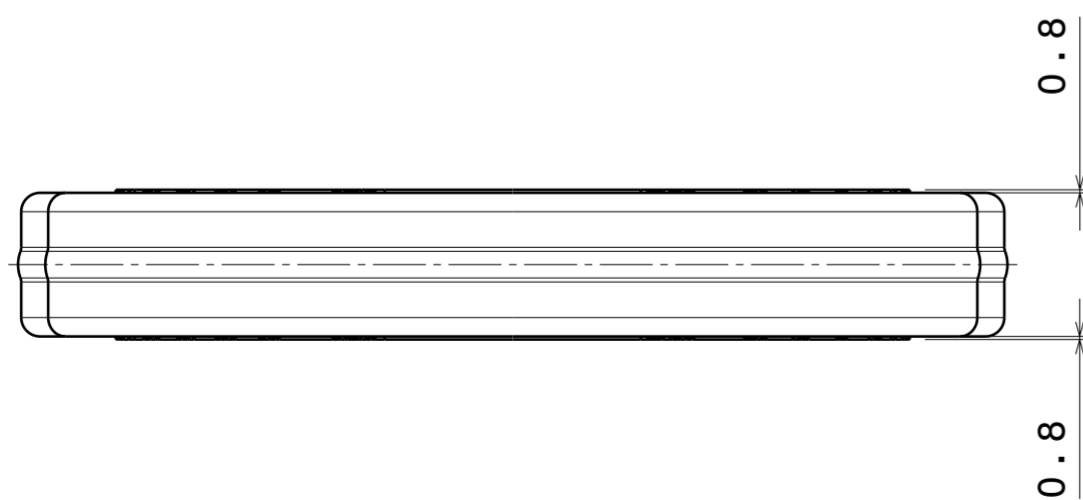
Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN PALA DE PÁDEL	
 		PLANO DETALLE EMPUÑADURA	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA 1:1	Nº PLANO 3/6
FECHA 10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	FORMATO A2



DETALLE A
Escala: 5:1



PERSPECTIVA ISOMÉTRICA

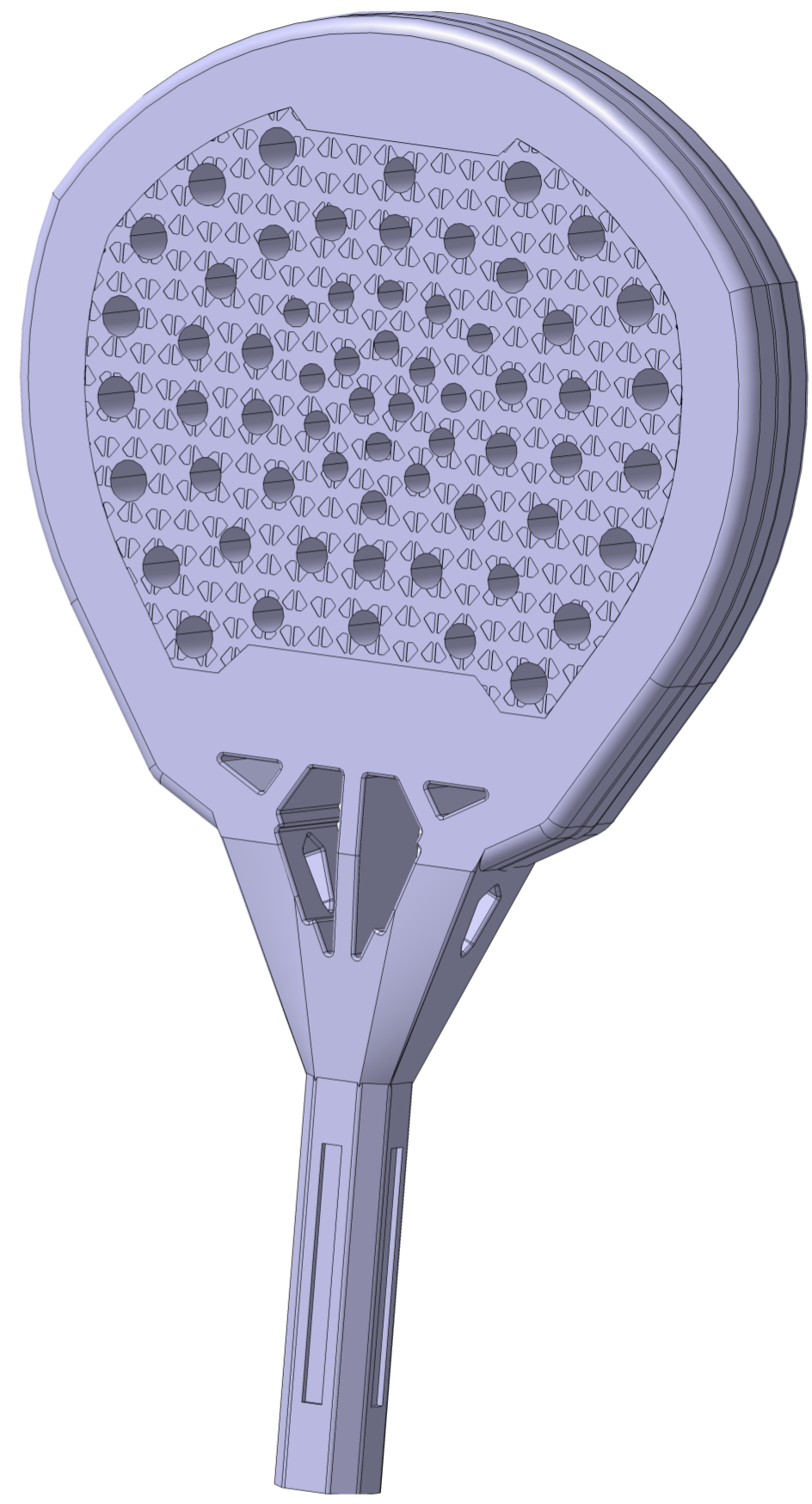
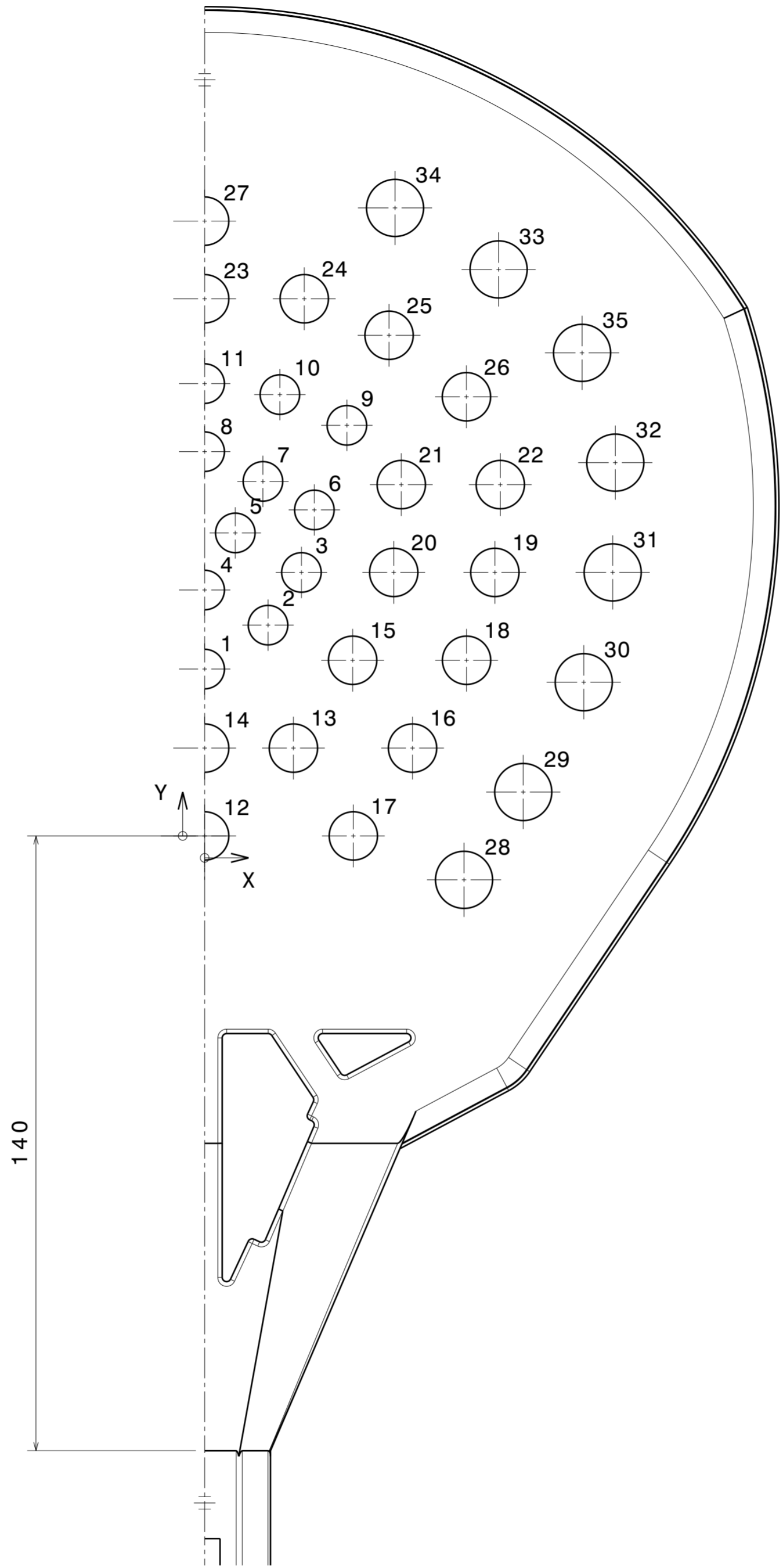


Orden de operación	Procesos previos al taladrado (Excepto en empuñadura)
1	Enmasillado. - Proceso manual de relleno de imperfecciones de la superficie con masilla (+0.2 mm de espesor)
2	Imprimación. - Capa de aerosol (color blanco) que favorece la adherencia de la pintura y sella la superficie (+0.05 mm de espesor)
3	Pintura. - Acabado con capa de pintura Negro RAL 9005 (+0.1 mm de espesor)
4	Barniz. - Acabado con capa de barniz (+0.05 mm de espesor)

Nota: Ciertas dimensiones están sujetas a variaciones propias del proceso de moldeo y de los procesos posteriores

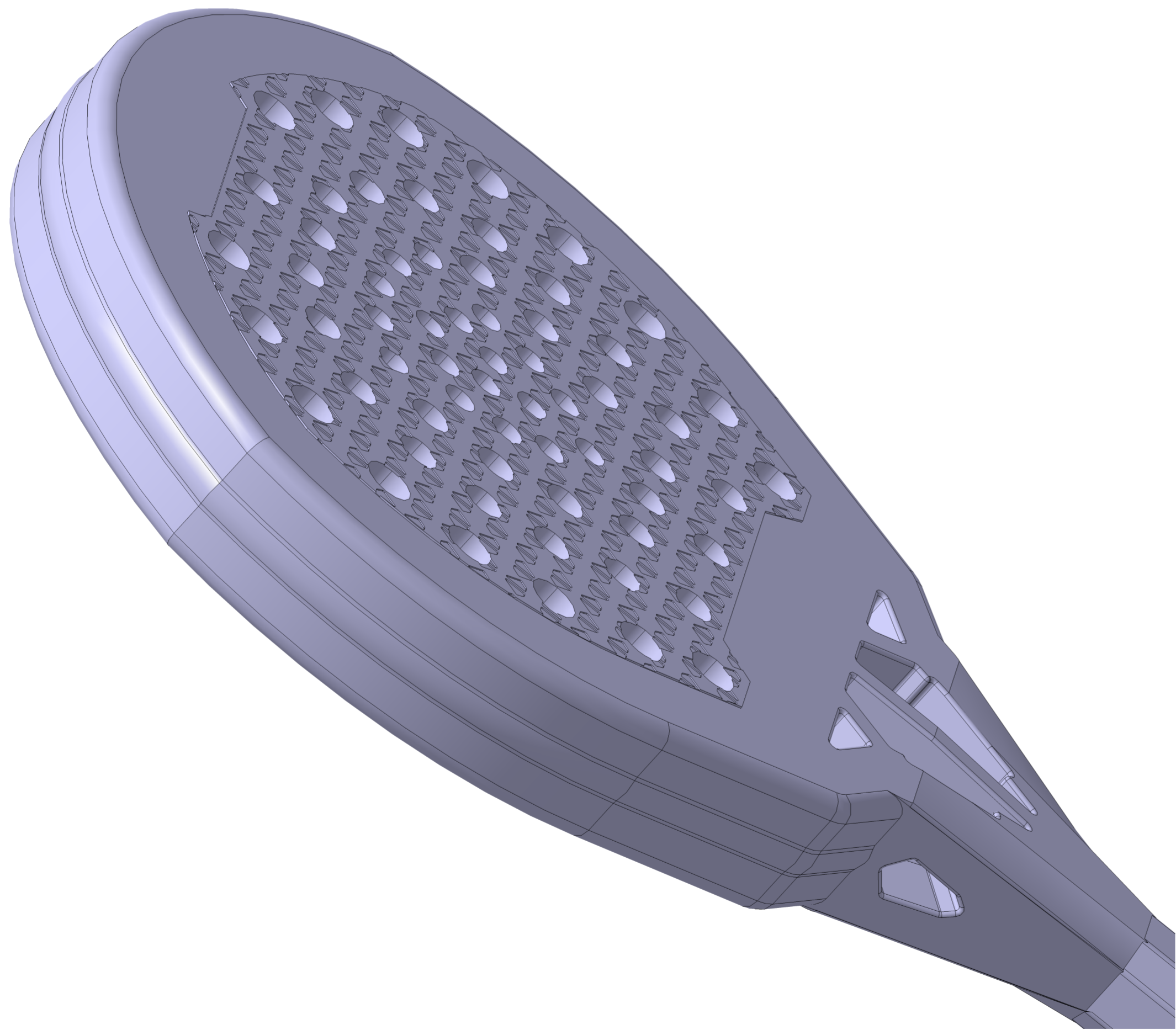
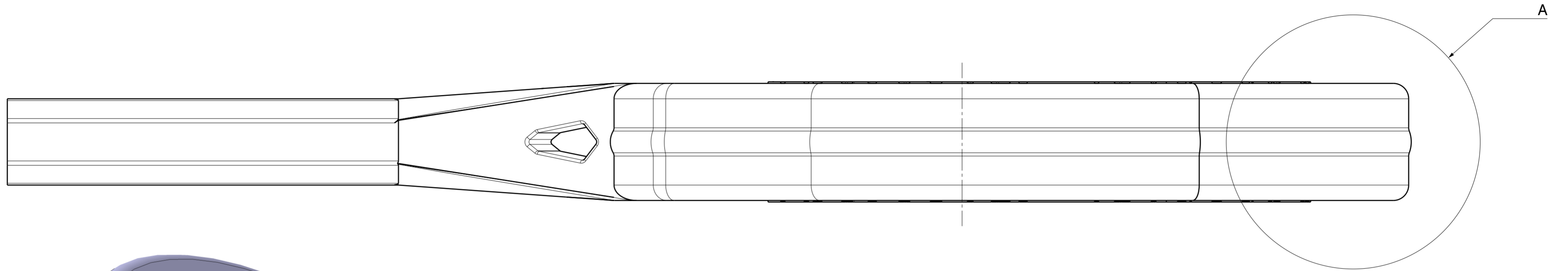
Universidad de Valladolid		DESIGNACIÓN	
Escuela de Ingenierías Industriales		PALA DE PÁDEL	
 		PLANO	
AUTOR		PATRÓN DE RUGOSO 3D	
M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA	Nº PLANO
FECHA		1:2	4/6
10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO	
		A2	

Taladro	X	Y	Diámetro
1	0	38	9
2	14,44	48	9
3	22,05	60	9
4	0	56	9
5	6,98	69	9
6	24,99	74,23	9
7	13,28	80,73	9
8	0	87,5	9
9	32,4	93,5	9
10	17,14	100,5	9
11	0	103	9
12	0	0	11
13	20,22	20	11
14	0	20	11
15	33,71	40	11
16	47,36	20	11
17	33,87	0	11
18	59,67	40	11
19	66,11	60	11
20	43,07	60	11
21	44,8	80	11
22	67,35	80	11
23	0	122,32	11
24	22,69	122,32	11
25	42,01	114	11
26	59,64	100	11
27	0	140	11
28	59,09	-10	13
29	72,58	10	13
30	86,36	35	13
31	92,95	60	13
32	93,55	85	13
33	66,97	129	13
34	43,37	143	13
35	85,98	110	13

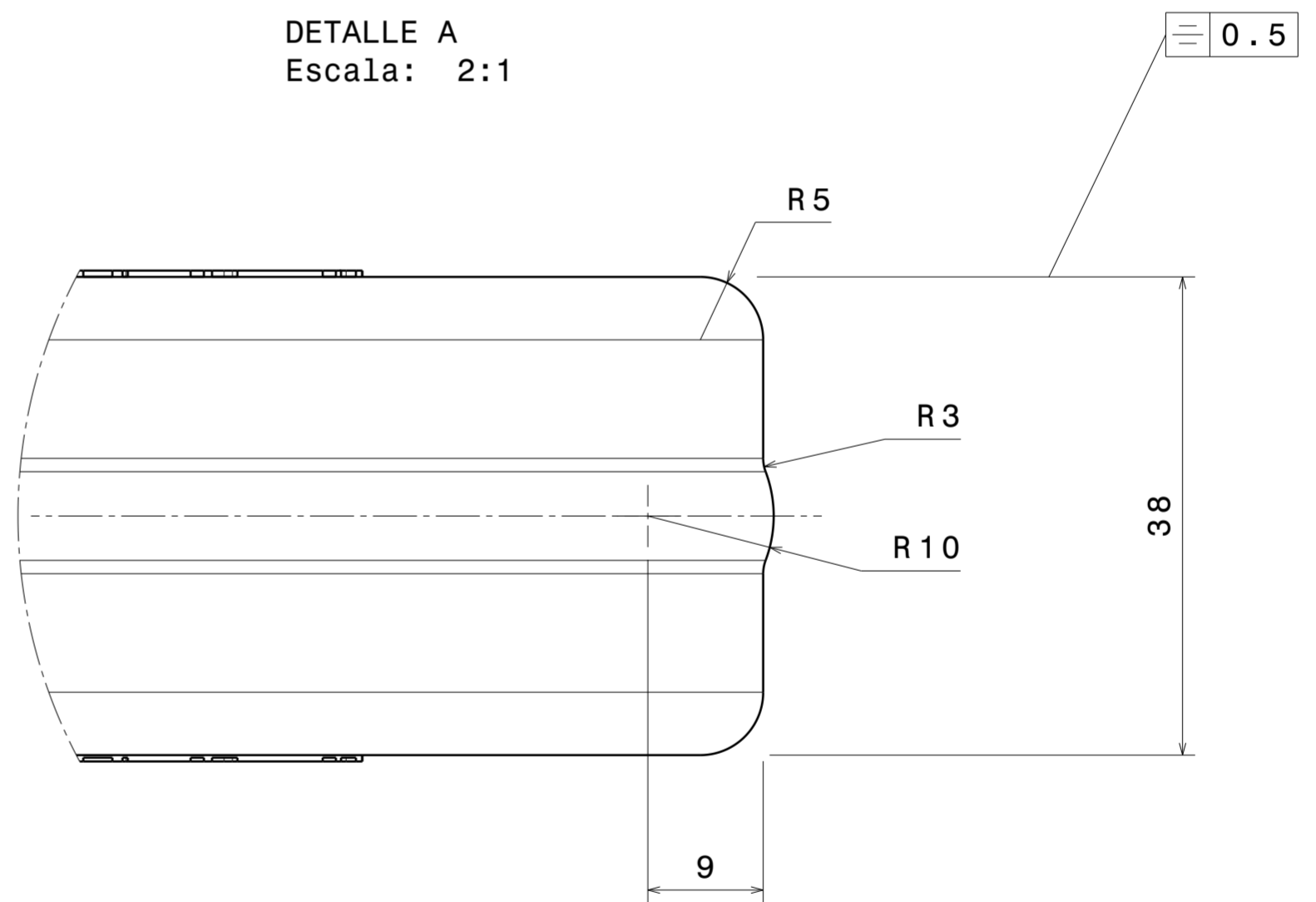


PERSPECTIVA ISOMÉTRICA
Escala: 1:2

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN PALA DE PÁDEL	
 		PLANO PATRÓN DE AGUJEREO	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA 1:1	Nº PLANO 5/6
FECHA 10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	
		FORMATO A2	



DETALLE A
Escala: 2:1



Nota: Ciertas dimensiones están sujetas a variaciones propias del proceso de moldeo y de los procesos posteriores

Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales		DESIGNACIÓN PALA DE PÁDEL	
		PLANO PERFIL AERODINÁMICO	
AUTOR M. ALONSO BRIZUELA		ESCALA 1:1	Nº PLANO 6/6
FECHA 10/05/2025		Tolerancias generales según DIN ISO 2768-1 clase m	FORMATO A2



REFERENCIAS

- [1] Federación Internacional de Pádel F.I.P., «Historia | Padel FIP». [En línea]. Disponible en: <https://www.padelfip.com/es/historia/>
- [2] B. Javier Sánchez-Alcaraz Martínez, «Materiales para la Historia del Deporte. Nº 11 - HISTORIA DEL PÁDEL», jun. 2013.
- [3] Federación Internacional de Pádel F.I.P., «The World Padel Participation, Competition, Performance and Organization Report», 2024.
- [4] Federación Internacional de Pádel F.I.P., «Reglamento de Juego del Pádel», may 2021.
- [5] «Partes de una pala de pádel - Zona de Padel». [En línea]. Disponible en: <https://www.zonadepadel.es/blog/2023/09/partes-de-una-pala-de-padel/>
- [6] «Todos los tipos de palas de pádel y sus características». [En línea]. Disponible en: <https://blog.padelnuestro.com/tipos-de-palas-de-padel/>
- [7] «Pádel - HEAD». [En línea]. Disponible en: https://www.head.com/es_ES/padel.html
- [8] «Pádel - NOX». [En línea]. Disponible en: <https://noxsport.com/pages/padel>
- [9] «Pádel - ADIDAS». [En línea]. Disponible en: <https://www.adidas.es/padel>
- [10] «Pádel - Babolat». [En línea]. Disponible en: <https://www.babolat.com/es/padel.html>
- [11] «Pádel - SIUX». [En línea]. Disponible en: <https://www.siuxpadel.com/>
- [12] «Pádel - PUMA». [En línea]. Disponible en: <https://eu.puma.com/es/es/deportes/otros-deportes/padel/todos-los-productos-para-el-padel>
- [13] «Pádel - BULLPADEL». [En línea]. Disponible en: <https://www.bullpadel.com/es/>
- [14] «Pádel - Wilson». [En línea]. Disponible en: <https://www.wilson.com/es-es/padel/racquets>
- [15] «Pádel - StarVie». [En línea]. Disponible en: <https://www.starvie.com/es/palas-de-padel/gama-premium.html>
- [16] «Pádel - LÖK Sports». [En línea]. Disponible en: <https://loksports.com/es/>



- [17] «Pádel - Kombat Padel». [En línea]. Disponible en: <https://kombatpadel.com/es/>
- [18] «Pádel - OXDOG Padel». [En línea]. Disponible en: <https://oxdogpadel.com/collections/palas-oxdog-3>
- [19] «Pádel - Drop Shot». [En línea]. Disponible en: <https://dropshot.es/>
- [20] «Pádel -Cork Padel». [En línea]. Disponible en: <https://www.corkpadel.com/>
- [21] F. J. González Benito y J. Muñoz Pascualsanz, «Evolución Estructural del Poli (etileno-co-vinilacetato) bajo el Efecto de la Presencia de Nanopartículas de TiO₂ y la Temperatura», 2012.
- [22] F. J. Sempere Alemany, «Estudio de los procesos de reticulado, espumado y descomposición térmica de formulaciones industriales de copolímeros de EVA y PE: métodos cinéticos», pp. 14-30, 2003.
- [23] C. L. Uribe, «Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario». [En línea]. Disponible en: www.eltamiz.com
- [24] J. Alcañiz Monge, Á. Linares Solano, y D. Cazorla Amorós, «Fibras de carbón: preparación y aplicaciones», 1998.
- [25] P. Morgan, «Carbon Fibers and Their Composites», *Carbon Fibers and Their Composites*, may 2005, doi: 10.1201/9781420028744.
- [26] P. Antequera, L. Jimenez, y A. Miravete, «LOS MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE VIDRIO», ene. 2005.
- [27] Engr. Reashad Bin Kabir y Engr. Nasrin Ferdous, «Kevlar-The Super Tough Fiber», *International Journal of Textile Science*, vol. 1, n.º 6, pp. 78-83, ene. 2013, doi: 10.5923/j.textile.20120106.04.
- [28] DuPont Corporation, «KEVLAR Technical Guide».
- [29] J. Poveda Bernal, J. M. Pastor Barajas, y J. C. Merino Senovilla, «TESIS DOCTORAL - METODOLOGÍA DE DISEÑO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIOLEFÍNICA REFORZADOS CON FIBRAS DISCONTINUAS PARA APLICACIONES EN TRANSPORTE», jul. 2012.
- [30] V. Fiore, T. Scalici, G. Di Bella, y A. Valenza, «A review on basalt fibre and its composites», *Compos B Eng*, vol. 74, pp. 74-94, jun. 2015, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.034.



- [31] A. K. Geim y K. S. Novoselov, «The rise of graphene», *Nature Materials* 2007 6:3, vol. 6, n.º 3, pp. 183-191, mar. 2007, doi: 10.1038/nmat1849.
- [32] I. P. Ortega, «EL GRAFENO - Posibilidades del Grafeno en la Arquitectura», Madrid, ene. 2018.
- [33] S. L. TEJIDOS BAGES, «Aspectos Técnicos del Lino».
- [34] L. Yan, N. Chouw, y K. Jayaraman, «Flax fibre and its composites – A review», *Compos B Eng*, vol. 56, pp. 296-317, ene. 2014, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2013.08.014.
- [35] K. L. Pickering, M. G. A. Efendy, y T. M. Le, «A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance», *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 83, pp. 98-112, abr. 2016, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2015.08.038.
- [36] V. Y. Sánchez, M. Á. López Camacho, y R. Verdejo Márquez, «DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS DE RESINAS EPOXI PARA SENSORES CAPACITIVOS», 2019.
- [37] J. M. Morancho Llana, «ESTUDIO DEL CURADO DE MATERIALES COMPUESTOS POR UN SISTEMA EPOXI Y PARTÍCULAS ELASTOMÉRICAS», Barcelona, 1996.
- [38] P. Mohan, «A Critical Review: The Modification, Properties, and Applications of Epoxy Resins», *Polym Plast Technol Eng*, vol. 52, n.º 2, pp. 107-125, ene. 2013, doi: 10.1080/03602559.2012.727057.
- [39] AENOR: Asociación Española de Normalización y Certificación, «UNE-EN 573-1:2005 Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de productos de forja».
- [40] J. L. Meriam, L. G. Kraige, y J. N. Bolton, «Engineering Mechanics: Dynamics, 9th Edition», p. 21, 2018.
- [41] K. L. Johnson, «Contact Mechanics», may 1985, doi: 10.1017/CBO9781139171731.
- [42] R. Cross, J. O. Nordmark, T. J. Glatke, y E. D. Schubert, «Bouncing ball impacts», *Am J Phys*, vol. 89, n.º 5, pp. 452-452, may 2021, doi: 10.1119/10.0003550.