UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de una prótesis mecánica de extremidad superior

Autor: Cristina González Rojo

Tutor: Julián José Narbón Prieto

Departamento de ingeniería mecánica, química y diseño industrial

Madrid, enero 2019

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de una prótesis mecánica de extremidad superior

Autor:

Fdo.: Cristina González Rojo

Tutor:

Fdo.: Julián José Narbón Prieto

Departamento de ingeniería mecánica, química y diseño industrial

Madrid, enero 2019

1. INTRODUCCIÓN 3

2. OBJETIVOS 4

3. ESTADO DEL ARTE 5

3.1. Clasificación de prótesis de brazo: estética, mecánica y mioeléctrica 5
3.1.1. Prótesis estéticas 5
3.1.2. Prótesis mecánicas 6
3.1.3. Prótesis mioeléctrica 7

4. ESTUDIOS PREVIOS 8

4.1. Estudios genéricos relativos al diseño de prótesis de brazo 8
4.1.1. Prótesis de brazo: definición y componentes 8
4.1.2. Estudio del brazo humano 9
4.1.3. Estudio crítico de mercado: prótesis de brazo 19
4.1.4. Análisis de los condicionantes 28

4.2. Estudios relativos a la situación particular 29
4.2.1. Análisis de las necesidades del usuario 29
4.2.2. Determinación del tipo de prótesis en función al usuario 30
4.2.3. Antropometría del usuario 33

4.3. Proceso de diseño: prototipado rápido 34
4.3.1. Tecnologías de prototipado rápido: Fabricación aditiva 34

5. DISEÑO 35

5.1. Pliego de condiciones 35

5.2. Desarrollo de los componentes de la prótesis 36
5.2.1. Articulación del codo 36
5.2.2. Mano o gancho 40
5.2.3. Articulación de la muñeca 43
5.2.4. Unión entre articulaciones 46
5.2.5. Carcasa 47
5.2.6. Encaje 49
5.2.7. Arnés 50

5.3. Diseño final de los componentes de la prótesis 51
5.3.1. Articulación del codo 51
5.3.2. Mano y articulación de la muñeca 55
5.3.3. Unión entre articulaciones 60
5.3.4. Carcasa 61
5.3.5. Encaje y arnés 62
5.3.6. Posiciones de la prótesis 63

5.4. Selección de materiales 64
5.4.1. Selección del material textil 66
5.4.2. Selección del metal 67
5.4.3. Selección del polímero 69
5.4.4. Selección del material de impresión 3D 71
5.4.5. Ensayo de los materiales 74

5.5. Análisis de tensiones por elementos finitos 80
5.5.1. Análisis de tensiones del prototipo 80
5.5.2. Análisis de tensiones del producto final 82
5.5.3. Optimización del diseño 90

6. FABRICACIÓN Y MONTAJE 93

6.1. Fabricación del producto 93
6.1.1. Fabricación por impresión 3D 93
6.1.2. Fabricación por mecanizado 94
6.1.3. Fabricación del arnés 95
6.1.4. Piezas comerciales 96

6.2. Fabricación del prototipo 97

6.3. Montaje 99

7. PRESUPUESTO 101

8. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PRODUCTO 104

8.1. Planos 104

8.2. Imágenes fotorrealistas 119

9. REFERENCIAS 121

1. Introducción

Durante las últimas décadas la tecnología se ha convertido en un imprescindible en nuestras vidas y la salud no ha sido un campo ajeno a esta influencia. Hoy en día son numerosos los ejemplos en los que la tecnología está a nuestro servicio. El objetivo de poner la tecnología al servicio de las personas no es otro que hacernos la vida más sencilla. Este proyecto trata de cumplir este fin para el caso de personas con capacidades reducidas por la pérdida de un brazo.

Este proyecto surge a consecuencia del grupo de investigación Autofabricantes, en el que se buscan nuevos avances tecnológicos en la fabricación de prótesis, con el objetivo de crear productos accesibles, valiéndose de la fabricación digital.

La realización del proyecto está enfocada a un caso particular. El usuario es un adulto que necesita una prótesis transhumeral, por encima del codo. Esto supone el reemplazamiento tanto de la función del codo como la de la mano.

Existen diferentes tipos de prótesis de brazo con amputación transhumeral. Una de las prótesis más utilizadas es la de tipo estética con articulación en el codo mediante sistema de engranaje manual. Es interesante trabajar en el desarrollo de un sistema de engranaje de mayor utilidad y funcionalidad.

Para ello se analizarán y valorarán las diferentes posibilidades. Teniendo en cuenta las opciones disponibles de libre acceso y las privadas, se valorarán los aspectos más interesantes y aplicables al caso particular que nos atañe.

El objetivo es encontrar una solución accesible a la mayor parte de la población posible. Por eso, se tiene un gran interés por implementar técnicas de fabricación digital que hagan del producto un bien asequible. Además, se trata de ofrecer una opción diferente a las que se pueden encontrar en el mercado y que responda a las necesidades del usuario.

2. Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de un diseño de prótesis de extremidad superior que cumpla los requerimientos del usuario. Para ello se desea estudiar aquellos aspectos relacionados con las prótesis de brazo y con la anatomía del brazo humano para obtener una solución que satisfaga al usuario.

Además, se pretende seleccionar los materiales óptimos para la fabricación del producto, materiales que puedan soportar las exigencias mecánicas del producto. Por otro lado, se explorará el campo de la impresión 3D para ampliar el conocimiento de los materiales, caracterizando aquellos que resulten de interés para el proyecto.

Se realizarán análisis de tensiones que garanticen la seguridad de la prótesis. La finalidad es procurar soluciones óptimas con las que el material utilizado se reduzca al mínimo y la fabricación y el montaje sean sencillos. Se desea planificar la fabricación de la prótesis de manera que esté destinada a la producción de una unidad.

Finalmente, la intención es diseñar un producto accesible económicamente, que ofrezca otra posibilidad frente a las existentes en el mercado. Se pretende ajustar el producto a un presupuesto reducido.

3. Estado del arte

3.1. Clasificación de prótesis de brazo: estética, mecánica y mioeléctrica

Existen varios tipos de prótesis de brazo que se diferencian principalmente por las funciones que realizan y las necesidades que cubren. En función de los requerimientos del usuario es conveniente el uso de un tipo u otro. Se pueden encontrar desde prótesis que ofrecen un aspecto hiperrealista a prótesis con una movilidad parecida a la del brazo humano. Se diferencian tres tipos de prótesis que, en orden creciente de utilidad, son: estéticas, mecánicas y mioeléctricas. A continuación, se explica cada uno de los tipos de prótesis [1] [2].

3.1.1. Prótesis estéticas

Este tipo de prótesis tiene el objetivo de reemplazar el miembro por una reproducción realista del mismo. Dentro de las prótesis estéticas, la diferencia principal viene dada por el modo en que se elaboran. Por un lado, se realizan prótesis a medida con piezas estándares (Fig. 1). Las piezas se fabrican en diferentes tamaños y colores que ofrecen un resultado satisfactorio en la mayoría de los casos. Esta prótesis está compuesta por un brazo interior y un guante cosmético.

Fig. 1 Ejemplo de prótesis estética estándar. Fuente: Ottobock.

Por otro lado, se realizan prótesis de silicona a medida que se desarrollan considerando las características del usuario [3]. Se trata de prótesis personalizadas con detalles muy realistas que hacen del producto una réplica fiel al miembro a reemplazar (Fig. 2).

Las prótesis estéticas están pensadas para aquellos usuarios que priorizan la apariencia a la funcionalidad. Aunque este tipo de prótesis solo realiza movimientos simples y posicionales, colabora con la rehabilitación del paciente. Mejora el modo de andar y la postura compensando el peso y restaurando el centro de gravedad, protege el tejido y contribuye al desarrollo psicomotor en el caso de los niños.

Fig. 2 Ejemplo de prótesis estética personalizada. Fuente: Ortopedia Jens Muller.

3.1.2. Prótesis mecánicas

Las prótesis mecánicas ofrecen una mayor utilidad, ya que permite el movimiento de las articulaciones del codo y la muñeca y la función de agarre de la mano. Todas las funciones se realizan mediante sistemas mecánicos. Dentro de estas prótesis se distinguen dos tipos por el modo de accionamiento de los mecanismos.

Las prótesis accionadas por sistemas de tracción son las más comunes. Disponen de sistemas de apertura y cierre mediante el uso de cables y cintas. A través de movimientos del muñón y del hombro se controlan las funciones de la mano (Fig. 3).

Fig. 3 Ejemplo de prótesis mecánica con sistema de tracción. Fuente: Victoria hand Project.

Por otro lado, existen prótesis con sistemas de accionamiento manual. Este tipo permite movimientos más limitados de la mano y, generalmente, se diseña para realizar funciones específicas (Fig. 4). El terminal de una prótesis mecánica puede consistir en una mano o en otros sistemas como ganchos de trabajo o de precisión.

El usuario al que se destinan este tipo de prótesis busca una prótesis de utilidad y no le da tanta importancia a la estética realista, eligiendo una opción con una estética mecánica.

Fig. 4 Ejemplo de prótesis mecánica con sistema manual. Fuente: Arm Dynamics.

3.1.3. Prótesis mioeléctrica

El funcionamiento de las prótesis mioeléctricas se basa en la lectura de las corrientes eléctricas que envían las contracciones musculares mediante sensores. De esta forma los músculos controlan la actuación del codo, la muñeca y los terminales. Estas prótesis permiten una mayor movilidad y precisión en los movimientos.

Un factor que hay que tener en cuenta en el diseño de las prótesis mioeléctricas es el peso de sus componentes, mayor al de otros tipos. Una buena sujeción es fundamental para lograr la comodidad, la movilidad y la manejabilidad adecuadas. Por otro lado, es muy importante la colocación de los sensores para optimizar la señal del músculo (Fig. 5).

Fig. 5 Ejemplo de prótesis mioeléctrica. Fuente: Upsocl.

El usuario de este tipo de prótesis busca reemplazar las funciones del brazo y así poder realizar las tareas del día a día del mismo modo que con un brazo humano (Fig. 6). El uso de estas prótesis exige un periodo de entrenamiento en el que un técnico ajusta la sensibilidad de los sensores y el paciente desarrolla sus habilidades.

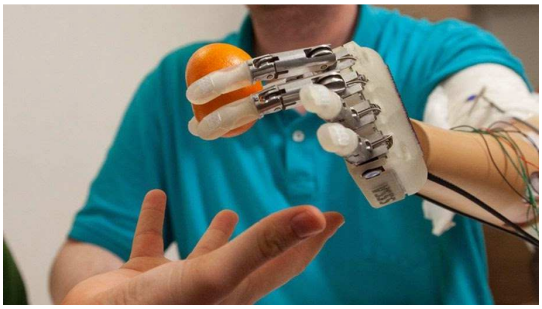


Fig. 6 Ejercicios de entrenamiento para prótesis mioeléctrica. Fuente: Direct industry.

4. Estudios previos

4.1. Estudios genéricos relativos al diseño de prótesis de brazo

4.1.1. Prótesis de brazo: definición y componentes

Una prótesis de brazo es un elemento artificial que se adapta al cuerpo con el objetivo de reemplazar la extremidad superior que falta, ya sea por amputación o por un defecto congénito. El objetivo de la prótesis es suplir las funciones que tiene el brazo [4].

Una prótesis de brazo tiene, principalmente, los siguientes componentes (Fig. 7): el encaje, el arnés, el codo, la muñeca y los terminales [1].

- El encaje es la parte de la prótesis que está en contacto con el cuerpo. Permite que los diferentes componentes queden unidos al miembro. Por lo general, esta parte se fabrica a medida para una correcta adaptación al muñón.
- El arnés sujeta la prótesis al cuerpo para que pueda ser utilizada correctamente. El arnés puede llevarse por debajo o por encima de la ropa para minimizar la fricción entre el arnés y la piel y mantener el arnés limpio.
- El codo es la parte de la prótesis que permite la extensión y flexión del antebrazo. El modo de accionamiento de este varía en función del tipo de prótesis.
- La muñeca ofrece al usuario la capacidad de rotar su terminal cambiando la posición. También permite intercambiar de forma rápida y sencilla un terminal por otro.
- Los terminales son los elementos que sustituyen las funciones de la mano. Principalmente existen tres tipos de terminales: manos, ganchos y terminales especializados. Las manos pueden ser pasivas o funcionales y los ganchos son funcionales permitiendo una fácil manipulación de los objetos. Por otro lado, los terminales especializados adaptan la prótesis a actividades específicas como el ciclismo o la cocina.

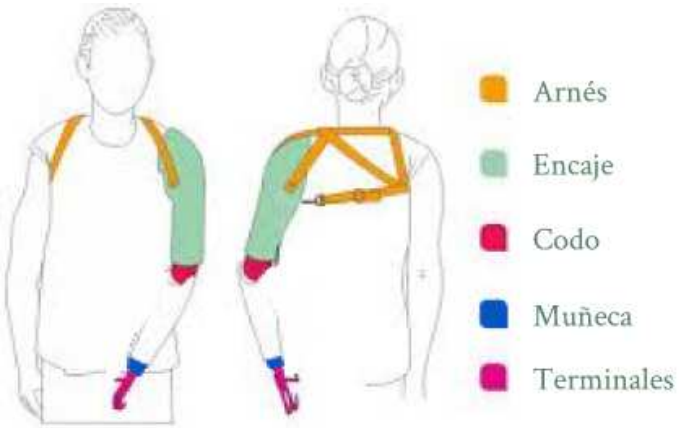


Fig. 7 Partes de una prótesis.

4.1.2. Estudio del brazo humano

4.1.2.1. Movimientos articulares

Para el diseño de una prótesis transhumeral es necesario saber qué movimientos han de realizar las articulaciones de la prótesis, por eso, en este apartado se estudian los tipos de movimiento y el rango de alcance de las articulaciones de codo y muñeca del cuerpo humano [5].

La herramienta utilizada para medir los ángulos del sistema osteoarticular es el goniómetro. El goniómetro consiste en un cuerpo y dos brazos, uno móvil y otro fijo. El cuerpo es un transportador de ángulos en el que se leen las medidas indicadas por el brazo móvil. El codo realiza cuatro movimientos: flexión, extensión, pronación y supinación.

Las mediadas de los ángulos de flexión y extensión se toman con el sujeto tumbado boca arriba y en la posición de inicio, en la que se considera un ángulo de 0°, el brazo está extendido con la palma de la mano hacia el cuerpo.

La flexión y la extensión (Fig. 8) ocurren alrededor del mismo eje. La flexión consiste en la aproximación del antebrazo al brazo y alcanza un ángulo de 150°. La extensión es el movimiento contrario en el que el antebrazo se aleja del brazo hasta alcanzar un ángulo de 0°. En algunos casos la extensión puede llegar a los -10°.

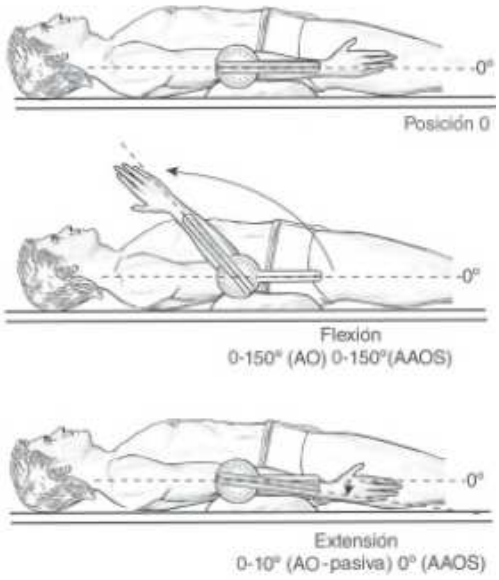


Fig. 8 Flexión-extensión del codo. Fuente: Gonimetría de Claudio H. Taboadela.

Las medidas de los ángulos de pronación y supinación se toman con el sujeto sentado y en la posición de inicio el codo está flexionado 90° y la palma de la mano hacia dentro.

La pronación y supinación (Fig. 9) son movimientos de rotación. En la pronación el antebrazo gira hacia dentro hasta situar la palma de la mano hacia abajo formando un ángulo de 80°. En la supinación el antebrazo gira hacia fuera hasta situar la palma de la mano hacia arriba formando un ángulo de 80°.

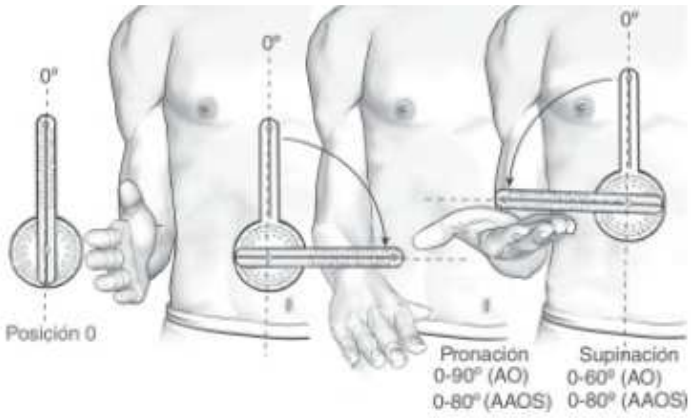


Fig. 9 Pronación-supinación del antebrazo. Fuente: Gonimetría de Claudio H. Taboadela.

La muñeca realiza también cuatro movimientos: flexión, extensión, desviación radial y desviación cubital.

Las medidas de los ángulos de flexión y extensión se toman con el sujeto sentado y en la posición de inicio el antebrazo está apoyado sobre una mesa en posición de pronación.

La flexión y la extensión (Fig. 10) ocurren alrededor de un eje perpendicular al antebrazo y contenido en el plano de la mano. En la flexión la mano rota hacia abajo hasta alcanzar 80° mientas que en la extensión la mano rota hacia arriba hasta alcanzar 70°.

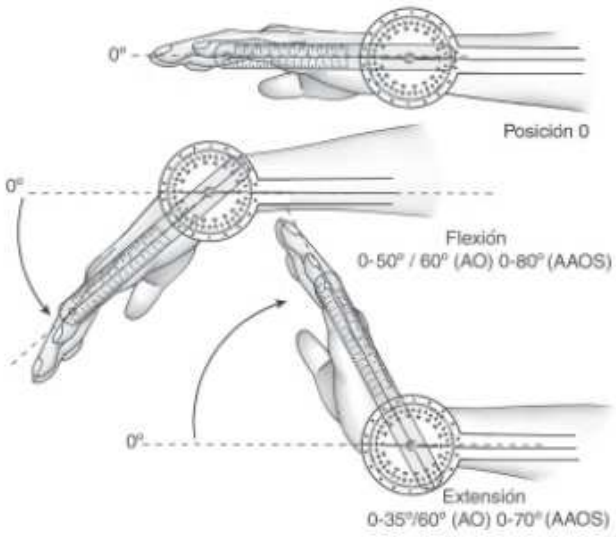


Fig. 10 Flexión-extensión de la muñeca. Fuente: Gonimetría de Claudio H. Taboadela.

Los ángulos de desviación radial y cubital se miden con el sujeto sentado y en la posición inicial el antebrazo está apoyado en la mesa en pronación.

La desviación radial y la cubital (Fig. 11) son movimientos de rotación. La línea media de la muñeca se localiza por la prolongación de la línea media del tercer dedo con la línea media del antebrazo. La desviación radial se produce cuando la mano de desplaza hacia la apófisis estiloides del radio, hacia dentro, hasta alcanzar un ángulo de 20° y la desviación cubital cuando se desplaza hacia la apófisis estiloides del cúbito o hacia fuera hasta un ángulo de 30°.

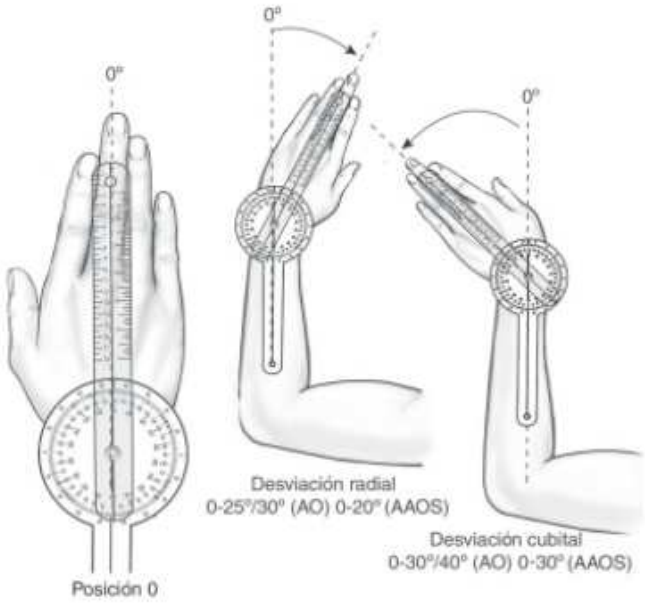


Fig. 11 Desviación radial y cubital de la muñeca. Fuente: Gonimetría de Claudio H. Taboadela.

El objetivo de este estudio es obtener un diseño completo que logre realizar el máximo de movimientos articulares del brazo humano para así ampliar las capacidades funcionales de la prótesis.

4.1.2.2. Movimientos coordinados básicos de la mano

Con el objetivo de diseñar una mano protésica o gancho que cumpla diferentes funciones, en este apartado se estudian los movimientos coordinados básicos de la mano que permiten a las personas agarrar objetos de forma automática [6]. Para realizar los diferentes tipos de agarre de la mano se requiere una serie de movimientos coordinados de los grupos musculares. Los agarres de la mano se clasifican en dos grupos: agarres gruesos o agarres de precisión.

Los agarres gruesos de la mano (Fig. 12) implican movimientos de flexión de los dedos incluyendo el pulgar, aunque no en todos los casos. Los dedos meñique y anular realizan la mayor fuerza junto con el dedo pulgar. Además, en este tipo de agarre se observa la extensión de la muñeca. Los agarres gruesos incluyen las prehensiones cilíndrica y esférica. El término médico prehensión se define como la acción de agarrar, asir o sostener. Ambas prehensiones utilizan exclusivamente los flexores de la mano para rodear y sujetar el objeto con los dedos. Estos agarres se diferencian por la forma del objeto sujetado, cilíndrica o esférica. Por otro lado, también se considera agarre grueso una prehensión especializada llamada enganche. Este agarre también se sirve de los flexores de los dedos, pero no utiliza el dedo pulgar.

Fig. 12 Agarres gruesos. Fuente: Odont

Los agarres de precisión de la mano (Fig. 13) se basan en prehensiones finas por acción del pulgar. El dedo pulgar realiza la fuerza en oposición a uno o más dedos. Las prehensiones de los agarres de precisión son: terminal, subterminal, trípode y lateral. La terminal y la subterminal consisten en la oposición del pulgar y el dedo índice. Se diferencian en que la prehensión subterminal requiere de la inervación del Nervio Mediano a los músculos tenares. En la prehensión trípode el pulgar se opone a los dedos índice y corazón. La prehensión lateral, que es menos precisa, requiere una abducción y rotación menores del pulgar.

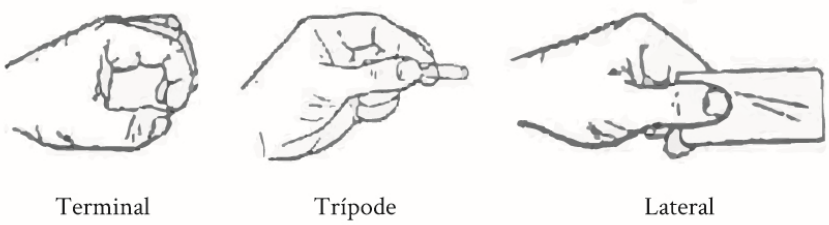


Fig. 13 Agarres de precisión. Fuente: Odont

4.1.2.3. Antropometría estática

Por antropometría estática se entiende el estudio de las medidas del cuerpo, de sus dimensiones estructurales, sin movimiento. En este apartado se recogen las medidas relevantes para el diseño de prótesis de brazo. Son importantes las dimensiones del brazo, del antebrazo y de la mano.

Los datos de la siguiente tabla se han encontrado en una muestra de los datos antropométricos de la población laboral española. Se han seleccionado los datos del muestreo de población masculina ya que dará un resultado más ajustado al sujeto de este proyecto. En la tabla se observa en la medida 42, longitud codo-punta de dedos, una media de 460,73 mm con una desviación típica de 24,37 mm y un error de 0,725 mm. Los percentiles se muestran en la siguiente tabla (Tabla 1):

DIMENSIONES EN MM.		PERCENTIL		
		P5	P50	P95
42	Longitud codo-punta de dedos	420	461	501

Tabla 1 Percentiles longitud codo-punta de dedos

A continuación, en las siguientes imágenes (Fig. 14, Fig. 15 y Fig. 16)se muestran las dimensiones de la mano que servirán de referencia para el diseño de la mano protésica o gancho (Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4) [7].

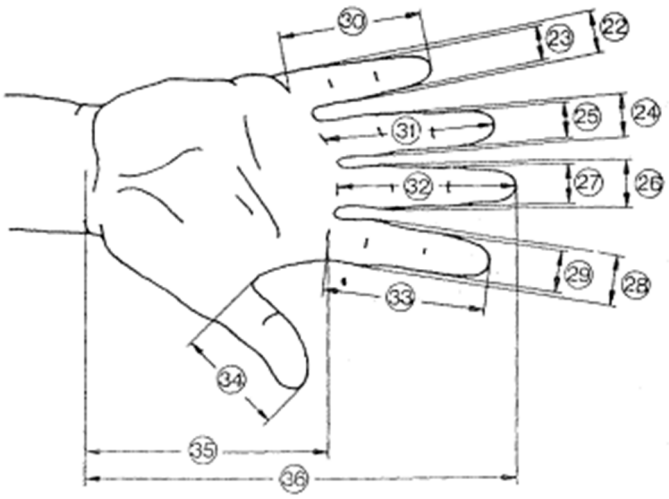


Fig. 14 Medidas principales de la mano. Fuente: Estrucplan.

DIMENSIONES EN cm.		PERCENTIL					
		HOMBRES			MUJERES		
		P5	P50	P95	P5	P50	P95
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedeo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	1

Tabla 2 Medidas principales de la mano

Fig. 15 Medidas del perfil de la mano. Fuente: Estrucplan.

DIMENSIONES EN cm.		PERCENTIL					
		HOMBRES			MUJERES		
		P5	P50	P95	P5	P50	P95
37	Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38	Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Tabla 3 Medidas del perfil de la mano

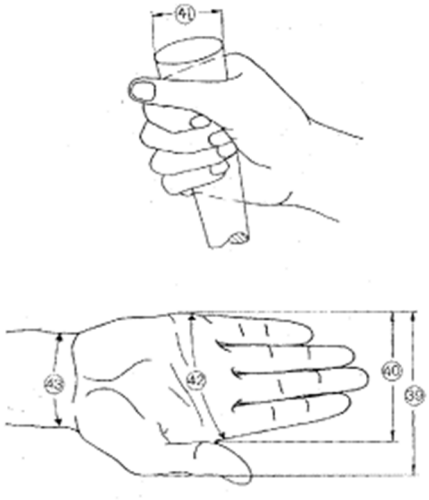


Fig. 16 Anchos y perímetros de la mano. Fuente: Estrucplan.

DIMENSIONES EN cm.		PERCENTIL					
		HOMBRES			MUJERES		
		P5	P50	P95	P5	P50	P95
39	Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar	9,8	10,7	11,6	8,2	9,2	10,1
40	Ancho de la mano excluyendo el dedo pulgar	7,8	8,5	9,3	7,2	8,0	8,5
41	Diámetro de agarre de la mano*	11,9	13,8	15,4	10,8	13,0	15,7
42	Perímetro de la mano	19,5	21,0	22,9	17,6	19,2	20,7
43	Perímetro de la articulación de la muñeca	16,1	17,6	18,9	14,6	16,0	17,7
* Las medidas corresponden al anillo descripto por los dedos pulgar e índice							

Tabla 4 Anchos y perímetros de la mano

4.1.2.4. Biomecánica del brazo

La biomecánica es el estudio del movimiento mecánico en sistemas vivos y en particular el movimiento del cuerpo humano. Estudia las fuerzas que actúan sobre este y los efectos que producen dichas fuerzas [8].

Una de las funciones principales de una prótesis de brazo es compensar el paso del brazo y restaurar el centro de gravedad del cuerpo para evitar lesiones de espalda y defectos en el andar. Por esa razón es necesario conocer el peso de las diferentes partes del brazo. El estudio del peso es experimental, ya que dependen de la cantidad de masa de cada persona [9].

Algunos autores han trabajado en establecer procedimientos para calcular parámetros personales para cada estudio, pero son costosos y poco precisos. Por eso, la técnica más habitual es expresar el peso como un porcentaje del peso total de la persona. En este proyecto se empleará el método que procede de los estudios de Dempster (1955) y Clauser (1969) (Tabla 5) [10] .

SEGMENTO	MASA	CG	PUNTO PROXIMAL	PUNTO DISTAL
Cabeza y cuello	7,3%	46,40%	Vertex	Gonión medio
Tronco	50,7%	38,03%	Hueco supraesternal	Cadera media
Brazo	2,6%	51,30%	Acromion	Radial
Antebrazo	1,6%	38,96%	Radial	Art. muñeca
Mano	0,7%	82,00%	Art. muñeca	Estiloides 3ºdedo
Muslo	10,3%	37,19%	Art. cadera	Tibial
Pantorrilla	4,3%	37,05%	Tibial	Art. Tobillo
Pie	1,5%	44,90%	Talón	Dedo 1º

Tabla 5 Parámetros inerciales determinados por Dempster y Clauser. Fuente: Ergonautas.

Observando los datos de la tabla podemos definir tres parámetros útiles para el diseño de prótesis de brazo: Los porcentajes de masa y longitud que corresponden al brazo, al antebrazo y a la mano.

Otro de los aspectos que hay que tener en cuenta para el diseño de una prótesis de brazo es el peso que debe soportar. Por eso es necesario conocer la mecánica del brazo humano y la carga máxima que puede levantar.

El esfuerzo al que se somete la articulación del codo viene dado por dos variables: el peso del antebrazo y la carga sostenida. Para el estudio biomecánico, se asemeja el sistema del brazo a un sistema mecánico en el que se aplican las diferentes fuerzas que intervienen

(Fig. 17). Se procede a estudiar el caso en el que el brazo se encuentra flexionado a 90° ya que es en esta posición en la que se obtiene el mayor momento.

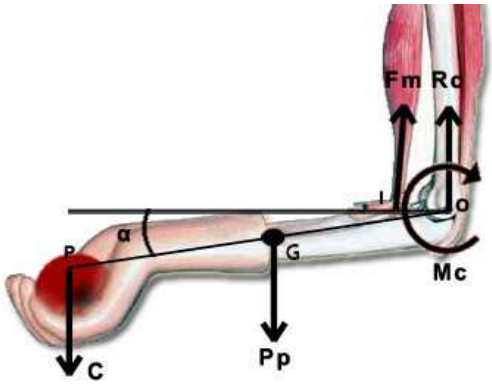


Fig. 17 Esquema de momentos y cargas en el codo. Fuente: Ergonautas.

En el sistema de la imagen se representan los siguientes parámetros:

- C: Carga sostenida.
- Pp: Peso del brazo.
- Rc: Resultante de las cargas C y Pp
- Mc: Momento provocado por C y Pp.
- Fm: Fuerza que genera la contracción de los músculos: bíceps, músculo braquial y braquiorradial.

A partir de este sistema se conoce que la suma de las cargas es igual a la resultante.

$$Rc = C + Pp.$$

Por otro lado, se puede obtener el momento producido de dos formas: como el momento producido por C y Pp y como el momento contrarrestado por Fm.

$$Mc = C \times OP \times \cos(\alpha) + Pp \times OG \times \cos(\alpha)$$

$$Mc = Fm \times IO \times \cos(\alpha)$$

La fuerza máxima de contracción muscular del bíceps es de 136 kg y el segmento IO habitualmente se estima como 0.05 m cuando el brazo está flexionado 90°, por lo que el ángulo α es 0. Por lo tanto, se calcula Mc como:

$$Mc = 135 \times 9{,}8 \times 0{,}05 \times \cos(0) = 66{,}64 \text{ N m}$$

Conociendo Mc y los parámetros del usuario Pp, OP y OG podemos calcular la carga máxima teórica que puede levantar con el brazo y, por lo tanto, la carga que debe soportar la prótesis.

El peso del usuario es de 75 kg, por lo que, con los datos de la Tabla 5, se estima que las masas del antebrazo y de la mano son respectivamente 1,2 kg y 0,525 kg. Se puede obtener Pp como la suma de ambas masas por la gravedad.

$$Pp = (1,2 + 0,525) \times 9,8 = 16,905 \text{ N}$$

La longitud de la palanca OP se obtiene de la suma de la longitud codo-muñeca, que es de 0,25 m medida sobre el usuario, y la longitud muñeca-carga, que se estima de 0,07 m. Por lo tanto, el valor de OP es 0,32 m.

La longitud OG se calcula por adición de la distancia medida desde el punto proximal de los centros de gravedad de la mano y el antebrazo. Según los datos de la Tabla 5, se calcula que el centro de gravedad del antebrazo se encuentra a 25 x 0,3896 = 9,74 cm del codo y que el de la mano se encuentra a 18 x 0,82 = 14,76 cm de la muñeca. Se obtiene que la longitud OG es igual a 24,5 cm.

$$66,64 \text{ Nm} = C \times 0,32 \text{ m} \times \cos(0) + 16,905 \text{ N} \times 0,245 \times \cos(0)$$

$$C = 78,47 \text{ N}$$

La carga máxima teórica que soporta el brazo del usuario es de 78,47 N. Por lo tanto, la masa mayor de un objeto sostenido es de 8 kg.

4.1.3. Estudio crítico de mercado: prótesis de brazo

A continuación, se realiza un estudio de mercado en el que se muestran diferentes productos que se pueden distinguir según la clasificación realizada anteriormente. El objetivo del estudio no es concluir el mejor tipo de prótesis, si no destacar ventajas e inconvenientes que conviertan a los productos en ejemplos de buen o mal diseño.

4.1.3.1. Prótesis estéticas de Jens Muller

Se trata de prótesis cosméticas que se desarrollan con una finalidad puramente estética (Fig. 18). Estas prótesis consisten en un encaje a mediada, un brazo interior y un guante. Los guantes se fabrican teniendo en cuenta las características físicas de cada usuario [2].

Fig. 18 Prótesis estética de mano de Jens Muller. Fuente: Ortopedia Jens Muller.

La principal ventaja de esta prótesis es la apariencia realista que logra en sus diseños (Fig. 19). Además, con los materiales utilizados; termoplásticos, espumas y silicona; se consigue el peso deseado con facilidad. Por otro lado, las prótesis no necesitan un mantenimiento adicional a la limpieza básica del producto.

La principal desventaja de la prótesis es que no tiene movilidad alguna. No permiten la flexión del codo y eso es un inconveniente cuando quieres adoptar ciertas posturas. Por ejemplo, al sentarse a la mesa el usuario permanece con el brazo extendido sin poder apoyarlo cómodamente sobre la mesa.

Fig. 19 Prótesis estética de brazo de Jens Muller. Fuente: Ortopedia Jens Muller.

4.1.3.2. Livingskin de Touch Bionics

Livingskin es una prótesis pasiva funcional que ofrece funciones básicas además de una apariencia natural (Fig. 20 y Fig. 21). Permite realizar acciones tales como empujar, tirar, estabilizar, sujetar, agarrar objetos ligeros y teclear [11].

La apariencia realista, que incluye detalles como pecas, pelo o tatuajes, es la ventaja principal de este producto. Esta marca realiza un gran trabajo de personalización del producto. Además, incluir algunas funciones sencillas incrementa el valor del producto en comparación con otras prótesis estéticas, aunque tampoco permite la flexión del codo.

Fig. 20 Prótesis de brazo Livingskin. Fuente: Touch Bionics.

Aunque tiene una apariencia realista la falta de movimiento y la imposibilidad de variar la posición del antebrazo desvelan su carácter artificial. La principal desventaja es la falta de movilidad que para usuarios primerizos es un aspecto importante.

Fig. 21 Prótesis de mano Livingskin. Fuente: Touch Bionics.

4.1.3.3. ErgoArm plus de Ottobock

ErgoArm plus es un modelo de la serie de codos protésicos ErgoArm de Ottobock. Este modelo se ha diseñado para prótesis mecánicas accionadas por sistemas de tracción (Fig. 22 y Fig. 23). Este producto tiene una función de bloqueo y un sistema auxiliar que almacena la energía liberada durante la extensión del codo para facilitar la flexión posterior.

El bloqueo de la articulación ofrece funciones adicionales como el soporte de cargas de hasta 230 N. Pudiendo soportar peso, la prótesis se convierte en un apoyo para el usuario en su día a día. Tiene un peso de 604 gramos, que sumado al resto de partes de la prótesis es un peso adecuado para el brazo [12].

Fig. 22 ErgoArm plus de Ottobock. Fuente: Ottobock.

Este producto tiene varias ventajas. Siendo una articulación mecánica el accionamiento de esta resulta muy cómodo y sencillo gracias a su sistema auxiliar. Además, con el bloqueo, permite una postura distinta a la de brazo extendido que, aun perdiendo la estética realista, ofrece un uso más natural.

Esta prótesis dispone sistemas mecánicos y por lo tanto requiere cierto mantenimiento, al contrario que los productos anteriores. Eso puede suponer un incremento en el precio a largo plazo y una desventaja. Por otro lado, el producto no es personalizable y las dimensiones pueden ser inadecuadas para algunos usuarios con brazos más delgados o gordos.

Fig. 23 ErgoArm plus en prótesis completa. Fuente: Ottobock.

4.1.3.4. Prótesis de Max Okun de Arm Dynamics

Max Okun es un paciente de Arm Dynamics que nació sin brazo izquierdo. Esto no le impidió ser un aficionado al fitness y llegar a ser levantador de peso y entrenador personal. Para lograr sus objetivos Arm Dynamics diseñó una prótesis personalizada para su actividad dentro del gimnasio [13]. Se trata de una prótesis multifuncional con diversos terminales especiales para cada actividad (Fig. 24 y Fig. 25): levantar peso, hacer flexiones, utilizar las máquinas, etc.

Fig. 24 Max Okun con su prótesis de Arm Dynamics. Fuente: Arm Dynamics.

Una de las ventajas de este diseño es que logra un alto grado de utilidad sin necesidad de sistemas mioeléctricos, la prótesis es completamente mecánica y no utiliza sistemas de tracción. La prótesis es capaz de soportar el peso del usuario y realizar movimientos con naturalidad ya que tiene articulaciones con grados de libertad parecidos al brazo humano. Otra ventaja que destacar de esta prótesis es que se sujeta al cuerpo sin el uso de arneses. Esto elimina las posibles molestias que puede originar el uso continuado de las correas.

Fig. 25 Max Okun con prótesis en posición de flexión. Fuente: Arm Dynamics.

4.1.3.5. DynamicArm de Ottobock

DynamicArm es una prótesis mioeléctrica que utiliza las señales musculares del usuario para accionar, mediante motores eléctricos, las articulaciones del codo y la muñeca y controlar el movimiento de la mano [3].

La principal ventaja de DynamicArm es la funcionalidad que logra sin perder una apariencia realista, ya que conserva las formas y los colores naturales del brazo humano (Fig. 26). Esto es una ventaja para aquellos que, sin dejar de lado la apariencia, buscan una prótesis funcional (Fig. 27).

Fig. 26 DynamicArm de Ottobock. Fuente: Ottobock.

Sin embargo, la prótesis, aun adaptándose al miembro de cada usuario, tiene un modelo único que, según el tamaño del usuario, puede resultar adecuado, grande o pequeño. Además, las prótesis mioeléctricas precisan cierto mantenimiento y la inclusión de elementos como motores, cable y sensores hacen de esta prótesis un producto más caro y pesado que lo expuestos anteriormente.

Fig. 27 Usuario de DynamicArm. Fuente: Ottobock.

En la Fig. 28 se muestra a un usuario de esta prótesis. Se observa que utiliza un arnés que se sujeta la prótesis alrededor del pecho bajo la axila. Es un tipo de arnés sencillo que utiliza una cinta de velcro para ajustarse. Puede llegar a ser manipulado por el propio usuario, aunque con dificultad. La sujeción resulta cómoda ya que una almohadilla bajo el brazo y otra sobre el hombro previenen de posibles rozaduras.

Fig. 28 Arnés para usuario de DynamicArm. Fuente: Jeff Boonstra.

4.1.3.6. i-limp ultra de Touch Bionics

i-limp ultra destaca por su mano protésica que permite un mayor control sobre el movimiento de cada dedo. Es una prótesis mioeléctrica que permite un movimiento natural de la mano. Los dedos motorizados facilitan ser doblados individualmente para ocupar posiciones propias y así ajustarse mejor a los objetos (Fig. 29). Además, el control sobre la fuerza de agarre es muy preciso [11].

Fig. 29 i-limp ultra de Touch Bionics. Fuente: Touch Bionics.

i-limp ultra tiene algunas características que suponen una ventaja con respecto a otros productos como su función de auto agarre para evitar la caída de objetos o la adopción automática de una postura natural tras un tiempo sin señales. Además, tiene una aplicación móvil (Fig. 30) con acceso a 14 patrones programables para el movimiento de los dedos. Por otro lado, como otras prótesis mioelétricas, requiere mantenimiento y recarga de la batería, que dura aproximadamente cuatro días.

Fig. 30 Aplicación móvil de i-limp ultra. Fuente: Touch Bionics.

4.1.3.7. Luke arm de Mobius Bionics

Luke arm es la única prótesis del mercado con una articulación de hombro accionada eléctricamente. Esta prótesis tiene siete articulaciones mientras que el modelo de prótesis transhumeral tiene cinco articulaciones prescindiendo de las dos que mueven el hombro. Cinco articulaciones permiten una gran libertad de movimientos, ya que tanto en el codo como en la muñeca son posibles los movimientos de flexión y rotación (Fig. 31).

Fig. 31 Luke arm de Mobius Bionics

La mano está diseñada para reproducir diversos agarres, pudiendo sujetar objetos grandes y objetos muy pequeños con gran precisión (Fig. 32). Este producto dispone de herramientas adicionales que facilitan el control de la prótesis. Estas herramientas se llaman Inertial Measurement Units (IMUs) y se colocan sobre el empeine para enviar señales con el movimiento, de modo que el pie funciona como un joystick [14].

Una desventaja de este producto es que es necesaria una fase de aprendizaje para utilizar los dispositivos. Es una prótesis adecuada para aquellos que priorizan la funcionalidad ya que sustituye con éxito las funciones del brazo, aunque se queda lejos de ofrecer una apariencia realista.

Fig. 32 Agarre de precisión de Luke arm

Este producto utiliza un arnés que consiste en varias correas que sujetan la prótesis en el hombro, el pecho y la cintura. Esto ofrece una buena sujeción, pero el usuario no puede colocarse la prótesis sin ayuda. El arnés también aloja algunos dispositivos de funcionamiento de la prótesis (Fig. 33).

Fig. 33 Arneses de Luke arm. Fuente: DarpaTV.

4.1.4. Análisis de los condicionantes

Los condicionantes son las características del diseño que no dependen de los objetivos del proyecto o de los deseos y necesidades del usuario, sino que vienen dados de forma inmediata por la definición del proyecto. En el proyecto de una prótesis de brazo se establecen los siguientes condicionantes:

- Tamaño del brazo: Una prótesis de brazo sustituye al miembro y por lo tanto debe mantener algunas dimensiones. La longitud del brazo y antebrazo han de ser iguales para ofrecer el mismo alcance. Las dimensiones de la mano o gancho se han de establecer teniendo en cuenta las dimensiones reales en la posición que se desea reproducir. Por último, las dimensiones diametrales del brazo no se mantienen necesariamente ya que responden a las características del material utilizado. Aun así, no deben superar las dimensiones del brazo humano.
- Peso del brazo: El peso de la prótesis ha de mantenerse entre un intervalo marcado por la variabilidad de peso del brazo del usuario. De este modo se restaura el centro de gravedad conservando la postura y el modo de andar del usuario.
- Movilidad del brazo: Con el objetivo de reproducir con fidelidad el miembro ausente, se limita el grado de libertad de los movimientos de la prótesis al existente en un brazo humano. Esta medida establece un máximo, pero no un mínimo, permitiendo la realización de prótesis con menos grados de libertad en sus articulaciones.

4.2. Estudios relativos a la situación particular

4.2.1. Análisis de las necesidades del usuario

La situación particular que este proyecto aborda es el caso de un adulto experimentado en el uso de prótesis de brazo. Hasta el momento el usuario ha utilizado prótesis estéticas con movilidad en la articulación del codo. Se desea desarrollar una prótesis con un grado mayor de utilidad teniendo en cuenta que el usuario está adaptado al uso de una prótesis con funciones reducidas y por tanto no necesita suplir completamente las funciones del brazo, sino una prótesis que sirva de apoyo al otro brazo. Se han reunido los siguientes requerimientos en base a las necesidades del usuario:

- Articulación del codo: Se requiere una articulación que permita fijar posiciones para acomodar la prótesis a diferentes situaciones.
- Mano útil: Más allá de una función estética, se requiere una mano o gancho con una función de agarre para una mayor utilidad de la prótesis.
- Comodidad: Es importante que la prótesis se adapte bien y no suponga una molestia en el usuario.
- Manejabilidad: El uso de la prótesis ha de ser sencillo. Se debe evitar que usar la prótesis suponga una mayor dificultad que realizar la acción sin la prótesis.
- Estética: Se requiere cuidar la estética del producto sin necesidad de asemejarla a una estética realista.
- Precio: Se busca un precio menor que el de las prótesis del mercado.

4.2.2. Determinación del tipo de prótesis en función al usuario

A continuación, se valora la relación de cumplimiento de los requerimientos del usuario para cada uno de los tipos de prótesis. Las prótesis mecánicas se valoran diferenciándolas según el tipo de accionamiento. Las siguientes tablas (Tabla 6 ,Tabla 7 ,Tabla 8 y Tabla 9) reflejan los requerimientos antes explicados, una valoración cualitativa del cumplimiento del requerimiento y una valoración cuantitativa. La valoración cuantitativa se realiza con los valores: 1 (no cumple o cumple en muy pocos casos), 3 (cumple en algunas situaciones), 5 (cumple en la mitad de las situaciones), 7 (cumple con algún inconveniente) y 9 (cumple el requerimiento en la mayoría de las situaciones). Finalmente se indica una valoración global que consiste en la media ponderada teniendo en cuenta la importancia (Imp) de los requerimientos que se refleja con valores de 1 (sin importancia) a 5 (muy importante) y la ponderación (Pon.) que son los valores de Importancia en forma porcentual del 0 al 1.

PRÓTESIS ESTÉTICAS				
REQUERIMIENTOS	IMP.	RELACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS	PTS.	PON.
Articulación del codo	5	En general las prótesis estéticas no permiten la articulación del codo.	1	0,2
Mano útil	5	Funciones básicas con poco movimiento.	3	0,2
Comodidad	5	Se adapta bien al usuario. Algo incomoda en situaciones en las que es conveniente flexionar el codo.	5	0,2
Manejabilidad	4	Fácil de manejar para funciones básicas. No requiere una fase de aprendizaje. Los movimientos los realiza el hombro por lo que son limitados.	7	0,1
Estética	4	Estética realista. Imita perfectamente el aspecto del brazo del usuario. El usuario no requiere una estética realista.	1	0,1
Precio	5	Precio muy alto por ser un producto personalizado.	1	0,2
Valoración global	28	Este tipo de prótesis no cumple muchos de los requerimientos.	2,7	

Tabla 6 Relación entre los requerimientos del usuario y las prestaciones de las prótesis estéticas

PRÓTESIS MECÁNICAS DE ACCIONAMIENTO MANUAL				
REQUERIMIENTOS	IMP.	RELACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS	PTS.	PON.
Articulación del codo	5	Permite la articulación del codo y su fijación en distintas posiciones.	9	0,2
Mano útil	5	Mano o gancho con algunas funciones.	7	0,2
Comodidad	5	Se adapta bien al usuario. Permite una postura cómoda en diferentes situaciones.	7	0,2
Manejabilidad	4	En algunas situaciones puede ser difícil de utilizar.	5	0,1
Estética	4	No responde a una estética realista. Es fácil cuidar la estética porque no hay que incluir elementos eléctricos.	9	0,1
Precio	5	Menor que otras prótesis.	7	0,2
Valoración global	28	Este tipo de prótesis se aproxima bastante al producto deseado por el usuario.	7,4	

Tabla 7 Relación entre los requerimientos del usuario y las prestaciones de las prótesis mecánicas de accionamiento manual

PRÓTESIS MECÁNICAS DE TRACCIÓN				
REQUERIMIENTOS	IMP.	RELACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS	PTS.	PON.
Articulación del codo	5	Permite la articulación del codo y su fijación en distintas posiciones.	9	0,2
Mano útil	5	Mano o gancho con algunas funciones.	7	0,2
Comodidad	5	Se adapta bien al usuario. Permite una postura cómoda en diferentes situaciones.	7	0,2
Manejabilidad	4	Aunque es necesaria una fase de aprendizaje los mecanismos son fáciles de accionar. Al accionarse con los movimientos del hombro, tiene algunas limitaciones.	7	0,1
Estética	4	En general la estética de estas prótesis no está muy cuidada.	3	0,1
Precio	5	El precio es elevado, aunque menor que otras prótesis.	5	0,2
Valoración global	28	Este tipo de prótesis cumple con muchos requerimientos del usuario.	6,6	

Tabla 8 Relación entre los requerimientos del usuario y las prestaciones de las prótesis mecánicas de tracción

PRÓTESIS MECÁNICAS MIOELÉCTRICAS				
REQUERIMIENTOS	IMP.	RELACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS	PTS.	PON.
Articulación del codo	5	Permite la articulación del codo y el control para fijarlo en cualquier posición.	9	0,2
Mano útil	5	Funciones similares a una mano humana.	9	0,2
Comodidad	5	Se adapta bien al usuario. Permite adoptar posturas naturales.	9	0,2
Manejabilidad	4	Requiere un proceso de adaptación y aprendizaje. Como se acciona por impulsos musculares es muy manejable.	7	0,1
Estética	4	Es más difícil obtener la estética deseada ya que hay que incluir numerosos elementos en el diseño.	5	0,1
Precio	5	Precio muy elevado.	1	0,2
Valoración global	28	Aunque cumple perfectamente algunos requerimientos, incumple otros.	6,8	

Tabla 9 Relación entre los requerimientos del usuario y las prestaciones de las prótesis mioeléctricas

En la siguiente tabla (Tabla 10) se comparan las valoraciones globales de los distintos tipos de prótesis.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS				
	ESTÉTICAS	MANUALES	DE TRACCIÓN	MIOELÉCTRICAS
Valoración	2,7	7,4	6,6	6,8

Tabla 10 Comparación de resultados obtenidos en las tablas 1, 2, 3 y 4

Observando los resultados se puede concretar que el diseño de una prótesis mecánica con accionamiento manual puede alcanzar los requerimientos del usuario ofreciendo un producto más completo que el diseño de otro tipo que prótesis.

4.2.3. Antropometría del usuario

Al tratarse de un diseño personalizado para un usuario concreto se ha realizado un estudio antropométrico del brazo de la persona que va a llevar la prótesis. Además de las dimensiones del brazo, se han tomado las medidas de masa y estatura (Tabla 11). Las medidas se han tomado en cumplimiento de la norma ISO 7250-1:2017, a excepción de aquellas medidas en las que no se dispone del instrumental indicado. En este caso se ha utilizado un instrumento de medida alternativo.

N.º (REF. NORMA)	DESIGNACIÓN	MEDIDA	INSTRUMENTO
Medidas tomadas con el sujeto de pie			
1 (6.1.1)	Masa del cuerpo (kg)	75	Báscula
2 (6.1.2)	Estatura o altura del cuerpo (cm)	178	Cinta métrica
Medidas tomadas con el sujeto sentado (mm)			
3 (6.2.6)	Longitud hombro-codo	340	Cinta métrica
Medidas de segmentos específicos del cuerpo (mm)			
4 (6.3.15)	Longitud del dedo pulgar	65,46	Calibre
5 (6.3.16)	Anchura del dedo pulgar	17,97	Calibre
6 (6.3.4)	Longitud del dedo índice	79,72	Calibre
7 (6.3.5)	Anchura proximal del dedo índice	18,34	Calibre
8 (6.3.6)	Anchura distal del dedo índice	15,47	Calibre
9 (6.3.2)	Longitud de la palma de la mano	111,69	Calibre
10 (6.3.1)	Longitud de la mano	192,38	Calibre
11 (6.3.17)	Grosor de la mano	22,79	Calibre
12 (6.3.18)	Ancho de la mano incluyendo dedo pulgar	104,89	Calibre
13 (6.3.3)	Ancho de la mano en metacarpianos	82,45	Calibre
14 (6.3.20)	Perímetro del antebrazo flexionado (cm)	29	Cinta métrica
Medidas funcionales			
15 (6.4.3)	Longitud codo-muñeca	250	Cinta métrica
16 (6.4.6)	Longitud antebrazo-punta de los dedos	442	Cinta métrica
17 (6.4.12)	Perímetro de la muñeca	16	Cinta métrica

Tabla 11 Medidas antropométricas del usuario.

4.3. Proceso de diseño: prototipado rápido

Como se ha mencionado anteriormente, este proyecto se realiza para Autofabricantes. El equipo de trabajo y el desarrollo del proyecto tienen lugar en un laboratorio de fabricación. Por ello, durante el proceso de diseño se utilizarán técnicas de prototipado rápido.

El prototipado rápido es un conjunto de tecnologías que permiten la obtención de prototipos a partir de modelos CAD de objetos 3D en muy poco tiempo [15]. Los prototipos creados guardan una gran fidelidad con el producto final. Esta técnica se puede utilizar para varios fines:

- Evaluar aspectos estéticos y ergonómicos.
- Comprobar la geometría y la forma.
- Probar el funcionamiento de los mecanismos y ensambles.
- Evaluar las funciones del producto.

4.3.1. Tecnologías de prototipado rápido: Fabricación aditiva

Entre las tecnologías de prototipado rápido destaca la fabricación aditiva. La estereolitografía (SLA) fue uno de los primeros métodos utilizados. Actualmente existe multitud de métodos basado en la fabricación por adición de capas de material: Modelado por Deposición Fundida (FDM), Sinterización Láser Selectiva, Laminación de Deposición Selectiva (SDL), Inyección de Vinculación, Inyección Triple (Polyjet), Procesamiento de Luz Digital (DLP), Fusión por Haz de Electrones (EBM) [15].

A continuación, se describen brevemente los métodos de SLA y FDM, que son, los dos métodos accesibles en la realización de este proyecto.

La estereolitografía es una tecnología láser que endurece de forma selectiva capas de resina líquida. La pieza generada se crea de abajo a arriba, necesitando en ciertas ocasiones apoyos que la sustenten [16].

El modelado por deposición fundida es el método más asequible por su disponibilidad y su precio. Esta tecnología se basa en la fundición un filamento de material termoplástico y su deposición y endurecimiento por capas para formar piezas desde una base. Al igual que la estereolitografía, a veces, se necesitan apoyos para la sujeción de las piezas [15].

5. Diseño

5.1.Pliego de condiciones

A continuación, se exponen los objetivos de diseño que se quieren alcanzar. Estos objetivos complementan o incluyen los condicionantes y las necesidades del usuario, teniendo en cuanta los estudios realizados anteriormente.

1. Se desea diseñar una prótesis mecánica con sistemas de accionamiento manual.
2. Se pretende que la prótesis realice todos los movimientos articulares correspondientes al codo: flexión, extensión, pronación y supinación.
3. La articulación del codo ha de tener tres posiciones de flexión-extensión posibles y tres posiciones de supinación-pronación.
4. Las funciones de agarre de la mano deben incluir como mínimo los agarres gruesos: cilíndrico, esférico y enganche.
5. Todos los mecanismos de la prótesis tienen que ser manejables con una sola mano.
6. Se procura, en la medida de lo posible, sustituir piezas de diseño original por piezas normalizadas.

5.2. Desarrollo de los componentes de la prótesis

5.2.1. Articulación del codo

La articulación del codo consiste en dos partes que rotan alrededor de un eje y cuyo movimiento relativo se fija en tres posiciones. En primer lugar, se consideran diferentes formas de bloquear la rotación. Se pueden agrupar en dos categorías: Bloqueo en la dirección perpendicular al plano de giro y bloqueo en una dirección contenida en el plano de giro (Fig. 34).

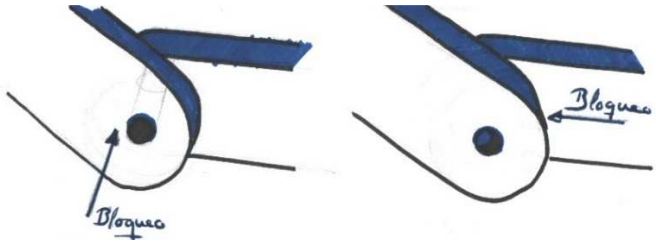


Fig. 34 Direcciones de bloqueo del codo.

A raíz de estas dos categorías se plantean dos soluciones. La primera pertenece a la primera categoría. El diseño propone dos piezas de forma prismática con un extremo redondeado (Fig. 35). Estas piezas se unen por la parte redondeada a través de un eje. La pieza superior tiene agujeros donde se aloja el bloqueador sujetado por la pieza inferior. El bloqueador utiliza un resorte de compresión para mantener la posición de bloqueo. Para desbloquear el giro, el usuario tira del bloqueador.

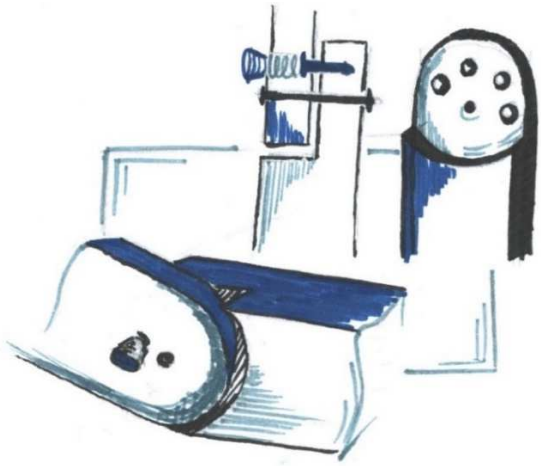


Fig. 35 Articulación del codo: propuesta de diseño 1.

Esta opción fue descartada por varias razones tras imprimir un prototipo. Se observó que el diseño trata de incluir el resorte en un espacio reducido que no permite la instalación de un muelle suficientemente largo. Para incluirlo sería necesario aumentar el espesor de las piezas y quedaría un conjunto muy ancho para una prótesis de brazo. Por otro lado, se ha observado que el bloqueador estaría sometido a una tensión de cortadura de forma constante. Finalmente, el modo de uso no es cómodo para una sola mano.

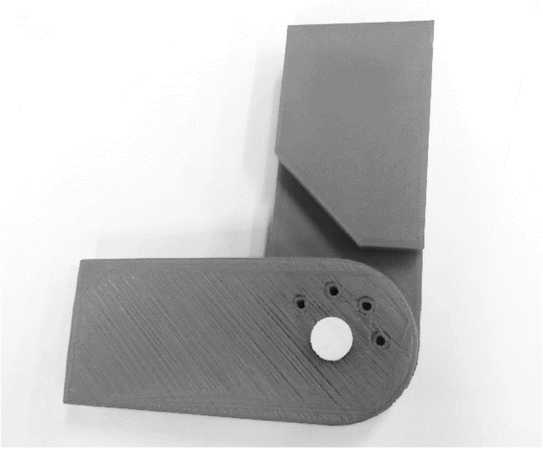


Fig. 36 Articulación del codo: prototipo de la propuesta 1.

La segunda solución que se contempló pertenece a una compañera del equipo de trabajo y se incluye en la segunda categoría. Consiste en dos piezas circulares unidas a través de un eje (Fig. 37). La pieza interior dispone de tres muescas redondeadas, como las que se encuentran en los engranajes comunes. La pieza exterior tiene un saliente con un agujero en su extremo a través del cual desliza el bloqueador. El extremo del bloqueador encaja en las muescas descritas. Un resorte de compresión mantiene la posición de bloqueo. El giro de la articulación se libera tirando del bloqueador.

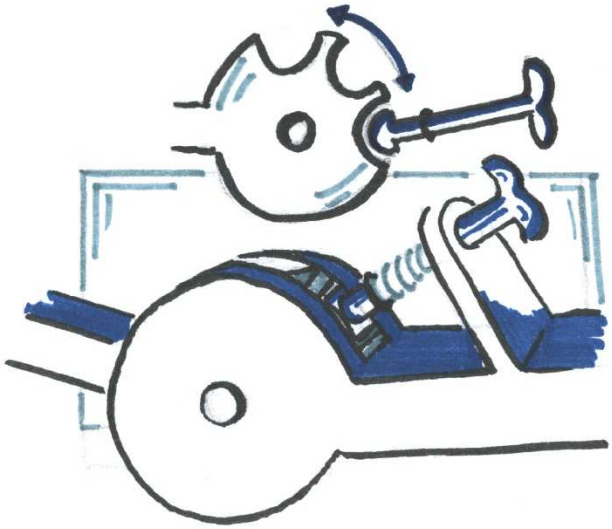


Fig. 37 Articulación del codo: propuesta de diseño 2.

Con este diseño, se observa que el bloqueo en esta dirección permite una mayor libertad en el diseño, ya que el espacio disponible en el plano de giro es mayor. Sin embargo, existen varios inconvenientes por los cuales el diseño no es válido. Tras imprimir un prototipo del mecanismo se observó que el modo de uso no es cómodo para una sola mano. Además, el espacio ocupado por la pieza exterior y el bloqueador es excesivo. Finalmente, la geometría y la posición del bloqueador no son idóneos para su función. El bloqueador es estrecho además de largo, lo que hace que el momento generado por la carga en esta pieza sea mayor de lo que podría ser con un diseño más compacto.

Fig. 38 Articulación del codo: prototipo de la propuesta 2.

Las siguientes propuestas son de diseño propio. Los aspectos positivos que se mantienen del diseño anterior son la dirección de bloqueo, el sistema de bloqueo con muescas en la pieza interior y la disposición de las dos piezas por la cual la superior queda introducida en la pieza inferior. Esta disposición favorece el giro de la articulación porque el eje hace presión sobre los laterales de una sola pieza mientras que la otra gira sin presión alguna.

A continuación, se busca una colocación del bloqueador con respecto al resto de piezas que compacte el diseño y minimice los esfuerzos. El siguiente diseño comienza por preguntarse cuál es la manera más cómoda de accionar el mecanismo y girar el brazo al mismo tiempo. La manera cómoda será la más parecida a agarrar el antebrazo con la mano y flexionarlo. Una acción sencilla que incorporar a esa acción es presionar un botón. Sin embargo, la acción tirar, vista en las dos propuestas anteriores, es difícilmente compatible con sujetar el antebrazo. Se ha llegado a la conclusión de que lo más sencillo es realizar presión con el dedo pulgar mientras se maneja la prótesis con la mano.

Buscando un mecanismo con fuerza accionado por presión aparece la figura de la pinza. Este mecanismo basado en el muelle de torsión puede ejercer bastante fuerza y requiere un esfuerzo leve por parte del usuario. En la siguiente propuesta de diseño se trata de incorporar este mecanismo para el bloqueo de la articulación.

Fig. 39 Articulación del codo: sistema de pinza.

La propuesta de diseño consiste en un mecanismo de pinza formado por el bloqueador y la pieza inferior de la articulación (Fig. 40). Se acciona presionando el bloqueador por el extremo sobresaliente. El extremo contrario de este se encaja en las muescas de la pieza superior. Se ha observado que en función de la posición del bloqueador el mecanismo puede funcionar o no. Existen posiciones en las que la dirección de giro de la articulación

es opuesta a la fuerza ejercida el bloqueador, de manera que la pinza de abre al forzar el giro y no existe bloqueo. La intención de giro de la articulación debe tirar del bloqueador imposibilitando el giro. Por ello se ha modificado la geometría final del bloqueador. El bloqueador, con el extremo en forma de gancho y su eje en la posición determinada, funciona adecuadamente.

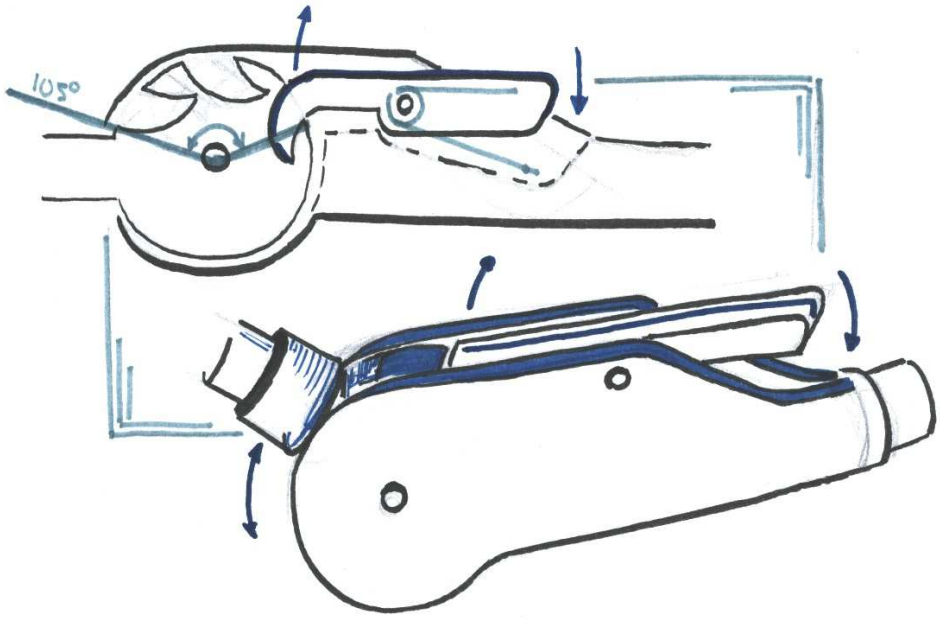


Fig. 40 Articulación del codo: propuesta de diseño 3.

Hay que observar que el espacio de giro entre el extremo del bloqueador y la unión al brazo determinan el ángulo posible de giro de la articulación (Fig. 40). Los ángulos que forma el antebrazo en las tres posiciones son: 0°, 52.5° y 105°. El ángulo de 0° define la posición de extensión, el ángulo de 105° define la posición de flexión en la que el brazo y el antebrazo forman un ángulo de 75° y el ángulo de 52.5° define una posición de flexión intermedia. Para lograr esa apertura se ha desplazado el eje de la articulación con respecto a las uniones al brazo y antebrazo, y ya no está alineado con ellas en la posición 0°.

Por último, se han adaptado los extremos de ambas piezas, superior e inferior, para la unión con los tubos cilíndricos que conforman el brazo y el antebrazo. Con la impresión de un prototipo se ha podido comprobar el buen funcionamiento del mecanismo, habiendo incluido unos ejes provisionales y un resorte.

Fig. 41 Articulación del codo: prototipo de la propuesta 3.

5.2.2. Mano o gancho

Según el pliego de condiciones la mano o gancho debe cumplir funciones que sustituyan, como mínimo, los agarres gruesos de la mano. A continuación, se explica cómo la geometría de la mano se ha ido adaptando a las funciones requeridas.

El agarre cilíndrico consiste en la capacidad de sujeción de objetos de forma cilíndrica o similares. Dicha sujeción debe realizarse sin ningún apoyo externo, por lo tanto, la mano protésica tiene que ejercer la fuerza de agarre de forma continua. Además, debe poder adaptarse a objetos de diferentes tamaños. Para el cumplimiento de estos requisitos se propone un agarre de tipo pinza. La superficie de contacto de la mano con los objetos tiene forma cilíndrica, para favorecer el agarre cilíndrico (Fig. 42).

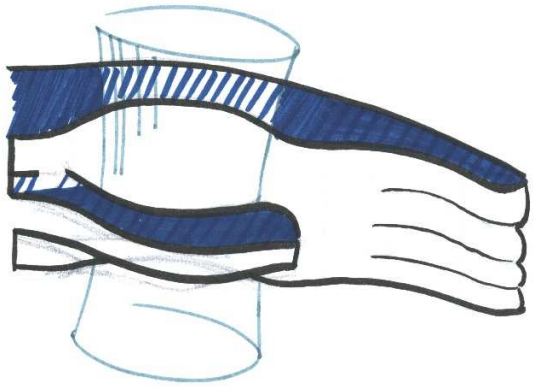


Fig. 42 Mano: diseño de agarre cilíndrico.

La pinza está formada por la palma y el pulgar. La pinza mantiene ambas partes en posición cerrada o de sujeción mediante el muelle de torsión situado en el eje de unión de ambas partes (Fig. 43). Los brazos del muelle se alojan en dos cavidades, una en el pulgar y otra en la parte de la palma más cercana a la muñeca.

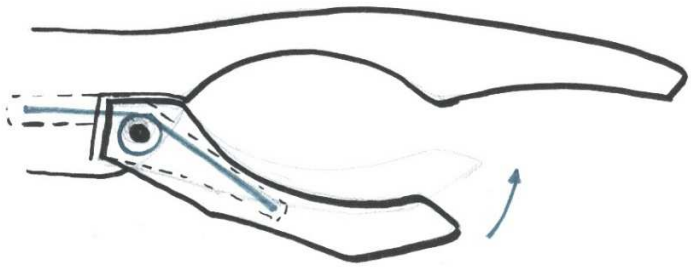


Fig. 43 Mano: sistema de pinza.

El agarre esférico consiste en la capacidad de sujeción de objetos de forma esférica o similares. Para incluir esta función, se propone una modificación del diseño anterior. Una concavidad en el centro de la palma permite el agarre de este tipo. Además, un agujero en el pulgar puede facilitar el agarre de algunos objetos esféricos o irregulares. Por último, para mejorar la capacidad de agarre se ha situado el pulgar en el centro de la palma (Fig. 44).

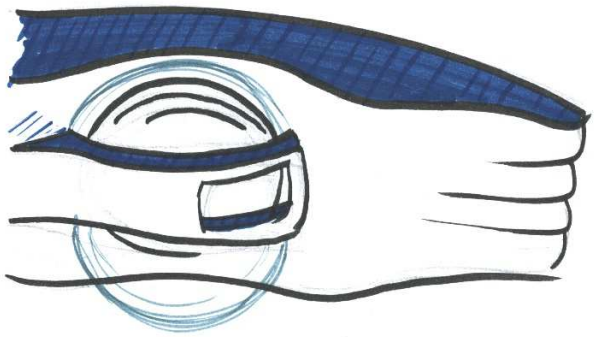


Fig. 44 Mano: diseño de agarre esférico.

En esta parte del proceso de diseño se pretende conservar, en la medida de lo posible, las dimensiones y formas de la mano humana. Por ello, la pinza antes descrita toma la apariencia de mano humana, incluyendo las dimensiones principales y la forma del contorno de la mano. Por otro lado, se plantea la posibilidad de incluir los dedos de la mano. Sin embargo, se ha considerado que, carentes de movimiento, los dedos por separado pueden cumplir las funciones requeridas de la misma forma que lo harían juntos. En consecuencia, el diseño incluye los dedos, pero de forma conjunta sin diferenciar los cuatro dedos (Fig. 45).

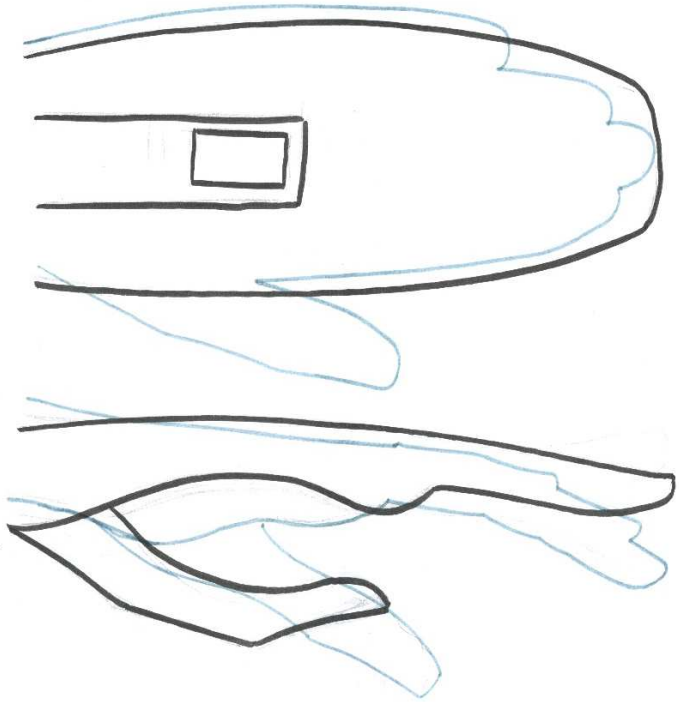


Fig. 45 Aproximación geométrica de la mano.

El agarre de enganche consiste en la capacidad de sujetar objetos que se enganchan en los dedos flexionados de la mano. Con el objetivo de incluir esta función se plantea si los dedos de la prótesis se pueden mantener extendidos o si, por lo contrario, se mostrarán flexionados. Surgen en consecuencia, dos propuestas de diseño.

La primera propuesta consiste en mantener los dedos de la prótesis extendidos y generar, a través de ellos, una forma de gancho que cumpliría la función. De este modo, se mantiene una postura de la mano natural (Fig. 46). Sin embargo, esta propuesta se ha descartado porque, aun manteniendo una postura adecuada, el aspecto final no resulta natural como se esperaba. Además, se intuye que la resistencia del gancho de la segunda propuesta será mayor.

Fig. 46 Mano: diseño de agarre de enganche 1.

La segunda propuesta consiste en cambiar la posición de los dedos flexionándolos, formando, así, el gancho donde colocar los objetos. Aunque no es una posición de descanso habitual, es la posición más natural para la realización de esta función (Fig. 47).

Fig. 47 Mano: diseño de agarre de enganche 2.

5.2.3. Articulación de la muñeca

La articulación de la muñeca permite los movimientos articulares de pronación y supinación. Así que la articulación debe, por un lado, permitir el giro de la mano y, por otro lado, fijar la mano en tres posiciones: neutra, pronación y supinación.

Se propone que la terminación de la mano se modifique para generar un eje de rotación cuyo extremo sea de mayor diámetro para oponerse al movimiento axial. Esto implica modificar la terminación de la mano hasta lograr una forma circular en el extremo (Fig. 48). La pieza que corresponde a la muñeca, de forma cilíndrica, debe tener un agujero donde este eje gire o quede bloqueado.

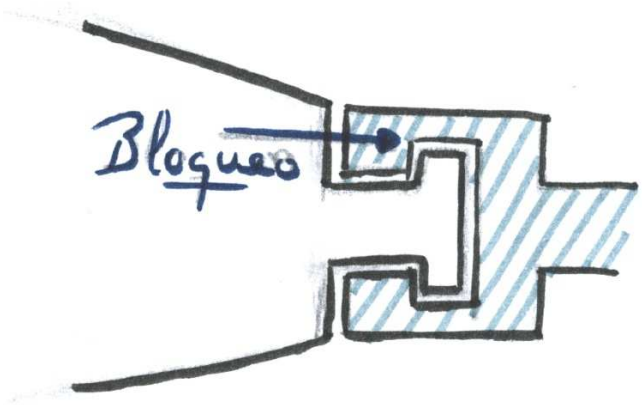


Fig. 48 Dirección de bloqueo de la muñeca.

En cuanto a la función de bloqueo, se ha determinado que el bloqueador debe estar en la parte de la mano. De este modo se podrá accionar con la misma mano que se gira la mano protésica, respetando así una de las condiciones de diseño.

En el desarrollo del diseño del bloqueador de la muñeca surgen dos propuestas de bloqueo perpendicular al plano de rotación. Las propuestas se diferencian por el modo en que se accionan, la primera por presión del bloqueador y la segunda por desplazamiento de este.

Para la primera propuesta el eje es parte de la muñeca y el agujero parte de la mano, al contrario que la propuesta inicial de diseño. El bloqueador, con forma alargada, tiene un saliente en el extremo que, en posición de bloqueo, está encajado en uno de los tres agujeros posibles situados en el interior de la parte más ancha del eje. La pieza se encuentra en posición de bloqueo gracias a un resorte de compresión y el giro se libera presionándola y comprimiendo el muelle (Fig. 49).

Esta propuesta ha sido descartada por varias razones. En primer lugar, la disposición del eje y el agujero limita el espacio disponible para estos y, además, aumenta la complejidad del montaje. Por último, el sistema de bloqueo complica el diseño del eje pudiendo llegar a debilitarlo.

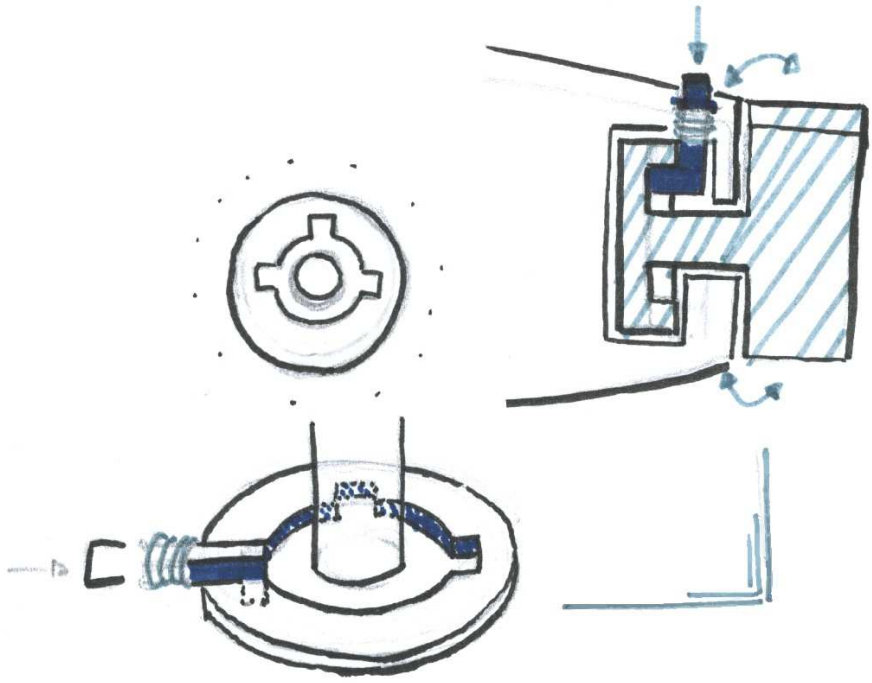


Fig. 49 Articulación de la muñeca: propuesta de diseño 1.

La segunda propuesta mantiene la disposición del eje y el agujero descrita al inicio del desarrollo. El bloqueador, con una forma más compleja que el anterior, desliza a través de una ranura ubicada en la mano en oposición a un muelle de compresión. En posición de bloqueo, esta pieza se introduce en uno de los tres agujeros posibles situados en la base de la muñeca (Fig. 50).

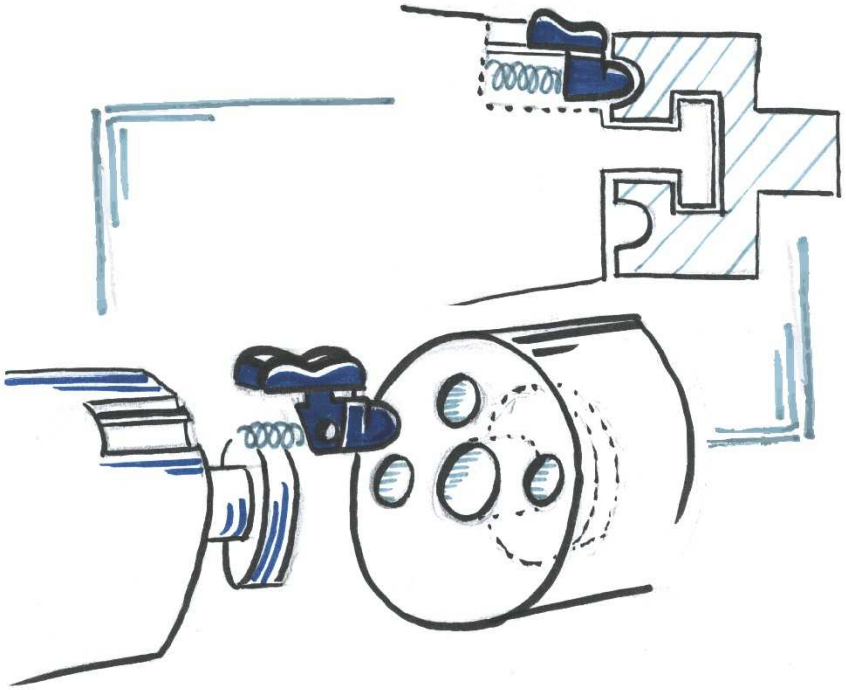


Fig. 50 Articulación de la muñeca: propuesta de diseño 2.

La geometría del bloqueador ha evolucionado a lo largo del desarrollo de diseño. En una primera aproximación, la parte en contacto con el dedo tenía mayor volumen y curvas más acentuadas para un buen agarre. Pero, se observó que esta geometría sobresale demasiado de la mano y desentona en el diseño del conjunto. Sin perjudicar el agarre, se ha simplificado la geometría. El extremo que encaja en los agujeros de la muñeca también ha cambiado. Después de tener forma semiesférica se ha modificado para dar una mayor continuidad a la geometría de la pieza (Fig. 51). Por último, se han incorporado dos pequeños agujeros, en el bloqueador y en el fondo de la ranura, para encajar el muelle.

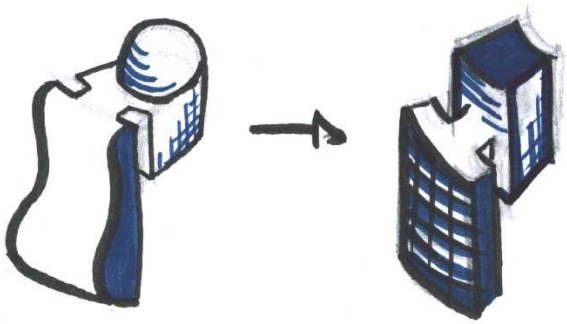


Fig. 51 Articulación de la muñeca: desarrollo de diseño del bloqueador.

5.2.4. Unión entre articulaciones

La unión entre las articulaciones es una parte del diseño alargada que debe resistir los esfuerzos a los que se va a someter la prótesis. Sin embargo, se deja de lado cualquier intención estética, ya que esta parte de la prótesis estará cubierta por una carcasa embellecedora.

Para realizar esta función se propone la utilización de un tubo de sección cilíndrica (Fig. 52). Esta es una geometría de resistencia conocida por su reparto equitativo de las cargas sobre sus paredes. Se utilizarán tubos huecos y no macizos ya que no se requiere una resistencia mayor y, además, son más ligeros.

Para determinar las dimensiones de los tubos se deben tener en cuenta varios aspectos. Por un lado, el diámetro del tubo debe ir en concordancia con el diseño de las articulaciones y, al mismo tiempo, se debe evitar el sobredimensionado. Por otro lado, la longitud del tubo será la necesaria para alcanzar la longitud mano-codo necesaria.

Se propone una unión entre el tubo y las articulaciones por medio de pasadores. Estos atraviesan el tubo y las terminaciones de las piezas requeridas. Estas terminaciones tienen forma cilíndrica para encajar por dentro del tubo y tienen un agujero transversal para insertar el pasador.

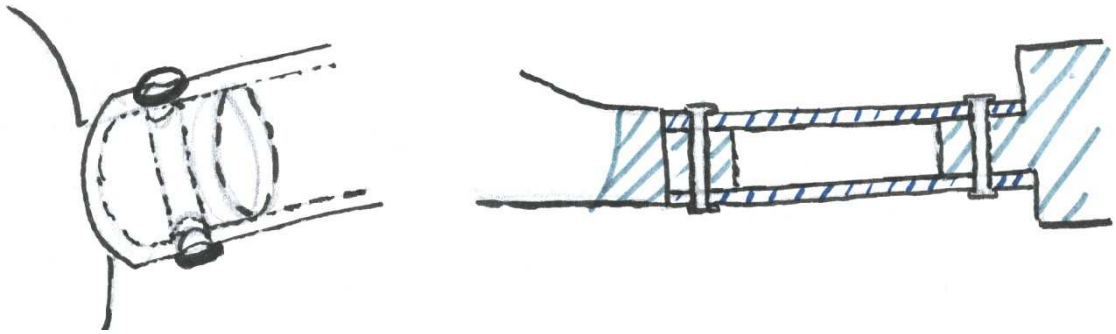


Fig. 52 Unión entre articulaciones.

5.2.5. Carcasa

En el diseño de la carcasa predomina la función formal frente a la funcional ya que esta pieza es un embellecedor del producto. Aun así, la carcasa tiene que cumplir varias condiciones y requerimientos.

En cuanto a la forma, la intención de diseño es respetar las dimensiones principales del brazo. Sin embargo, no se busca una forma realista ya que la mano tampoco la tiene. Por eso, no se mantienen las asimetrías naturales que provocan los músculos y se considera el antebrazo como una pieza con un plano de simetría. Otro requisito que afecta a la forma es que la carcasa no debe impedir el manejo de la prótesis. Por lo tanto, tendrá un acceso al bloqueador del codo, dejará el bloqueador de la muñeca libre y permitirá el giro del codo dejando hueco para el desplazamiento del brazo (Fig. 53).

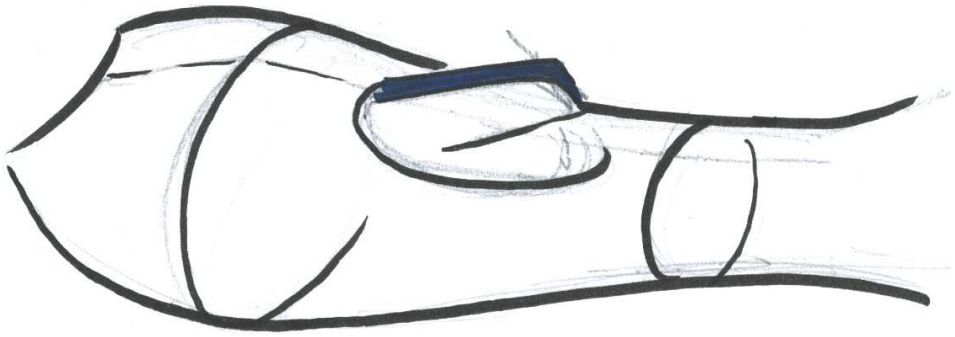


Fig. 53 Carcasa

Una vez se ha obtenido la forma deseada, se procede a diseñar el montaje de la carcasa sobre la prótesis. La carcasa es la última pieza de la prótesis en ser montada y debe poder desmontarse con facilidad para poder acceder al interior en caso de reparación o mantenimiento. Al ser mayor el tamaño de la mano y del encaje es necesario dividir la carcasa en varias partes. La propuesta es dividirla en las dos partes que separa el plano de simetría.

Fig. 54 Carcasa: división en dos mitades simétricas.

Ambas piezas deben tener puntos de unión con la prótesis y se ha pensado que estos puntos pueden estar en contacto con la muñeca y con el codo. Los dos puntos tienen que limitar el desplazamiento y la rotación en todas las direcciones, por lo tanto, se considera que cada punto debe limitar entre una y tres de las direcciones principales. Por ejemplo, una pieza cuadrada (Fig. 55) que se ajusta dentro de un agujero bloquea dos direcciones de desplazamiento y cualquier rotación y, si el ajuste tiene suficiente presión, también fija la tercera dimensión.

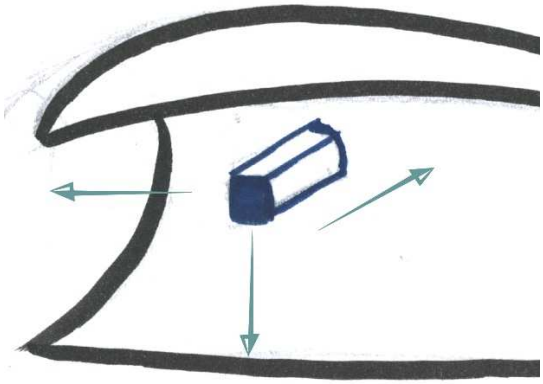


Fig. 55 Carcasa: direcciones de bloqueo sin rotación 1.

Para asegurar la dirección que ha quedado más libre, el segundo punto de unión debe limitar, al menos, esa dirección. Un eje perpendicular a un plano que contiene esta dirección la bloqueará. En la superficie circular de la muñeca se puede incorporar este tipo de fijación (Fig. 56). Este eje limita el desplazamiento en las direcciones contenidas en el plano perpendicular al eje de la muñeca. Con estos dos puntos de apoyo cada mitad de la carcasa queda fija con respecto al resto de la prótesis.

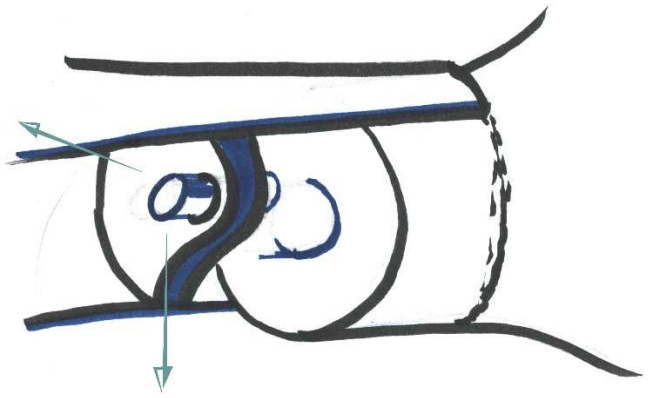


Fig. 56 Carcasa: direcciones de bloqueo 2.

5.2.6. Encaje

Para el diseño del encaje se dispone del encaje de una prótesis anterior del usuario que está hecha a medida. En el equipo de trabajo, un compañero se ha encargado de digitalizar este encaje. A partir del modelo digitalizado se trata de diseñar el anclaje de esta pieza al resto de la prótesis y al arnés (Fig. 57).

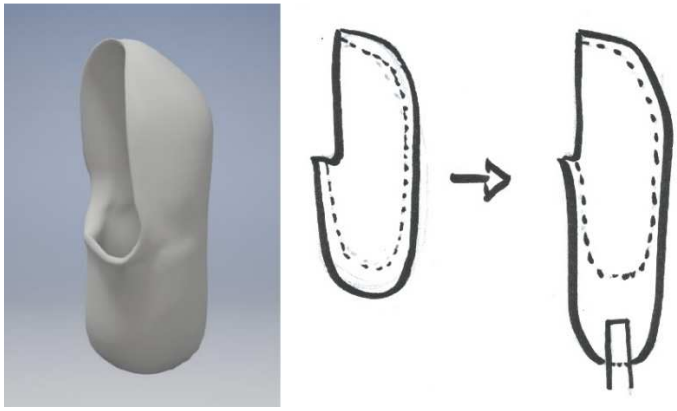


Fig. 57 Diseño de encaje a partir de digitalización.

Una primera propuesta consiste en utilizar una rosca para unir el encaje al tubo. La terminación del tubo estaría roscada y se incluiría un agujero roscado para insertar el tubo (Fig. 58). Sin embargo, se ha descartado, ya que una rosca puede ser fácil de soltar o aflojar con el uso diario de la prótesis.

Fig. 58 Unión de encaje: propuesta 1.

Surge entonces la propuesta de fijar ambas partes con un eje trasversal. Se mantiene la idea de incluir un agujero en el encaje donde se inserte el tubo, pero quedarían fijos gracias a un pasador o tornillo (Fig. 59).

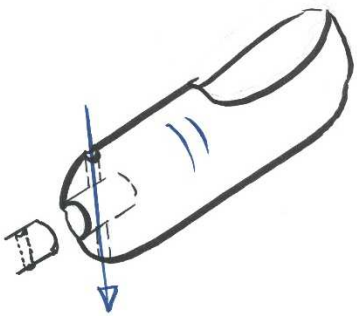


Fig. 59 Unión de encaje: propuesta 2.

5.2.7. Arnés

Después de haber visto varios métodos de sujeción de la prótesis se considera rediseñar el arnés visto anteriormente en la Fig. 27 que consiste en una correa que sujeta la prótesis al tronco del usuario pasando por debajo del brazo.

Se propone una variación en la parte del arnés que se une al encaje, unificándola en una pieza textil que cubre el hombro y parte del brazo y se sujeta en tres o cuatro puntos (Fig. 60). El material textil debe ser fuerte y con algo de rigidez para sujetar el encaje sin deformarse mucho, pero a la vez debe tener cierta elasticidad para adaptarse a las formas.

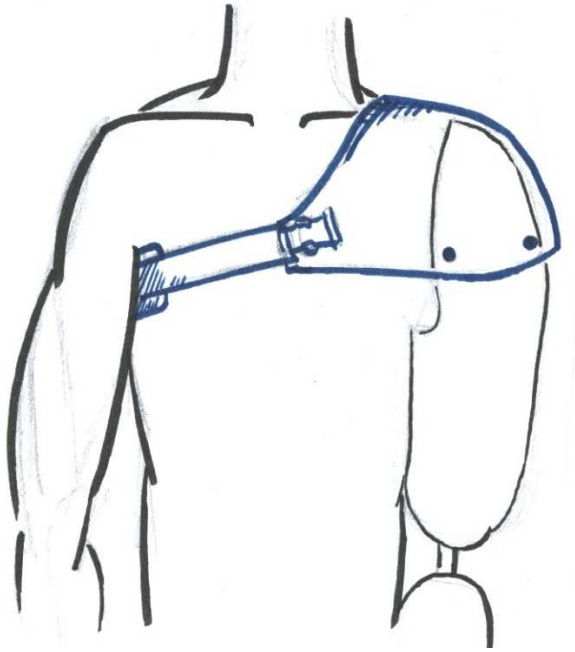


Fig. 60 Arnés: posición.

Uno de los aspectos más importantes del arnés es la comodidad. Al igual que el arnés de referencia, se mantiene en este un cojinete en la parte bajo el brazo para disminuir las rozaduras (Fig. 61). Además, el arnés tiene que ser fácil de abrochar con una mano. Por eso se ha situado el cierre en la parte delantera.

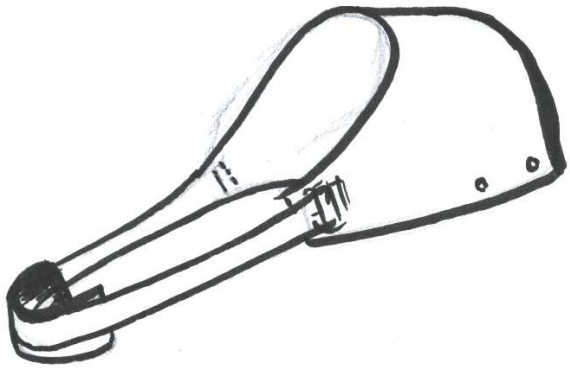


Fig. 61 Arnés: propuesta de diseño.

5.3. Diseño final de los componentes de la prótesis

5.3.1. Articulación del codo

La articulación del codo está formada, principalmente, por tres piezas. Además de los elementos de unión y un resorte. Las tres piezas, nombradas según las partes del brazo o la función de la pieza, son: húmero, extensor radial y bloqueador.

El húmero (Fig. 62) es la parte de la articulación que se une con la parte superior de la prótesis. Consiste en una pieza de forma circular con un agujero en el centro que permite la unión al extensor radial a través de un eje. Además, consta de tres muescas donde el bloqueador se encaja para frenar el giro del codo.

Fig. 62 Partes del codo: Húmero.

El extensor radial (Fig. 63) es la parte de la articulación que se une con la articulación de la muñeca. Esta pieza sirve de soporte para el bloqueador y, junto a este, realiza la función de bloqueo. Para ello se utiliza un resorte de torsión que fuerza al bloqueador a mantenerse encajado en una de las muescas del húmero.

Fig. 63 Partes del codo: Extensor radial.

El bloqueador (Fig. 64) es la pieza con la que el usuario interacciona presionándolo para liberar el giro del extensor radial. La presión que fuerza el muelle se realiza con el dedo pulgar mientras el resto de los dedos sujetan la prótesis para llevarla a la posición deseada. Por lo tanto, se cumple el requisito de uso con una sola mano.

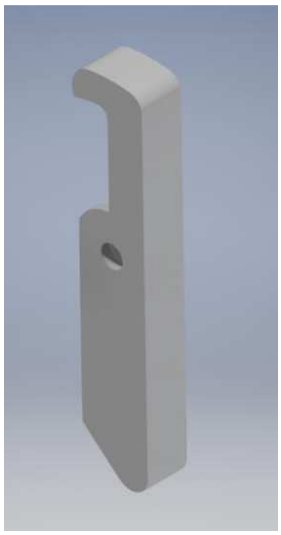


Fig. 64 Partes del codo: Bloqueador.

A continuación, se utilizarán fórmulas para el cálculo de resortes helicoidales de torsión [17]. El muelle utilizado debe poderse accionar con un dedo, por eso se asemeja la fuerza del muelle a 10 N. El momento máximo aplicado (M) es igual a la fuerza (F) que debe ejercer el resorte en kilogramos-fuerza por la longitud de la rama en centímetros (R).

$$M = F \times R$$

$$F = 10\ N = 1\ kgf$$

$$M = 1 \times 4 = 4\ kgf \times cm$$

El momento máximo permisible (M_M) es:

$$M_M = \frac{1{,}63 \times d^{2{,}85}}{C}$$

Donde:

- d es el diámetro del alambre en milímetros.
- C es una variable que depende del cociente de D/d.
  Siendo D el diámetro medio del muelle.

D/d	4	5	6	8	10	12	14	16
C	1,23	1,18	1,14	1,10	1,08	1,07	1,06	1,04

Tabla 12 Cálculo de resortes: relación entre C y D/d.

En un primer cálculo se selecciona un resorte con las siguientes dimensiones:

- D = 9 mm
- d = 1,5 mm
- D/d = 10
- Luego, C = 1,14

$$M_M = \frac{1{,}63 \times 1{,}5^{2{,}85}}{1{,}14} = 4{,}5 \text{ kgf x cm}$$

El factor de seguridad (n) debe ser mayor que uno y es igual al cociente entre M_M y M.

$$n = M_M / M = \frac{4{,}5}{4} > 1$$

Un muelle con estas dimensiones puede ser desbloqueado con la fuerza de la mano y mantiene el mecanismo fijo. Por otro lado, se han de considerar otras dimensiones del muelle. La longitud disponible para el muelle es de 5 mm por lo que el muelle será más estrecho para evitar el rozamiento. Puesto que el alambre es de 1,5 mm, el muelle tendrá tres vueltas que implica una longitud de 4,5 mm. Por último, el muelle utilizado en este mecanismo es de 90° (Fig. 65).

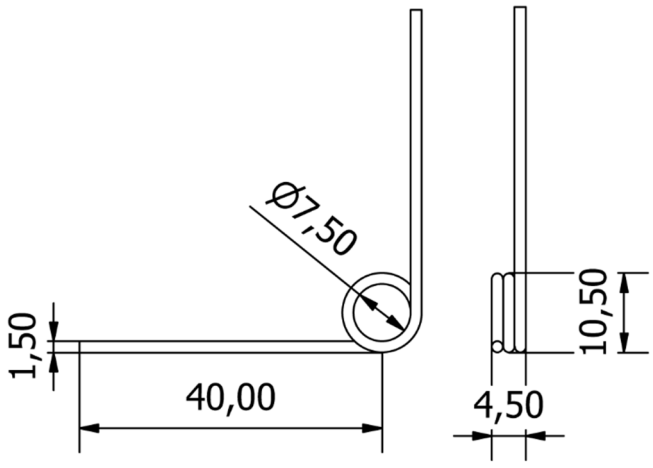


Fig. 65 Partes del codo: muelle de torsión.

En la imagen (Fig. 66) que se muestra a continuación se observan las tres posiciones fijas que ofrece la articulación: extensión, flexión de 100° y flexión intermedia. Además, en la posición de extensión, se muestra el bloqueador presionado y el extensor radial libre.

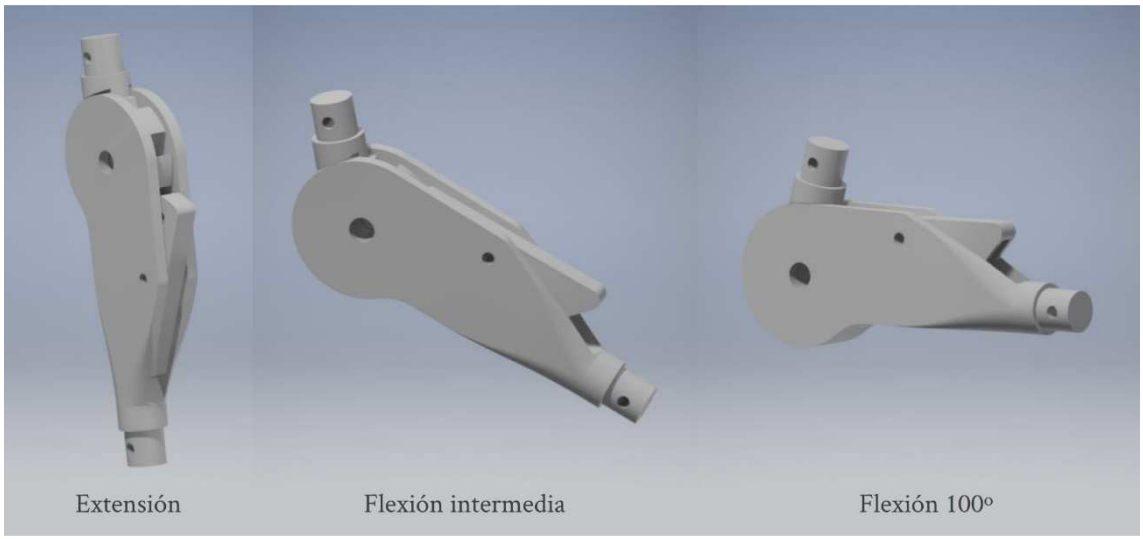


Fig. 66 Posiciones fijas de la articulación del codo.

La articulación consta de dos ejes de rotación. El primero une el húmero y el extensor radial. Este eje es el eje de rotación del codo y alrededor de él tiene lugar la extensión y flexión de la articulación. El segundo eje une el extensor radial, el bloqueador y el resorte. Es el eje de rotación del bloqueador.

5.3.2. Mano y articulación de la muñeca

La mano está formada por dos piezas principales, un eje y un resorte de torsión. Las piezas son la palma y el pulgar. Por otro lado, la articulación de la muñeca está formada por tres piezas, una de ellas compartida con la mano. Las piezas son: la palma, el bloqueador y la muñeca, que está dividida en dos partes.

La palma es la pieza principal de la mano y la de mayor tamaño (Fig. 67). Su diseño formal responde a las funciones que se requieren de la misma. La parte central de la palma atiende a la función de agarre cilíndrico y esférico: el centro más hundido favorece el agarre esférico mientras que os laterales favorecen el agarre cilíndrico. Esta función se realiza con ayuda del pulgar. La parte distal, o la parte de los dedos, atiende a la función de agarre de enganche. Por otro lado, la forma del contorno de la mano favorece un uso más cómodo de la prótesis. El extremo de la mano es un plano y esto añade la función de empujar. El contorno de apoyo, donde se localizaría el meñique de una mano, tiene una forma curva para poder ser apoyado cómodamente sobre cualquier punto. El contorno contrario es plano para ofrecer un apoyo a la hora de sujetar objetos con salientes.

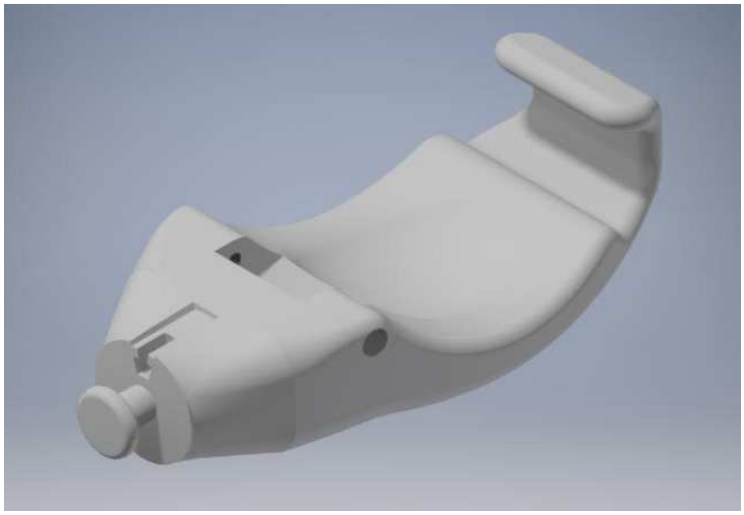


Fig. 67 Partes de la mano: Palma.

En la parte proximal de la palma se encuentra el hueco donde encaja el pulgar (Fig. 68). A través de un eje quedan unidos la palma, el pulgar y el resorte. La forma del pulgar está justificada por las funciones de agarre que realiza. El radio interior se adapta a una forma cilíndrica y el hueco interior favorece el agarre de objetos irregulares. El pulgar tiene una posición habitual con respecto a la palma. Es la posición en la que la mano está más cerrada. El resorte es la pieza que mantiene el pulgar en esta posición. Cuando se desea sujetar un objeto, se introduce entre la palma y el pulgar, forzandolo a abrirse. Así el pulgar ejerce la presión necesaria sobre el objeto para sujetarlo.

Fig. 68 Partes de la mano: Pulgar.

La fuerza del muelle debe ser igual a la fuerza que ejerce la mano para sujetar un objeto. Según un estudio de la Asociación Española de Ingeniería Mecánica sobre las fuerzas de contacto entre la mano y el objeto en un agarre cilíndrico [18] la fuerza necesaria para levantar un objeto de 1,5 kg es de 35 N. Como se desea que la pinza sujete 1 kg se aproxima la fuerza necesaria a 23 N.

A continuación, se utilizarán fórmulas para el cálculo de resortes helicoidales de torsión [17]. El momento máximo aplicado (M) es igual a la fuerza (F) que debe ejercer el resorte en kilogramos-fuerza por la longitud de la rama en centímetros (R).

$$M = F \times R$$

$$F = 23\ N = 2{,}3\ kgf$$

$$M = 2{,}3 \times 4 = 9{,}2\ kgf \times cm$$

El momento máximo permisible (M_M) es:

$$M_M = \frac{1{,}63 \times d^{2{,}85}}{C}$$

Donde:

- d es el diámetro del alambre en milímetros.
- C es una variable que depende del cociente de D/d.
  Siendo D el diámetro medio del muelle.

D/d	4	5	6	8	10	12	14	16
C	1,23	1,18	1,14	1,10	1,08	1,07	1,06	1,04

Tabla 13 Cálculo de resortes: relación entre C y D/d.

En un primer cálculo se selecciona un resorte con las siguientes dimensiones:

- D = 10 mm
- d = 2 mm
- D/d = 5
- Luego, C = 1,18

$$M_M = \frac{1{,}63 \times 2^{2{,}85}}{1{,}18} = 9{,}9 \text{ kgf x cm}$$

El factor de seguridad (n) debe ser mayor que uno y es igual al cociente entre M_M y M.

$$n = M_M / M = \frac{9{,}9}{9{,}2} > 1$$

Un muelle con estas dimensiones puede ejercer la fuerza necesaria sin romper. Por otro lado, se han de considerar otras dimensiones del muelle. La longitud disponible para el muelle es de 10 mm por lo que el muelle será más estrecho para evitar el rozamiento. Puesto que el alambre es de 2 mm, el muelle tendrá cuatro vueltas que implica una longitud de 8 mm. Por último, el muelle utilizado en este mecanismo es de 180° (Fig. 69).

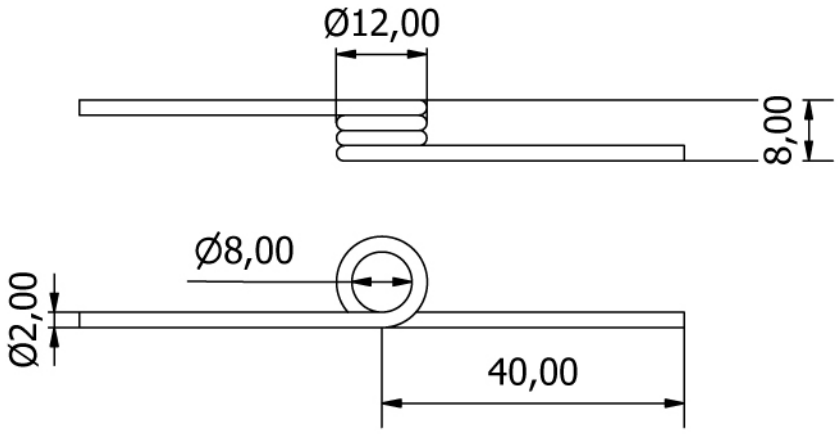


Fig. 69 Partes de la mano: muelle de torsión.

En la parte de la palma correspondiente a la muñeca se localizan dos elementos destinados al giro y bloqueo de la muñeca: un eje y una ranura. La muñeca gira alrededor es este eje y además el extremo del eje, con mayor diámetro, impide que la muñeca se desmonte al liberarla para girar. En la ranura, situada en la parte interior de la palma, se introducen el bloqueador y un resorte de compresión.

La pieza de la muñeca está formada por dos partes que se unen permanentemente. Tiene forma cilíndrica, manteniendo el diámetro de la parte de la palma donde se monta (Fig. 70). En esta pieza se localiza el agujero donde se aloja el eje de la mano, descrito anteriormente. En su base se encuentran tres agujeros no pasantes donde se encaja el bloqueador. Estos agujeros definen las tres posiciones: inicial, pronación y supinación (Fig. 72).

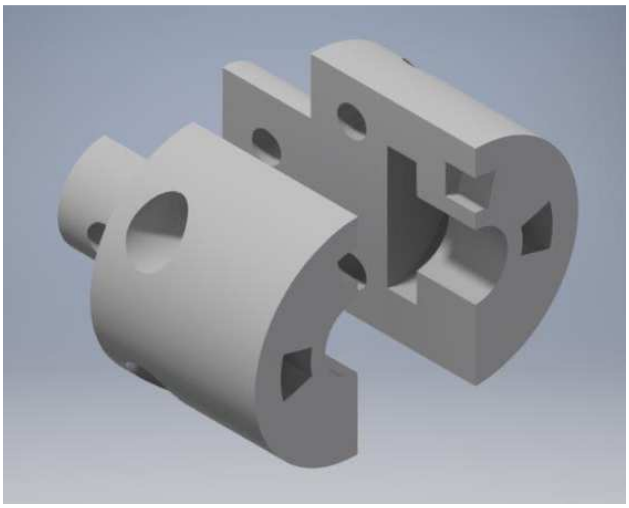


Fig. 70 Partes de la muñeca: Muñeca.

El bloqueador es la pieza que fija las posiciones de la muñeca (Fig. 71). El resorte mantiene la pieza en posición de bloqueo. Al deslizar el bloqueador por la ranura se libera la mano y se gira hasta la siguiente posición de bloqueo. El mecanismo está situado en la palma para poder realizar el movimiento con una sola mano, con el pulgar se desliza el bloqueador y con el resto de los dedos se sujeta la mano para girarla.

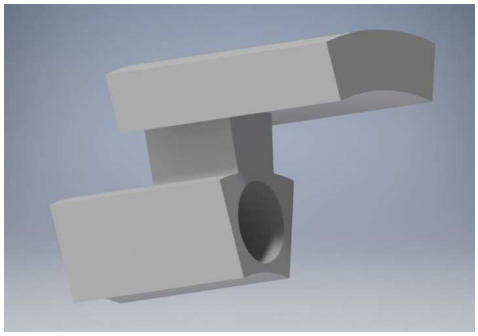


Fig. 71 Partes de la muñeca: Bloqueador.

El resorte de compresión utilizado en este mecanismo debe mantener el bloqueador en posición. Además, se tiene que poder comprimir con la fuerza del pulgar. Esta fuerza se aproxima a 10 N para el cálculo del muelle necesario. Por otro lado, el espacio disponible para el muelle extendido es de 11mm y la deflexión requerida es de 5 mm.

Para el cálculo del muelle se utilizan fórmulas para el cálculo de resortes de compresión [19]. En un primer tanteo, se propone un muelle de 4 mm de diámetro medio (D) y 1 mm de espesor del alambre (d).

La fuerza máxima admisible del muelle (Fm) se calcula como:

$$\mathrm{Fm} = \frac{2060 \times d^{2,837}}{5,88 \times (D+0,5d)} = \frac{2060 \times 0,5^{2,837}}{5,88 \times (4+0,5\times 0,5)} = 11,53\ N$$

El factor de seguridad (n) es igual al cociente entre las fuerzas:

$$n = \frac{Fm}{F} = \frac{11{,}53}{10} > 1$$

El muelle con estas dimensiones es seguro. El número de espiras (N) se calcula como:

$$N = \frac{G \times d^4 \times y}{8 \times F \times D^3}$$

Donde:

- G es el módulo de rigidez igual a 79300 N/mm².
- y es la deflexión del muelle en mm.

$$N = \frac{79300 \times 0{,}5^4 \times 5}{8 \times 10 \times 4^3} = 4{,}8 \cong 5 \text{ espiras}$$

La constante elástica (k) del muelle será:

$$k = \frac{F}{y} = \frac{10}{5} = 2\ N/mm$$

En la siguiente imagen (Fig. 72) se muestran las tres posiciones posibles de la palma. Tras la impresión de un modelo se ha observado que es necesario dejar un margen suficiente de espacio para permitir la rotación de la muñeca y el deslizamiento del bloqueador.

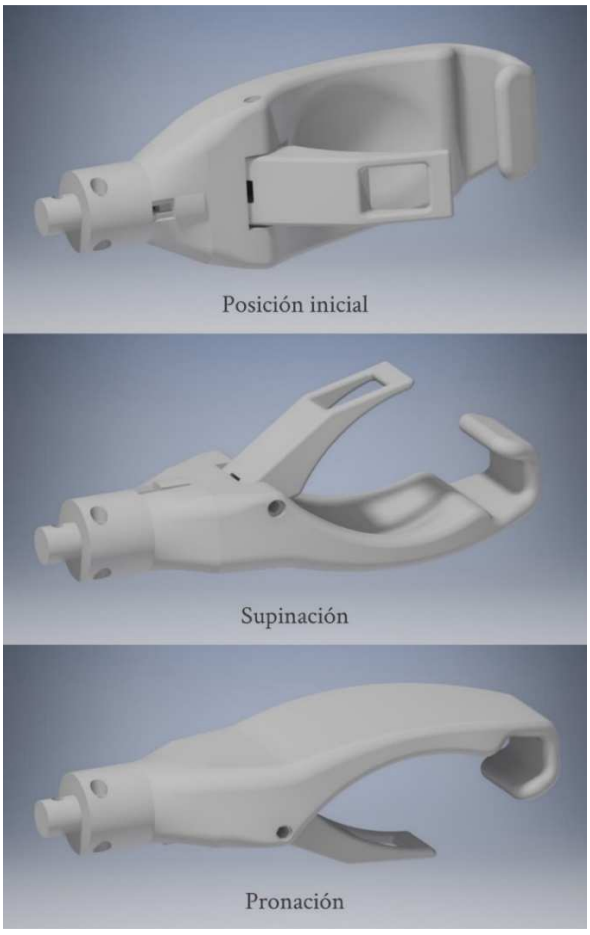


Fig. 72 Articulación de la muñeca: Posiciones.

5.3.3. Unión entre articulaciones

Las uniones entre articulaciones se llevan a cabo mediante tubos cilíndricos huecos como se observa en la Fig. 73. Por el momento se han seleccionado tubos de 16 mm de diámetro interior y 19 mm de diámetro exterior. Estas dimensiones pueden variar tras el análisis de resistencia. Estos tubos se unen al resto de piezas mediante remaches o tornillos.

Anteriormente se había considerado esta unión entre la muñeca y el codo. Ahora también se ha decidido utilizar este tipo de unión entre el codo y el encaje.

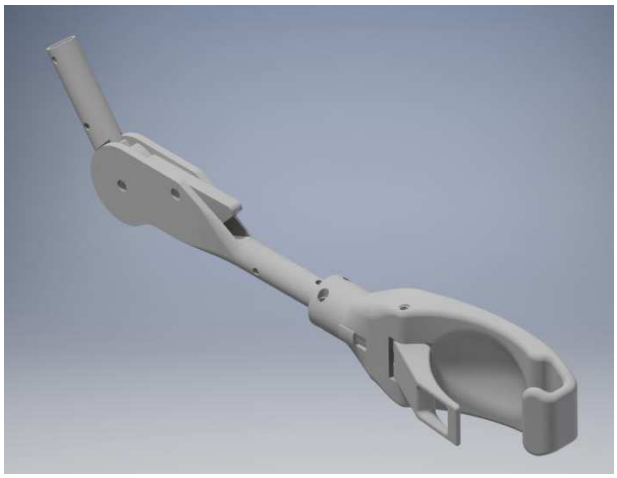


Fig. 73 Unión entre articulaciones.

5.3.4. Carcasa

La carcasa está formada por dos piezas simétricas. Su forma responde a las condiciones dimensionales y los requerimientos de uso de la prótesis. El diámetro menor encaja en la muñeca y el diámetro mayor corresponde al medido en el usuario. La carcasa tiene una forma menos natural en la zona donde se maneja el bloqueador del codo ya que permite su rotación (Fig. 74). La distancia entre las dos piezas es pequeña excepto en la parte que corresponde al codo, por donde pasa el tubo del brazo cuando se flexiona la articulación (Fig. 75).

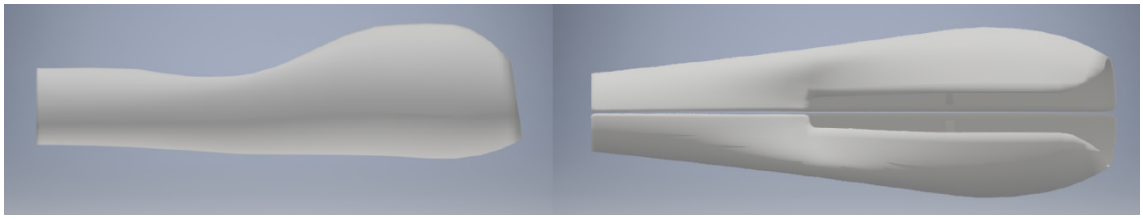


Fig. 74 Carcasa: Vistas lateral y superior.

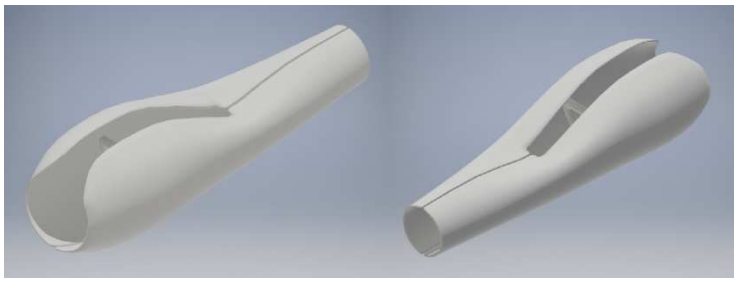


Fig. 75 Carcasa.

En el interior de cada pieza se encuentra dos salientes diferentes que sirven como unión con la prótesis (Fig. 76). La unión más próxima a la muñeca es cilíndrica, un eje se encaja en el interior de un agujero; y la unión más cercana al codo es de presión, un eje de sección cuadrada encaja en un agujero. La dirección del eje del primer agujero mencionado es paralela al eje de la muñeca mientras que la dirección del segundo es perpendicular. Estas dos uniones fijan la carcasa.

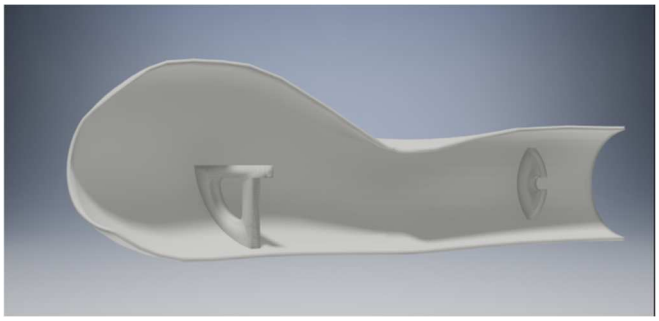


Fig. 76 Carcasa: Salientes para montaje.

5.3.5. Encaje y arnés

Tomando el modelo digitalizado del encaje se ha alargado la parte exterior hacia abajo para aumentar el espacio disponible para el agujero donde se inserta el tubo. Además, en la parte inferior, el encaje tiene un agujero trasversal, a través del cual se introduce el tornillo y tuerca que fija las piezas. Este agujero se ha situado de forma que uno de los extremos quede oculto entre la prótesis y el cuerpo (Fig. 77).

Fig. 77 Encaje.

En la parte de unión con el arnés se sitúan tres agujeros que rodean el encaje donde, por medio de remaches, se fija el arnés. El arnés está formado por cuatro partes: la manga (Fig. 78), la correa, la hebilla y el cojín protector. La correa está cosida a la manga por la parte posterior. En la parte delantera va situada la hebilla, con la que se puede ajustar la longitud de la correa. El cojín protector rodea la correa y se coloca bajo el brazo.

Fig. 78 Arnés: manga.

5.3.6. Posiciones de la prótesis

El diseño de la prótesis resultante realiza dos movimientos articulares con tres posiciones fijas cada uno. Por lo tanto, la prótesis tiene nueve posiciones fijas en total. En la siguiente imagen (Fig. 79) se muestran estas posiciones.

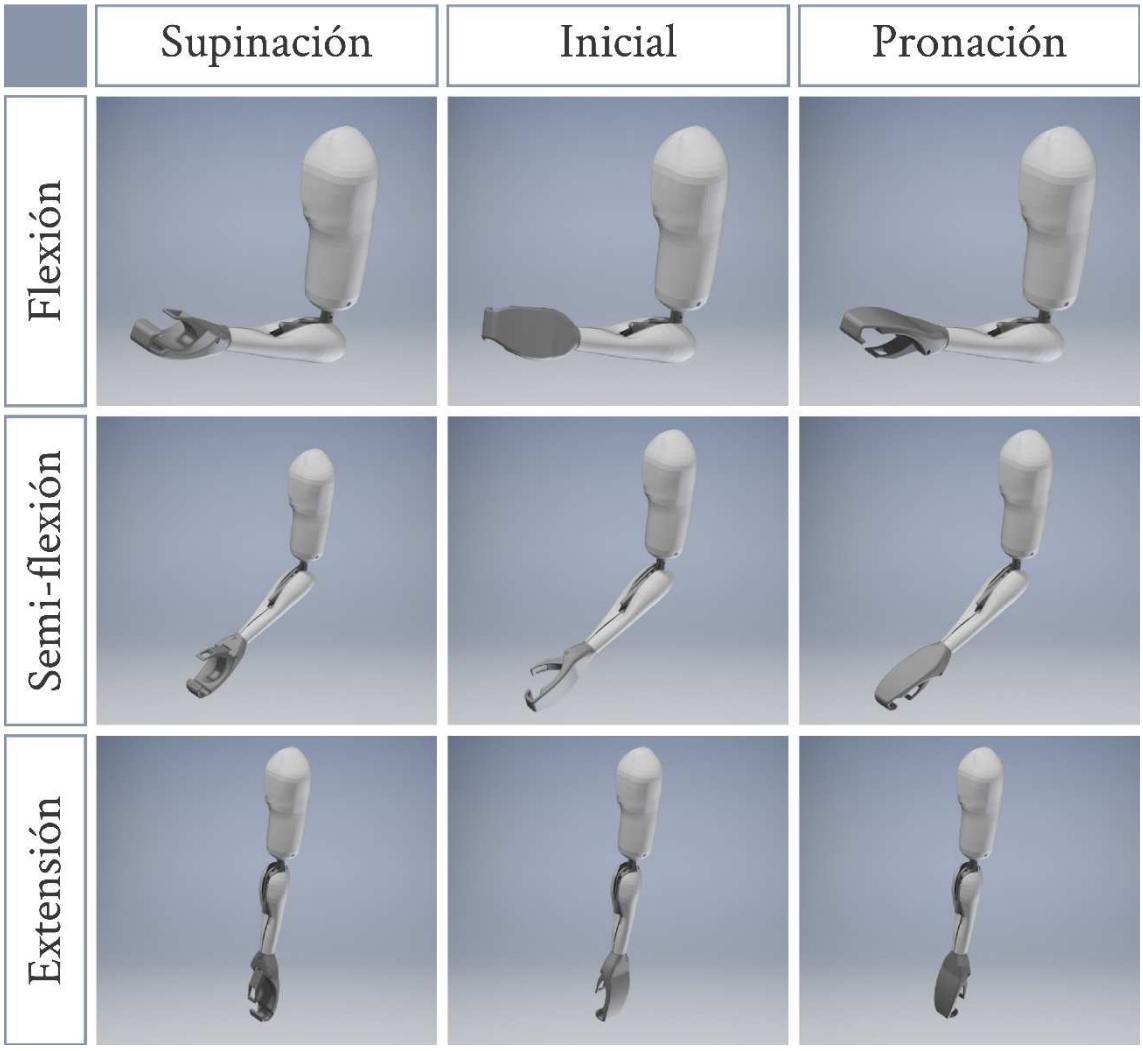


Fig. 79 Posiciones fijas de la prótesis.

5.4. Selección de materiales

Esta fase del proyecto tiene como finalidad hacer una selección de los materiales más adecuados para el producto teniendo en cuenta los requerimientos de diseño. Las condiciones principales que deben cumplir los materiales tienen que ver con: el precio, la ligereza y la resistencia frente a esfuerzos.

Se busca una prótesis con un coste menor a aquellas que se encuentran en el mercado. Esto se logra por medio del diseño y seleccionando materiales con el menor coste posible. Además, la prótesis debe tener una masa similar al bazo humano que, en el caso del usuario, es de 3.675 kg menos la masa del muñón. Asemejar el peso humano tiene por objetivo equilibrar las cargas del cuerpo, sin embargo, también se debe considerar que este peso será soportado por el hombro y por ello es recomendable reducirlo en la medida de lo posible. Será necesario utilizar materiales ligeros. Finalmente, los materiales utilizados deben resistir los esfuerzos a los que se puede llegar a someter la prótesis. En esto influyen tanto los materiales como el diseño, que puede variar en función de las prestaciones del material.

Por otro lado, hay que tener muy en cuenta que este diseño de prótesis se trata de un proyecto personalizado y, por lo tanto, la fabricación comprende una sola unidad. Por tanto, se tendrá en cuenta la fabricación digital. Se buscarán materiales aptos para esto tipo de fabricación como materiales de impresión 3D o para mecanizado.

El diseño propuesto para la prótesis de brazo consta de numerosas piezas con distintos requerimientos de resistencia, ergonomía o aspecto. Teniendo esto en consideración se pretende reducir el número de materiales utilizados al mínimo. Para ello se propone una clasificación de las piezas. En la Tabla 14 se muestra la relación de las piezas con las características: alta resistencia requerida, menor resistencia requerida, poca resistencia requerida y en contacto con el usuario. Esta clasificación no incluye las piezas adquiridas en el mercado.

PIEZA	REQUERIMIENTOS PRINCIPALES DE LAS PIEZA			
	ALTA RESISTENCIA	MENOR RESISTENCIA	POCA RESISTENCIA	CONTACTO USUARIO
Tubos	X			
Húmero	X			
Extensor radial		X		
Bloqueador del codo	X			X
Muñeca	X			
Bloqueador de la muñeca	X			X
Palma		X		X
Pulgar		X		X
Carcasas			X	X
Encaje			X	X
Tornillos	X			
Muelles	X			

Tabla 14 Clasificación de las piezas según sus requerimientos principales.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se ha delimitado la búsqueda de materiales según el requerimiento que se desea cumplir. Para las piezas que necesitan mayor resistencia se busca un metal de fácil mecanización y para las piezas en contacto con el usuario un material polímero. Según si requiere resistencia media o baja se buscarán materiales poliméricos resistentes o materiales, incluso, de impresión 3D. Además, se busca un material textil adecuado para su utilización en el arnés de la prótesis. Por último, se selecciona el material de impresión 3D más apropiado para la fabricación de un prototipo, que permite hacer una revisión del producto y sus prestaciones.

5.4.1. Selección del material textil

El material textil de la manga del arnés debe cumplir algunas características. La manga es una pieza que estará en contacto directo con el usuario, por ello, la textura debe ser agradable al tacto. Se descarta cualquier tela áspera que pueda provocar rozaduras como, por ejemplo, la lona. Por otro lado, la tela debe ser resistente, ya que soportará tensiones de forma continua durante el uso de la prótesis. Finalmente, se requiere un material con cierta elasticidad para adaptarse a las formas del hombro del usuario y el encaje de la prótesis. Esta elasticidad debe estar equilibrada con una estabilidad dimensional suficiente. También se valora que el material sea ligero y duradero.

La resistencia que buscamos en el material se encuentra en materiales como la lona, el nylon, el cuero o el neopreno. Entre estos materiales la lona es un material demasiado áspero, el nylon es demasiado elástico y el cuero, demasiado rígido. El neopreno, sin embargo, tiene todas las cualidades requeridas.

El neopreno es una clase de caucho sintético utilizado habitualmente en la fabricación de material deportivo por su comodidad y durabilidad. Combina las propiedades de resistencia y elasticidad, además de ser un material ligero [20]. Además, este material ofrece una sensación agradable al tacto.

Como el neopreno cumple los requisitos y además es accesible en el mercado ha sido seleccionado para la elaboración de la manga para el arnés.

5.4.2. Selección del metal

Este material se va a seleccionar según los criterios expuestos anteriormente: maquinabilidad, resistencia, ligereza y precio.

En la Tabla 15 se muestran los valores de resistencia a la tracción, límite elástico y maquinabilidad de varios metales para la mecanización utilizados en la industria [21]. Aunque en la tabla se comparan metales concretos, después se evaluarán diferentes aleaciones y se seleccionará la más adecuada. Se puede observar que el metal con mayor maquinabilidad es una aleación de aluminio con un 320% frente al acero AISI B1112, el siguiente con mayor valor, con un 100%. Los valores se resistencia y límite elástico no varían mucho entre estos materiales. El titanio destaca en esta característica, pero tiene un valor de maquinabilidad muy bajo en comparación.

MATERIAL	R. TRACCIÓN (N/mm^2)	LÍMITE ELÁTICO (N/mm^2)	MAQUINABILIDAD %
Acero AISI B1112	520 a 620	414 a 483	100
Aluminio 7075-T6	510 a 538	434 a 475	320
Acero inoxidable 304	500 a 700	190	64
Acero inoxidable PH-17/4 P960	900 a 1160	790	32
Titanio Ti6Al4V	1170	1100	30
Inconel 718	1095	918	15

Tabla 15 Maquinabilidad de los metales. Fuente: Interempresas.

A continuación, en la Tabla 16 se comparan las densidades del acero, el aluminio y el titanio, ya que la ligereza es otro factor para tener en cuenta. Se comparan los datos de densidad de los dos elementos y el acero común. El valor no varía mucho con respecto a las diferentes aleaciones y, a efectos de comparar los tres, un valor de referencia es suficiente. El aluminio es el material con el menor valor de densidad con diferencia, además de tener las mejores cualidades para el mecanizado. Se convierte así la opción más probable entre los tres, a falta del estudio comparativo de costes.

	ACERO	ALUMINIO	TITANIO
DENSIDAD (g/cm^3)	7,85	2,70	4,54

Tabla 16 Comparación de la densidad: acero, aluminio y titanio.

En la Tabla 17, se comparan los precios del aluminio y el acero. El titanio ha sido descartado porque es difícil de conseguir para pequeños proyectos además de tener un

precio muy elevado. El aluminio es un material menos costoso mientas que el acero tiene precios mayores que este.

MATERIAL	PRECIO
Aleaciones de aluminio (barra D45)	5,63 €/kg
Aleaciones de aluminio (tubo D20)	1,90 €/kg
Aleaciones de aluminio (pletina 50x12)	12,34 €/m
Acero (barra D45)	6,30 €/kg
Acero (tubo D20)	9,72 €/m
Acero (pletina 10x45)	23,76 €/m

Tabla 17 Comparación del precio: acero y aluminio. Fuente: Lumetal.

Después de comparar los tres metales se llega a la conclusión de que la mejor opción es utilizar una de las aleaciones del aluminio. Por ello, se estudiarán de forma comparativa las propiedades de aquellas aleaciones del aluminio más adecuadas para la mecanización. Se han seleccionado aleaciones de las series 2000, 6000 y 7000, que son las más usadas en la industria para elementos resistentes. En la Tabla 18 se pueden comparar las características elegidas como criterio de selección [22].

PROPIEDADES	AL 2011 T3	AL 2024 T6	AL 6101 T6	AL 7075 T6
Propiedades mecánicas				
Módulo elástico (MPa)	72.5	73	70	72
Resistencia a la tracción (MPa)	380	475	220	570
Alargamiento (%)	15	10	15	11
Ligereza				
Densidad (g/cm^3)	2,84	2,79	2,70	2,81
Mecanizado				
Fragmentación de la viruta	Muy buena	Buena	Regular	Buena
Brillo de superficie	Buena	Buena	Muy buena	Buena

Tabla 18 Comparación de aleaciones de aluminio.

Finalmente, se ha seleccionado el aluminio 7075 T6 por sus excelentes propiedades mecánicas y su buena maquinabilidad. Aun no siendo la aleación de menor densidad, es ligera y adecuada para su fin.

5.4.3. Selección del polímero

Para la selección del polímero se tendrán en cuenta los requerimientos antes mencionados. Las piezas de este material están en contacto con el usuario y su ambiente y requieren cierta resistencia. Además, se debe tener en cuenta la ligereza del material.

El producto que se quiere fabricar es personalizado y, por lo tanto, solo se pretende fabricar una unidad. Por ello, es interesante utilizar polímeros que se pueden mecanizar. En primer lugar, se comparan cinco polímeros para mecanizado con aplicaciones en la industria. Estos son: nylon, POM, PET, PTFE y PEEK [23].

El nylon es un polímero cristalino resistente que pertenece al grupo de las poliamidas. El polioximetileno (POM) es un termoplástico cristalino de alta rigidez utilizado para el mecanizado de piezas de alta precisión. El tereftalato de polietileno (PET), termoplástico rígido, también ofrece gran precisión. El Politetrafluoroetileno (PTFE) es un polímero prácticamente inerte similar al polietileno. La polieteretercetona (PEEK) es un termoplástico cristalino con muy buenas propiedades mecánicas y químicas. En la Tabla 19 se comparan las propiedades de estos materiales [24].

PROPIEDADES	NYLON	POM	PET	PTFE	PEEK
Propiedades mecánicas					
Módulo elástico (MPa)	3200	3100	3700	700	4400
Límite elástico (MPa)	85	68	90	25	110
Alargamiento (%)	70	35	15	500	20
Ligereza					
Densidad (g/cm^3)	1,14	1,41	1,39	2,18	1,31

Tabla 19 Comparación de polímeros para mecanizado.

Observando la resistencia de los cinco materiales se concluye que el material que mejor puede resistir las posibles tensiones que se generen en el producto es el PEEK. Además, tiene una densidad razonablemente baja.

Habiendo seleccionado el PEEK como material polímero, se proponen tres variaciones del PEEK. La primera es el PEEK natural, con un aditivo colorante negro, que tiene muy buenas propiedades mecánicas además de tener una gran estabilidad dimensional. La segunda es un material basado en la polietercetonaetercetonacetona (PEKEKK) que le aporta mayor resistencia y rigidez. La tercera contiene un aditivo cerámico que disminuye su coeficiente de rozamiento favoreciendo la rotación de las piezas. En la Tabla 20 se comparan las propiedades de estos materiales [25].

PROPIEDADES	PEEK NATURAL	PEKEKK	PEEK CERÁMICO
Nombre comercial	Tecapeek black	Tecapeek ST	Tecapeek CMF
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico (MPa)	4100	4600	5500
Límite elástico (MPa)	100	134	102
Alargamiento (%)	3	13	5
Ligereza			
Densidad (g/cm^3)	1,31	1,32	1,65

Tabla 20 Comparación de las propiedades mecánicas de materiales polímeros.

Tras comparar los tres materiales se puede ver que, aun aportando un mejor deslizamiento de las piezas, el PEEK con aditivos cerámicos tiene unas propiedades mecánicas que darán perores resultados en la prótesis. Por otro lado, el PEKEKK aporta mayor resistencia, pero la diferencia tanto de resistencia como de densidad con el PEEK natural es pequeña.

Por último, se comparan los precios de los tres materiales. En la Tabla 21 se muestra el precio por kilogramo actual consultados a un proveedor de estos materiales.

MATERIAL	PRECIO
PEEK natural	200 €/kg
PEKEKK	450 €/kg
PEEK cerámico	340 €/m

Tabla 21 Comparación de los precios de materiales polímeros.

Finalmente, aunque sus propiedades mecánicas no difieren mucho, tras comparar los precios se puede notar una gran diferencia, siendo el PEEK natural el material con un precio más asequible. Por ello, finalmente se ha seleccionado el PEEK como material polímero para las piezas que requieren cierta resistencia y/o están en contacto con el usuario.

5.4.4. Selección del material de impresión 3D

En este apartado se selecciona el material de impresión 3D más adecuado para la fabricación de prototipos. Además, se considera la posibilidad de fabricar aquellas piezas que no soportan grandes tensiones, como las carcasas, con estos materiales. Esto también permite una fácil personalización del diseño.

El criterio de selección de este material tiene en consideración los aspectos ya mencionados. Se van a contemplar materiales de impresión 3D de dos tipos de tecnología de impresión: FDM y SLA.

En la Tabla 22 se comparan los materiales para la impresión 3D del tipo FDM más aptos para aplicaciones mecánicas [26]. Los materiales son: PETG, nylon, fibra de carbono y policarbonato.

PROPIEDADES	PETG	NYLON	FC	PC
Propiedades mecánicas				
Tensión de rotura (MPa)	53	40 - 85	45 - 48	72
Rigidez	Alta	Alta	Muy alta	Alta
Ligereza				
Densidad (g/cm^3)	1,23	1,06 –1,14	1,3	1,2
Impresión 3D				
Temperatura de impresión (C°)	230 - 250	220 - 270	200 - 230	260 - 310
Temperatura de la cama (C°)	75 – 90	70 - 90	45 - 60	80 - 120
Cama caliente	Requerido	Requerido	Opcional	Requerido
Requerimientos	Ventilador	HotEnd de metal	Boquilla de acero	HotEnd de metal
		Cerramiento	Ventilador	Cerramiento
Precio				
Precio ($/kg)	20 -60	25 - 65	30 - 80	40 - 75

Tabla 22 Comparación de materiales de impresión 3D por FDM. Fuente: Simplify 3D.

El PETG es un polietileno tereftalato cuya estructura química está modificada con Glicol, lo que le aporta una menor fragilidad y mayor facilidad en el procesado. Es un material semirrígido con buena resistencia al impacto.

El nylon es un material popular en la industria por su resistencia y su flexibilidad. Utilizado en piezas anchas de pared gruesa ofrece una gran resistencia a los impactos y en piezas de pared fina destaca su flexibilidad. Su resistencia a la tracción es muy buena y su coeficiente

de fricción es muy bajo. Como desventaja se puede destacar que es un material higroscópico por lo que absorbe con facilidad la humedad del medio y esto puede afectar al proceso de impresión [27].

La fibra de carbono (FC) es un material compuesto que consiste en una matriz polimérica con al menos un 20% de fibra de carbono. La matriz depende del fabricante habiendo materiales con base de PETG, ABS, PLA… Este material compuesto tiene una dureza y resistencia altas, es muy ligero y tiene una gran estabilidad dimensional. Una desventaja es que, para imprimir este material, es necesario utilizar en el extrusor una boquilla de acero endurecido. Este material compuesto se nombrará fibra de carbono para abreviar.

El policarbonato (PC) es un material de alta resistencia para aplicaciones en ingeniería. Tiene una buena resistencia a la temperatura y al impacto. Además, este material se dobla antes de la rotura por lo que es apropiado cuando se requiere cierta flexibilidad. Al igual que el nylon el policarbonato tiene facilidad para absorber la humedad.

Tanto las propiedades mecánicas como la ligereza de los cuatro materiales pueden llegar a ser adecuados para el diseño y los precios no difieren mucho unos de otros. En cuanto a las características de impresión 3D, el policarbonato destaca por las altas temperaturas que requiere. Además, al igual que para el nylon, es necesario un cerramiento, un HotEnd metálico y una cama caliente para su impresión. Estos requerimientos hacen que un usuario habitual de impresoras 3D no pueda utilizar estos materiales. Por ello han sido descartados.

A continuación, se comparan algunos materiales utilizados en la impresión SLA: el material estándar y dos materiales para aplicaciones en la ingeniería [28]. La Tabla 23 muestra las propiedades resistentes y el precio de estos materiales.

PROPIEDADES	ESTANDAR	TOUGH	DURABLE
Propiedades mecánicas			
Módulo elástico (GPa)	2,80	2,80	1,26
Resistencia a la tracción (MPa)	65,0	55,7	31,8
Módulo de flexión (GPa)	2,2	1,6	0,82
Alargamiento (%)	6,2	24	49
Resistencia al impacto (J/m)	25	38	109
Precio			
Precio (€/L)	163,35	204,49	204,49

Tabla 23 Comparación de materiales de impresión 3D por SLA. Fuente: Formlabs.

El material estándar con gran resistencia a la tracción, pero algo frágil. Con este material se puede lograr gran detalle en las formas. Además, tiene el menor precio.

El material Tough es robusto e ideal para piezas que requieren alta resistencia. Al contrario que el material estándar, este tiene cierta resistencia a la ruptura, sin embargo, el precio es muy elevado.

El material Durable es resistente y flexible. Su resistencia al impacto es mayor que la del Tough y su precio es tan alto como el de este.

Los materiales de impresión SLA ofrecen muy buenas prestaciones, sin embargo, su precio elevado y su menor accesibilidad en comparación con los materiales de impresión FDM hacen que sean descartados.

Para seleccionar el material entre el PETG y la FC se hará un análisis por elementos finitos del diseño. Al ser materiales novedosos los programas de análisis no los incluyen en las bibliotecas, por lo que se van a realizar ensayos de tracción y de flexión para determinar los parámetros necesarios para el análisis.

5.4.5. Ensayo de los materiales

Los ensayos de tracción y de flexión se realizan para caracterizar los materiales. Se van a determinar el módulo de Young, la tensión de rotura, el límite elástico y el módulo de flexión. Los materiales que se van a estudiar serán los dos preseleccionados anteriormente utilizados en impresión FDM.

5.4.5.1. Preparación de las probetas

Las probetas para el ensayo se han fabricado atendiendo a la norma UNE 116005. Se han preparado seis probetas para los ensayos de tracción, cinco para el ensayo de flexión de fibra de carbono y seis para el ensayo de flexión de PETG, todas con las capas en posición horizontal. A continuación, la Tabla 24 muestra las dimensiones de las probetas y en las imágenes Fig. 80 y Fig. 81 se representan de forma gráfica.

MEDIDAS (mm)	TRACCIÓN	FLEXIÓN
Nomenclatura	1A-H	2-H
Sección	Rectangular	Rectangular
Longitud inicial	80	80
Anchura	10	10
Espesor	4	4

Tabla 24 Ensayo de materiales: medidas de las probetas.

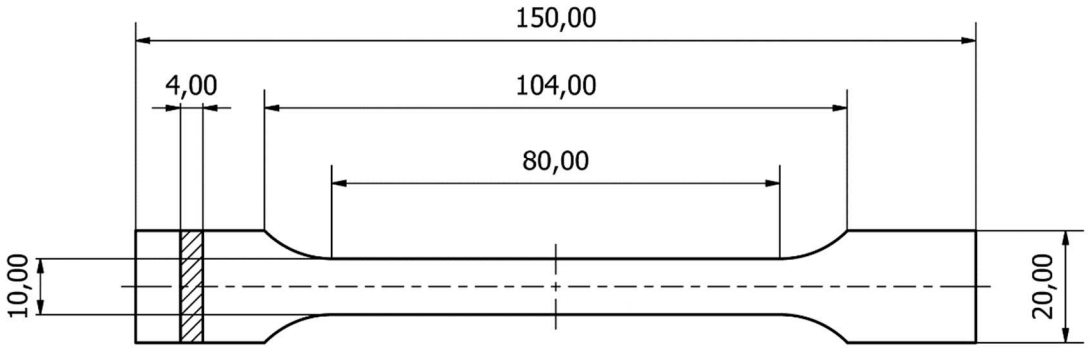


Fig. 80 Probeta de tracción 1A-H.

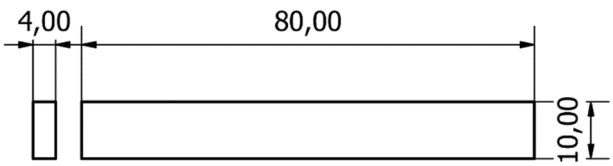


Fig. 81 Probeta de flexión: 2-H.

En la Tabla 25 se especifican los parámetros de impresión para las probetas de ambos materiales. En función a estos parámetros las propiedades de los materiales de impresión 3D pueden variar notablemente. Las temperaturas de impresión son diferentes para cada material. Después de hacer algunas pruebas de impresión se han determinado estos valores.

PARAMETROS	FIBRA DE CARBONO	PETG
Tecnología de impresión	FDM	FDM
Máquina	PRUSA MK3	PRUSA MK3
Altura de capa (mm)	0,2	0,2
Velocidad de impresión (mm/s)	50	50
Temperatura del Hot-End (°C)	245	235
Temperatura de la cama (°C)	50	85
Relleno (%)	100	100

Tabla 25 Ensayo de materiales: parámetros de impresión de las probetas.

5.4.5.2. Realización del ensayo

Los ensayos de tracción se han realizado de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 527-5 y los de flexión, con la norma UNE-EN ISO 178.

En ensayo de la fibra de carbono se realizó el día 28 de noviembre de 2018 en el laboratorio de diseño y fabricación industrial de la ETSIDI y el de PETG el día 14 de diciembre de 2018 en el mismo lugar. El equipo utilizado es una máquina de ensayo Hoytom (Fig. 82). La velocidad de ensayo ha sido de 0,5 mm/s.

Fig. 82 Maquina de ensayo Hoytom.

5.4.5.3. Resultados

En primer lugar, se muestras los resultados de los ensayos de la fibra de carbono. En la siguiente imagen (Fig. 83) se comparan los gráfico tensión/deformación del ensayo de tracción de las cinco probetas. Los valores de deformación se muestran en tanto por uno.

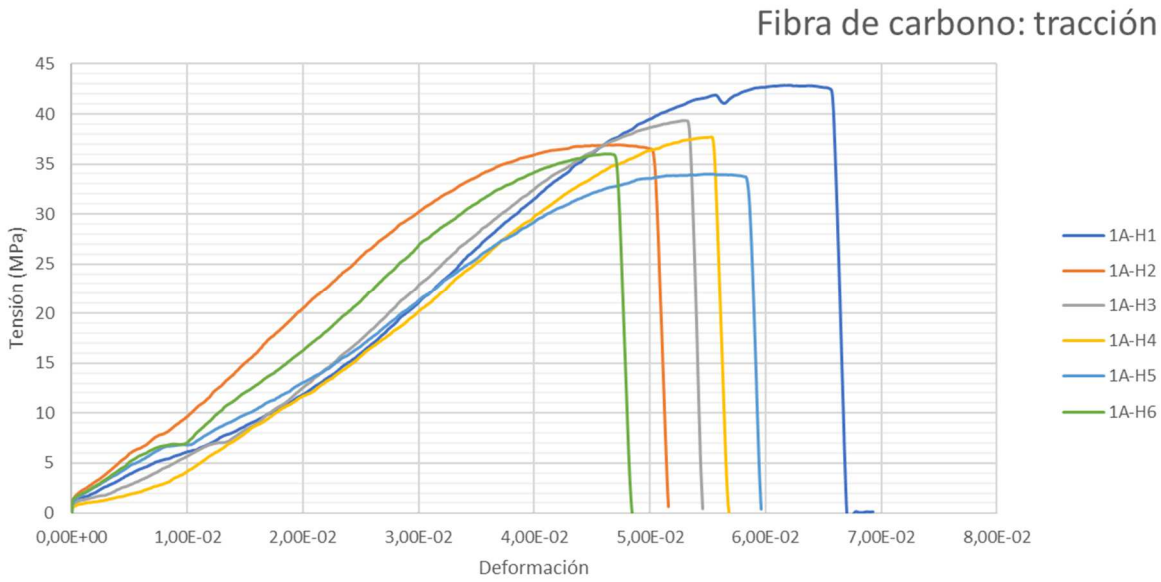


Fig. 83 Ensayo de tracción de fibra de carbono: gráfico comparativo de las probetas.

En la Tabla 26 aparecen el valor medio y la desviación típica de los valores de módulo de Young, tensión de rotura y límite elástico calculados en la fibra de carbono. El módulo de Young se ha calculado como el valor medio del cociente entre deformación y tensión de los datos contenidos en el intervalo en el que la gráfica tiende a una recta. La tensión de rotura es la tensión máxima alcanzada.

	MÓDULO DE YOUNG	TENSIÓN DE ROTURA	LÍMITE ELÁSTICO
Valor medio (MPa)	738	37,8	36,9
Desviación típica (MPa)	141	3,04	1,98

Tabla 26 Ensayo de tracción de fibra de carbono: resultados.

En el siguiente gráfico (Fig. 84) se comparan los resultados del ensayo de flexión de las cinco probetas. La Tabla 27 refleja los resultados calculados del módulo de flexión.

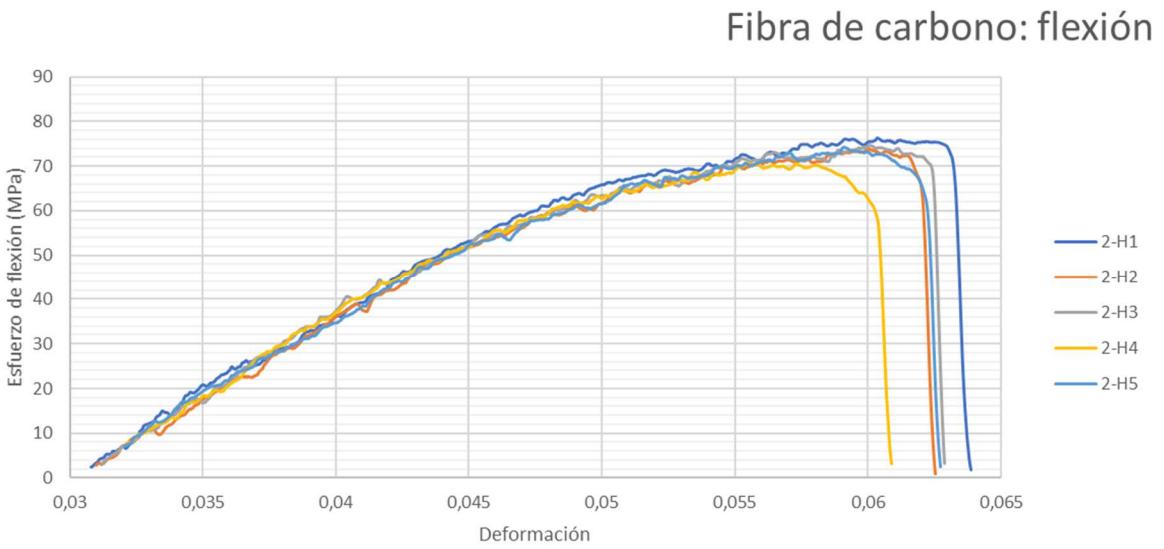


Fig. 84 Ensayo de flexión de fibra de carbono: gráfico comparativo de las probetas.

	MÓDULO DE FLEXIÓN
Valor medio (GPa)	3,65
Desviación típica (GPa)	0,20

Tabla 27 Ensayo de flexión de fibra de carbono: resultados.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos realizados de las probetas de PETG. En la Fig. 85 se puede observar el gráfico comparativo de los valores de tensión y deformación obtenidos para las seis probetas.

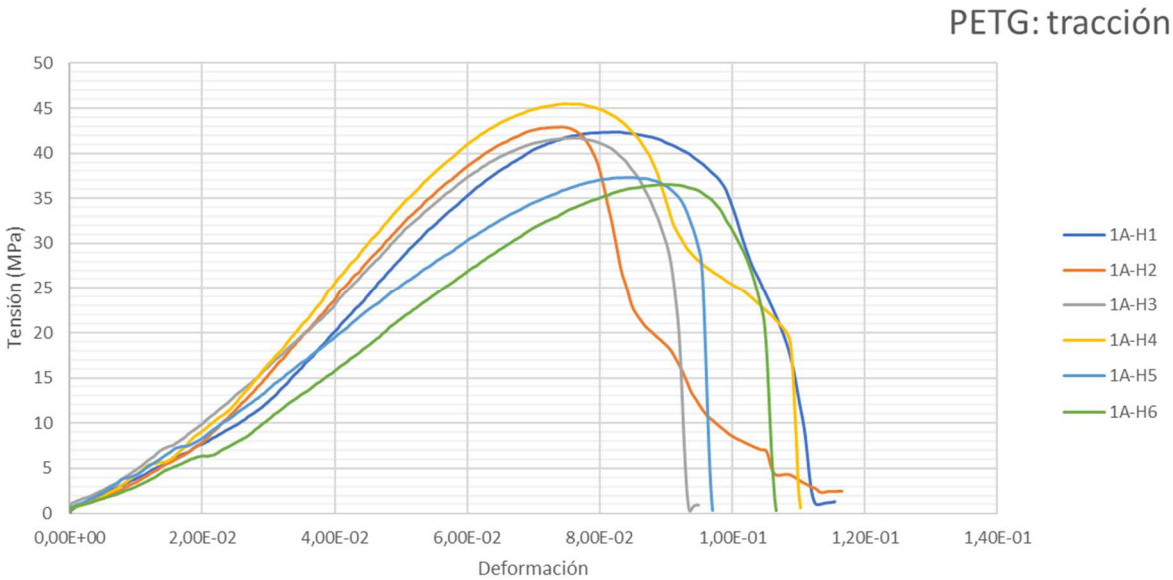


Fig. 85 Ensayo de tracción de PETG: gráfico comparativo de las probetas.

En la Tabla 28 se reflejan los valores calculados de módulo de Young, tensión de rotura y límite elástico del PETG. Los valores se han obtenido de la misma forma que los de fibra de carbono.

	MÓDULO DE YOUNG	TENSIÓN DE ROTURA	LÍMITE ELÁSTICO
Valor medio (MPa)	580	41	38,7
Desviación típica (MPa)	423	3,48	2,51

Tabla 28 Ensayo de tracción de PETG: resultados.

En el gráfico de la Fig. 86 se comparan los resultados del ensayo de flexión de las cinco probetas.

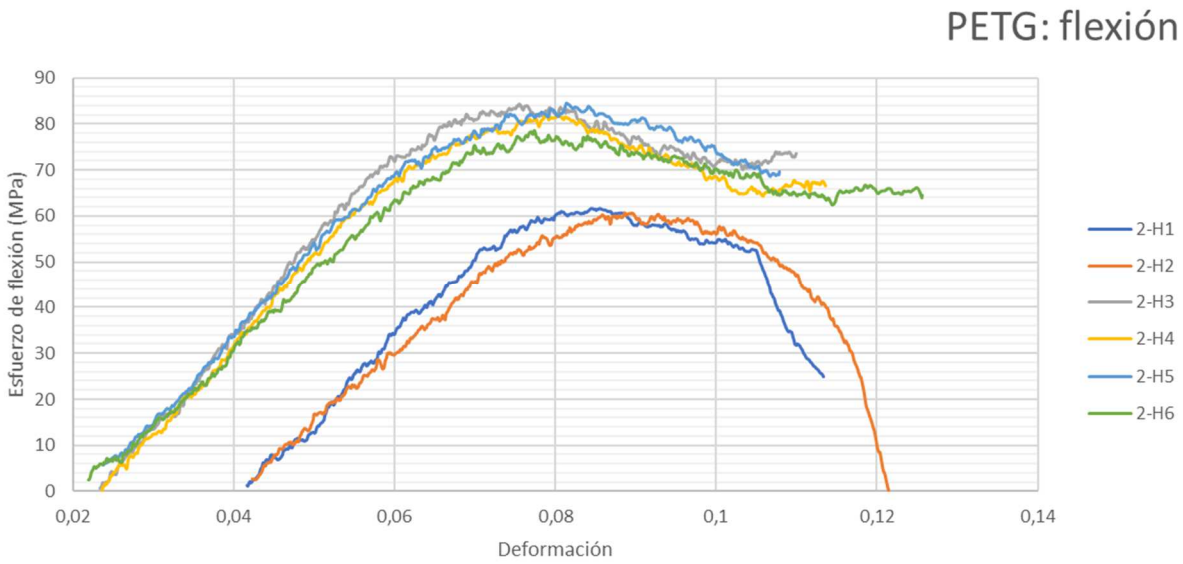


Fig. 86 Ensayo de flexión de PETG: gráfico comparativo de las probetas.

En el gráfico, se puede observar que los resultados de las dos primeras probetas difieren mucho de las otras cuatro. Por esa razón, sen descartado esas dos probetas para el cálculo del módulo de flexión (Tabla 29).

	MÓDULO DE FLEXIÓN
Valor medio (GPa)	2,23
Desviación típica (GPa)	0,28

Tabla 29 Ensayo de flexión de PETG: resultados.

5.5. Análisis de tensiones por elementos finitos

El análisis de tensiones por elementos finitos permite determinar cuál es el material que ofrece un mejor resultado al aplicar una carga al modelo. Por otro lado, el análisis muestra las zonas de diseño donde se concentran tensiones y determina si el modelo soporta la carga requerida o, por el contrario, se rompe. Para la realización de los ensayos se utiliza el programa Ansys Académico.

5.5.1. Análisis de tensiones del prototipo

Tras los ensayos de los materiales, se han incorporado al programa los datos obtenidos. Los análisis se harán teniendo en cuenta los dos materiales, así se podrá observar cuál es más adecuado.

El ensayo se realiza sobre el brazo completo, aunque quedan fuera del análisis algunas piezas. No se considera el encaje en este análisis ya que trata de estudiar la resistencia de los mecanismos. También se descartan las dos carcasas, que no soportan grandes tensiones.

El análisis se realiza con la prótesis en posición horizontal con el codo extendido y la muñeca en posición de supinación. Es en esta posición cuando las tensiones llegan a su valor máximo. El soporte se fija en la parte del tubo correspondiente a la unión con el encaje. Se colocan dos cargas: la gravedad y una carga de 80 N situada en la parte de la palma donde se puede colgar la carga más alejada (Fig. 87). Se sitúa esta carga tras haber estudiado en apartados anteriores cual es la mayor carga que puede soportar el usuario con un brazo. Se ha descartado del estudio el pulgar ya que esta pieza acompañará a la palma sin oponer resistencia.

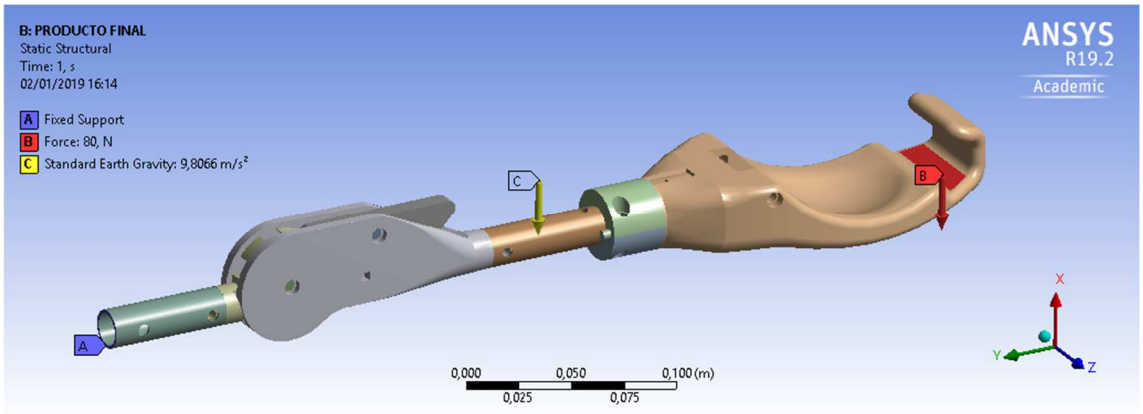


Fig. 87 Análisis de tensiones: posición y cargas.

En el análisis con piezas de fibra de carbono se obtiene una tensión máxima de 232,55 MPa (Fig. 88). Utilizando PETG (Fig. 89) se obtiene una tensión máxima de 255,59 MPa. Ambos puntos de mayor tensión se sitúan en el eje de rotación de la articulación del codo. Como se puede ver en las imágenes, las deformaciones generadas son muy grandes, siendo

la máxima deformación del primero igual a 0,51 m y la del segundo a 0,65 m. En las imágenes la deformación se muestra reducida a un 19% de la deformación real.

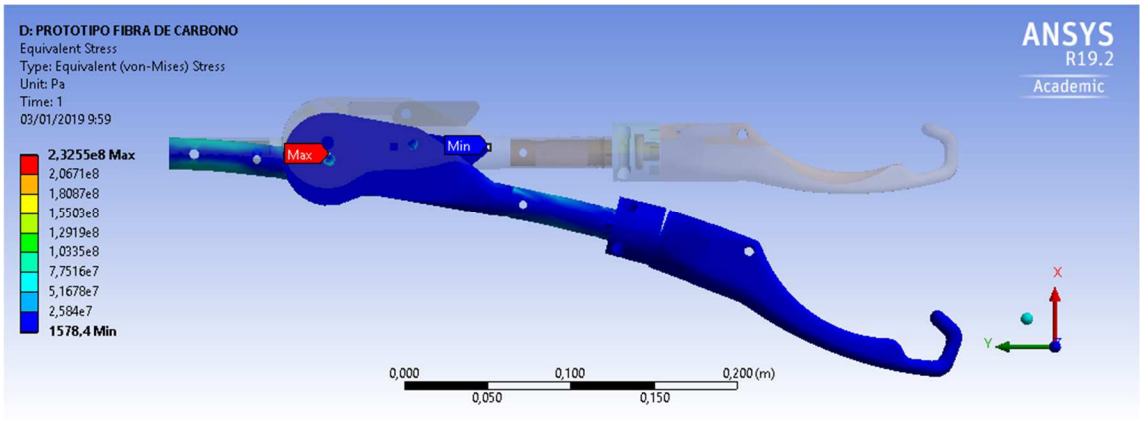


Fig. 88 Análisis de tensiones del prototipo: fibra de carbono.

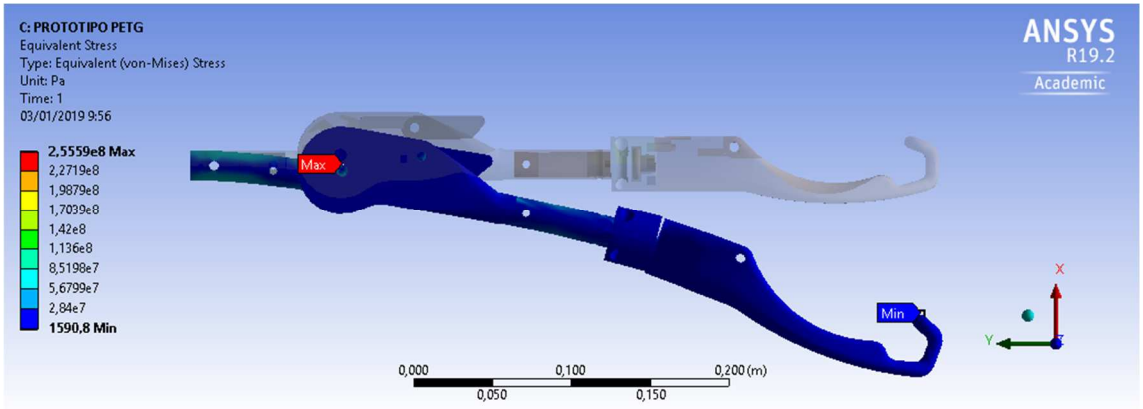


Fig. 89 Análisis de tensiones del prototipo: PETG.

Ambos valores de tensión máxima superan en gran medida el límite elástico de los materiales. Esto significa que el prototipo no soporta las tensiones que se espera que la prótesis resista. Aun así, no es necesario, ya que el prototipo servirá para comprobar el funcionamiento de los mecanismos, observar la geometría y sus dimensiones y poder mostrar el producto logrando un mayor entendimiento de este.

Como el comportamiento mecánico de ambos materiales es similar, se puede determinar que cualquiera es adecuado para la fabricación del prototipo. Por lo tanto, se selecciona el PETG porque, aun ofreciendo peores resultados en el análisis de tensiones, es más económico y no requiere accesorios de impresión específicos. Por el contrario, la fibra de carbono es un material más caro y se necesita un HotEnd metálico para su impresión. Aun así, será la mejor opción para fabricar aquellas piezas del producto final que se deseen imprimir.

5.5.2. Análisis de tensiones del producto final

En esta ocasión, se van a realizar cuatro ensayos diferentes, uno sobre la resistencia de las articulaciones y otros tres específicos para el pulgar, el mecanismo de bloqueo de la muñeca y el gancho de la palma.

Para el análisis del producto final se han incluido en el programa los datos de la aleación de aluminio 7075. Existen variaciones cuando la pieza proviene de una barra (Fig. 90) o de una pletina (Fig. 91), por lo que se han incluido ambos materiales en la base de datos.

	American	Spanish	German
Material designation	7075	L-3710	3.4364
Product	Drawn bar or rod		
Temper	T7351		
Thickness	50.83 <--> 76.20 mm		
Statistic basis	S		
Direction	L		

Ultimate Tensile Stress	Ftu	=	468.8	N/mm²
Tensile Yield Stress	Fty	=	386.1	N/mm²
Compressive Yield Stress	Fcy	=	372.3	N/mm²
Ultimate Stress in Shear	Fsu	=	275.8	N/mm²
Ultimate Bearing Stress (e/D=1.5)	Fbru	=	696.4	N/mm²
Ultimate Bearing Stress (e/D=2.0)	Fbru	=	903.2	N/mm²
Yield Bearing Stress (e/D=1.5)	Fbry	=	558.5	N/mm²
Yield Bearing Stress (e/D=2.0)	Fbry	=	689.5	N/mm²
Elongation	e (S-basis)	=	10.00	%
Modulus of Elasticity in Tension	Et	=	71016	N/mm²
Modulus of Elasticity in Compression	Ec	=	72395	N/mm²
Modulus of Elasticity in Shear	G	=	26890	N/mm²
Poisson's Ratio	μ	=	0.33	
Coefficient of thermal dilation (20°C)	α	=	---	1E-6/ºC

Fig. 90 Propiedades del Al7075 proveniente de barra. Fuente: DAMA 8.7

	American	Spanish	German
Material designation	7075	L-3710	3.4364
Product	Plate		
Temper	T7351		
Thickness	38.13 <--> 50.80 mm		
Statistic basis	B		
Direction	LT		

Ultimate Tensile Stress	Ftu	=	475.7	N/mm²
Tensile Yield Stress	Fty	=	393.0	N/mm²
Compressive Yield Stress	Fcy	=	406.8	N/mm²
Ultimate Stress in Shear	Fsu	=	275.8	N/mm²
Ultimate Bearing Stress (e/D=1.5)	Fbru	=	730.8	N/mm²
Ultimate Bearing Stress (e/D=2.0)	Fbru	=	937.7	N/mm²
Yield Bearing Stress (e/D=1.5)	Fbry	=	586.1	N/mm²
Yield Bearing Stress (e/D=2.0)	Fbry	=	696.4	N/mm²
Elongation	e (S-basis)	=	6.00	%
Modulus of Elasticity in Tension	Et	=	71016	N/mm²
Modulus of Elasticity in Compression	Ec	=	73084	N/mm²
Modulus of Elasticity in Shear	G	=	26890	N/mm²
Poisson's Ratio	μ	=	0.33	
Coefficient of thermal dilation (20°C)	α	=	---	1E-6/ºC

Fig. 91 Propiedades del Al7075 proveniente de pletina. Fuente: DAMA 8.7

Las piezas en forma de tubos huecos son extruidas y, por lo tanto, sus propiedades también pueden variar. Sin embargo, para el análisis de tensiones se va a suponer que sus propiedades son las del aluminio en barra, ya que los resultados no variarán de forma significativa.

También se ha incluido el material PEEK en la base de datos del programa. Los parámetros se han obtenido de la ficha técnica del material ofrecida por el distribuidor (Fig. 92).

TECAPEEK black - División de semielaborados

Designación química
PEEK (Polieteretercetona)

Color
negro opaco

Densidad
1.31 g/cm^3

Características principales
- Alta temperatura de deformación bajo carga (HDT)
- Retardante a la llama inherente
- resistente contra alta radiación
- alta resistencia mecánica
- buena resistencia química
- alta resistencia al creep
- resistente a la hidrólisis y al vapor

Propiedades mecánicas	*parámetro*	*valor*	*unidad*	*norma*	
Módulo de elasticidad (ensayo a tracción)	1mm/min	4100	MPa	DIN EN ISO 527-2	1)
Resistencia a tracción	50mm/min	100	MPa	DIN EN ISO 527-2	
Tensión límite elástico	50mm/min	100	MPa	DIN EN ISO 527-2	
Elongación a la fluencia	50mm/min	3	%	DIN EN ISO 527-2	
Elongación a rotura	50mm/min	3	%	DIN EN ISO 527-2	
Resistencia a flexión	2mm/min, 10 N	171	MPa	DIN EN ISO 178	2)
Módulo de elasticidad (ensayo a flexión)	2mm/min, 10 N	4100	MPa	DIN EN ISO 178	
Resistencia a compresión	1% / 2% / 5% 5mm/min, 10N	22/41/95	MPa	EN ISO 604	3)
Módulo de compresión	5mm/min, 10 N	3300	MPa	EN ISO 604	4)
Resistencia al impacto (Charpy)	máx. 7,5J	75	kJ/m^2	DIN EN ISO 179-1eU	5)
Dureza por indentación de bola		253	MPa	ISO 2039-1	6)

Fig. 92 Propiedades del PEEK. Fuente: Ensigner.

Cabe señalar que el material utilizado para los tornillos es acero inoxidable.

El primer análisis se realiza con la posición y carga iguales que en el análisis de tensiones del prototipo para estudiar el comportamiento de las articulaciones ante los esfuerzos.

En la Fig. 93 se observa que con este análisis el punto con mayor tensión se localiza en el agujero del tubo por el cual se une la muñeca. El valor de dicha tensión es 159,42 MPa, que es inferior al límite elástico del material de la pieza.

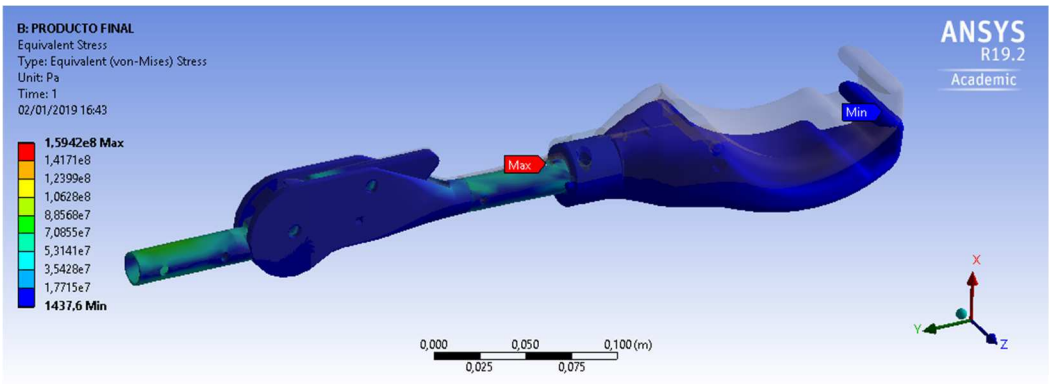


Fig. 93 Análisis de tensiones 1: tensiones máxima y mínima.

A continuación, se expone el resultado del análisis para cada pieza, incluyendo los puntos de máxima y mínima tensión. Comparando el valor máximo de tensión con el límite elástico se sabrá si el material es adecuado y si es necesario hacer modificaciones en el diseño de aquellas zonas de acumulación de tensiones.

La muñeca acumula tensiones en la zona de unión con el tubo. Como se muestra en la Fig. 94, la tensión máxima es igual a 96,48 MPa. Este valor queda muy por debajo del límite elástico del aluminio en barra que es 386,1 MPa.

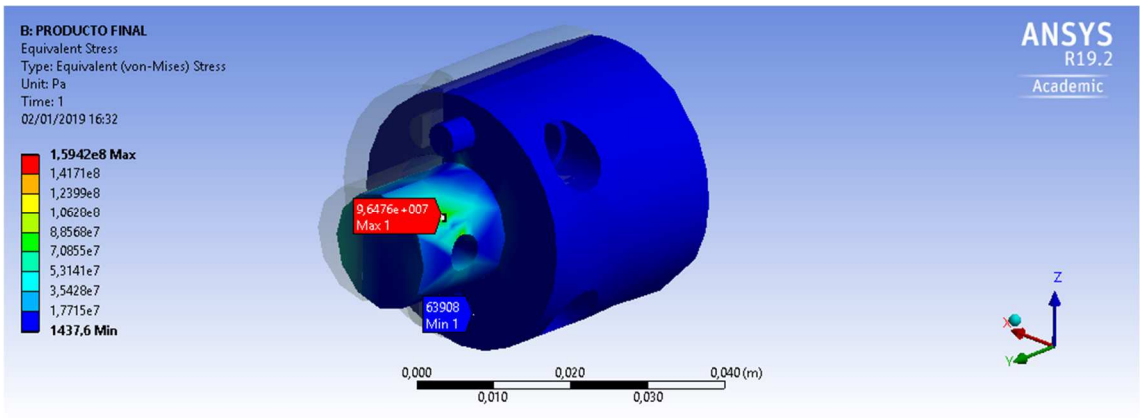


Fig. 94 Análisis de tensiones 1: muñeca.

La mayor acumulación de tensiones que se encuentra en la palma se sitúa en el eje de rotación de la muñeca (Fig. 95). El valor máximo de tensión es 84,88 MPa. El diseño es seguro ya que el límite elástico del PEEK es 100 MPa.

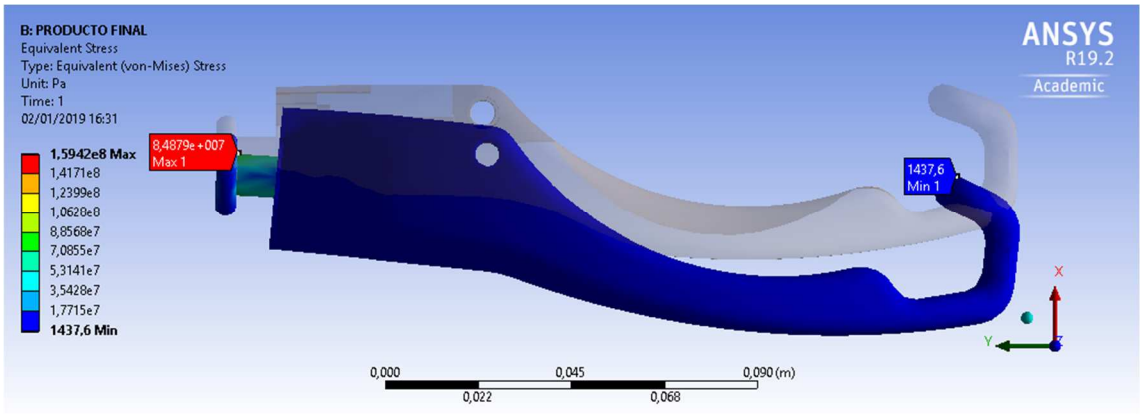


Fig. 95 Análisis de tensiones 1: palma.

Se ha observado previamente que la tensión mayor se encuentra en el tubo que une la muñeca y el codo y tiene un valor de 159,42. En la Fig. 96 se muestra con más detalle la distribución de tensiones en la pieza.

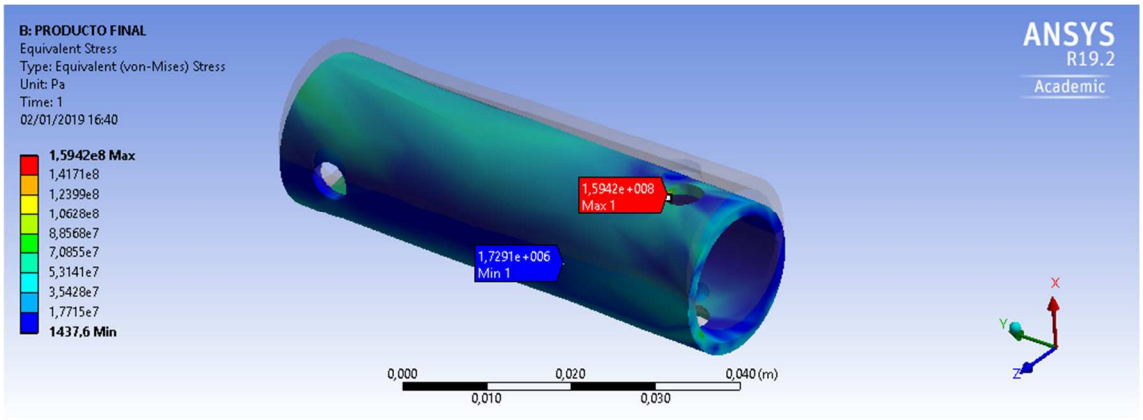


Fig. 96 Análisis de tensiones 1: unión entre articulaciones.

La mayor tensión acumulada en el extensor radial se encuentra en el agujero del eje de rotación de la muñeca y vale 34,25 MPa (Fig. 97), que supone aproximadamente un 35% del límite elástico. También se observa una acumulación de tensiones en la parte más próxima a la muñeca y en el otro agujero.

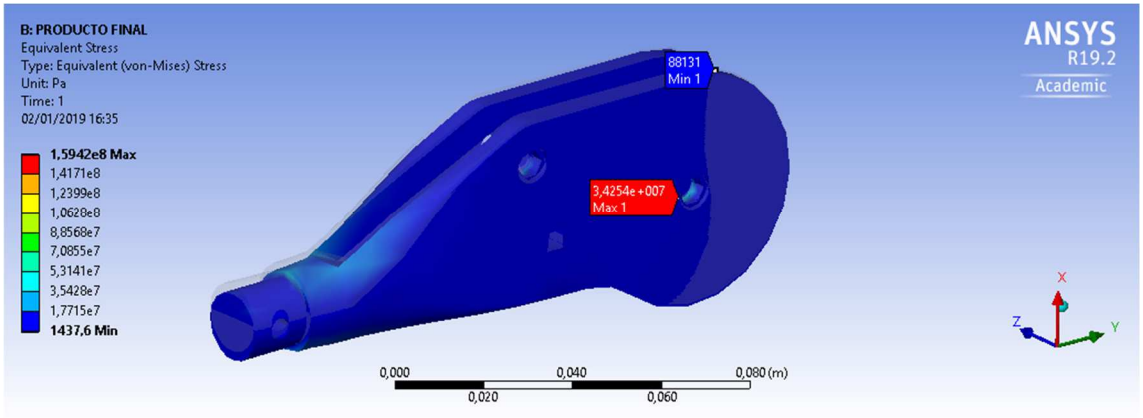


Fig. 97 Análisis de tensiones 1: extensor radial.

El húmero tiene sus tensiones altas distribuidas por la pieza como se ve en la Fig. 98 y alcanza su mayor valor en el saliente donde se aloja el bloqueador. Esta tensión es de 77,65 MPa.

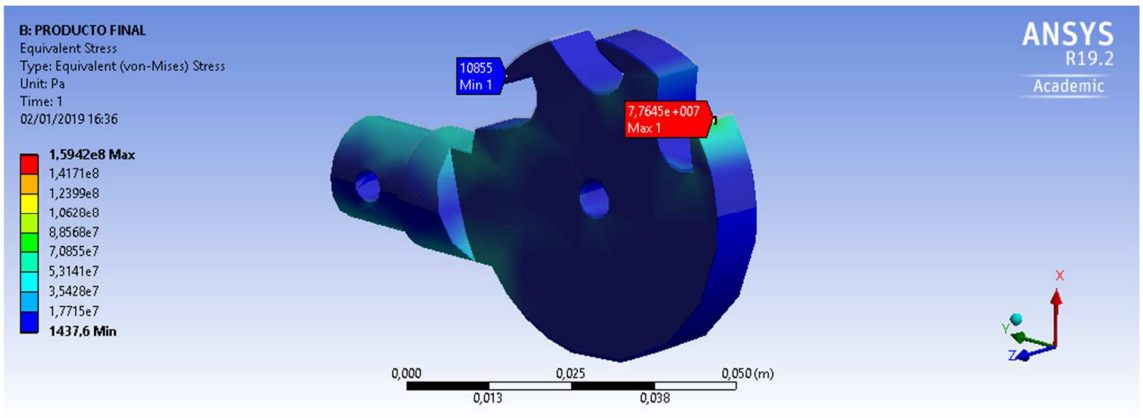


Fig. 98 Análisis de tensiones 1: húmero.

La mayor tensión que se crea en el bloqueador del codo se sitúa en la parte que se aloja en el húmero, aunque también aparecen tensiones altas cerca de los agujeros. El valor máximo de tensión es 56,50 MPa. Las tensiones acumuladas tanto en el bloqueador como en el húmero no superan el límite elástico del material.

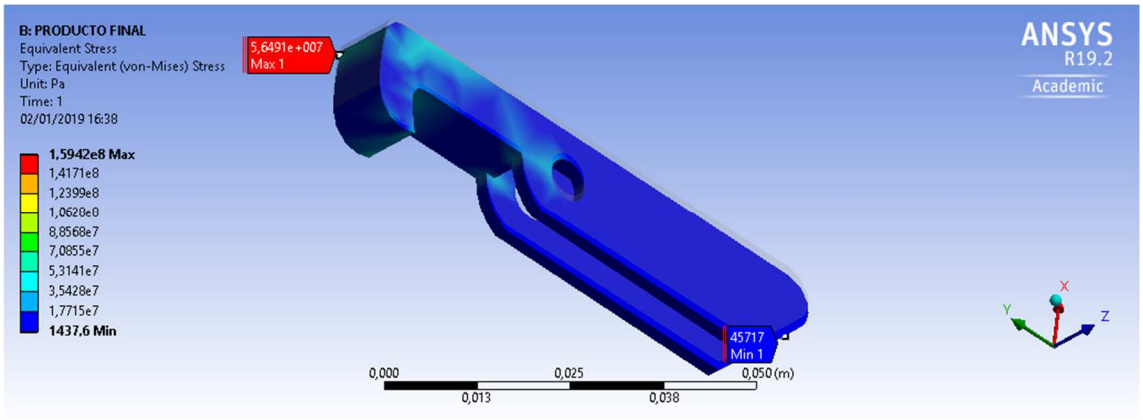


Fig. 99 Análisis de tensiones 1: Bloqueador del codo.

Por último, el valor máximo de tensión en la pieza de unión entre la articulación del codo y el encaje es 98,71 MPa, que queda lejos del valor del límite elástico del aluminio. Este valor se localiza en la parte inferior del tubo, aunque las tensiones están bien distribuidas entre la parte superior e inferior, evitando cualquier punto de acumulación de tensiones y posible rotura.

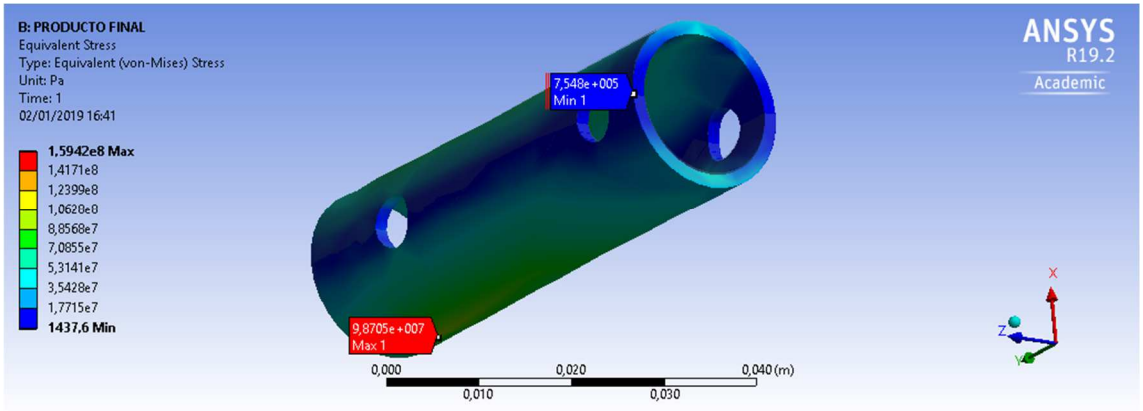


Fig. 100 Análisis de tensiones 1: unión entre codo y encaje.

El segundo análisis consiste en evaluar el comportamiento del pulgar cuando se somete a un esfuerzo de agarre. La fuerza ejercida por el muelle se simula aplicando un momento de 0,92 N/m al pulgar en el eje de rotación. Este valor se obtuvo durante el cálculo del muelle. Por otro lado, se aplica una carga de 20 N que representa la fuerza que puede hacer la mano para abrir el pulgar de la prótesis (Fig. 101).

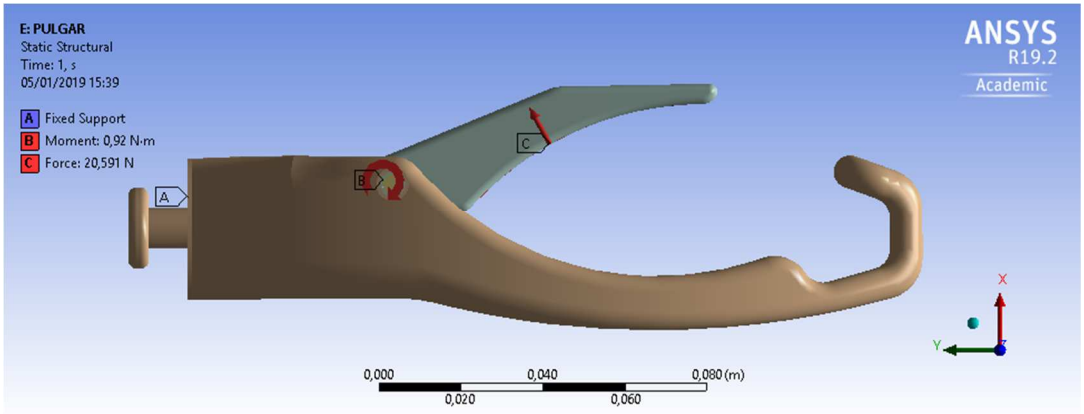


Fig. 101 Análisis de tensiones 2: posición y cargas.

Se ha obtenido un resultado de tensión máxima de 3,39 MPa (Fig. 102). Esta tensión está situada en el agujero del pulgar como se ve en la Fig. 103. Esta tensión es muy pequeña en comparación con el límite elástico del material, por lo que no hay ningún riesgo de rotura.

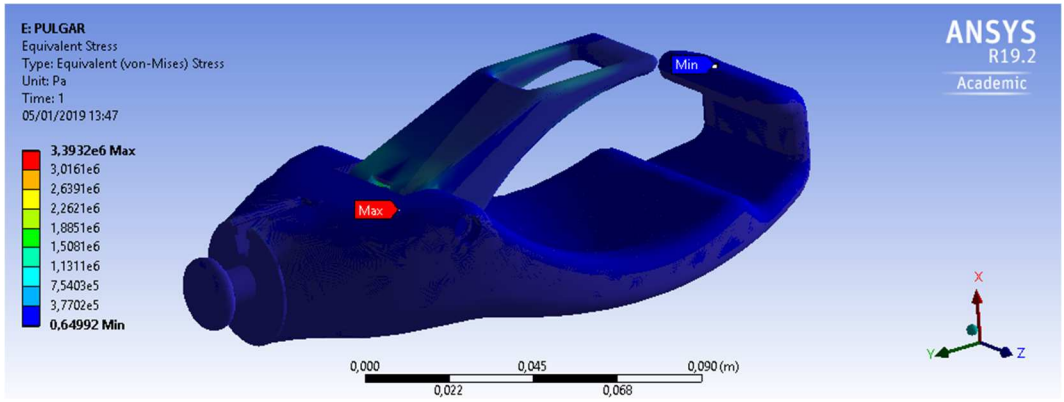


Fig. 102 Análisis de tensiones 2: tensiones máxima y mínima.

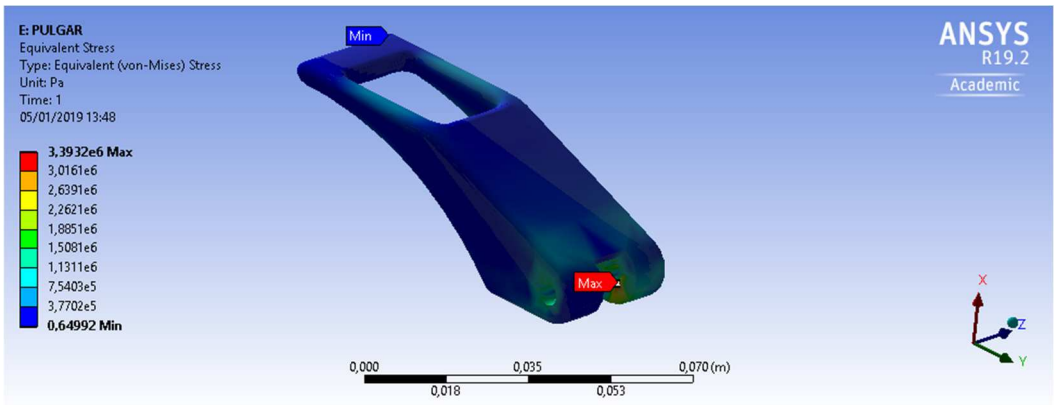


Fig. 103 Análisis de tensiones 2: localización del valor máximo de tensión.

El tercer análisis se realiza para estudiar la resistencia de la muñeca ante un esfuerzo que trata de rotarla cuando está bloqueada. En el análisis la muñeca se encuentra fija y se aplica un momento de 20 N/m que representa la fuerza de la mano para girar la muñeca (Fig. 104).

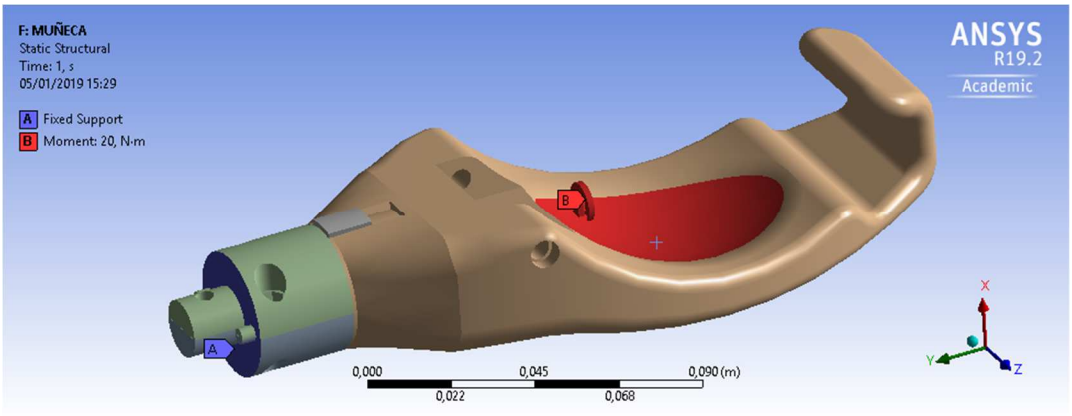


Fig. 104 Análisis de tensiones 3: posición y cargas.

El resultado del análisis muestra que la muñeca y la palma no sufren tantas tensiones como la tercera pieza (Fig. 105). La tensión se acumula en el bloqueador, llegando a un valor máximo de 365,16 MPa. La tensión se acumula en el punto medio entre la muñeca y la palma (Fig. 106) donde las fuerzas cambian de sentido produciendo un esfuerzo de cizallamiento.

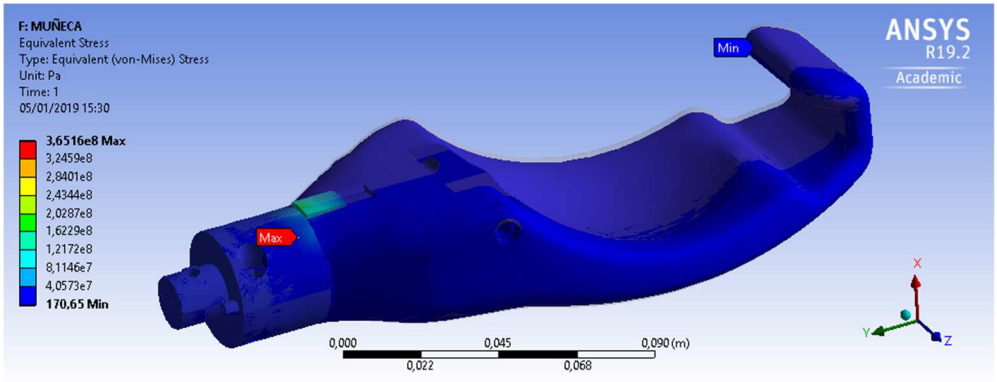


Fig. 105 Análisis de tensiones 3: tensiones máxima y mínima.

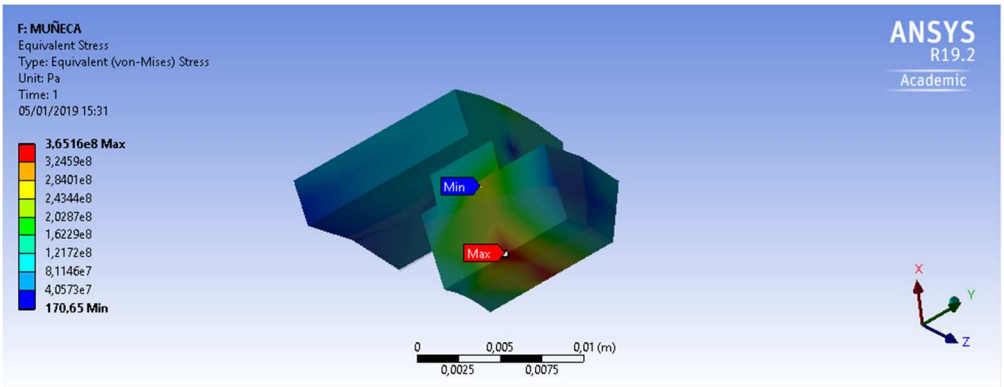


Fig. 106 Análisis de tensiones 3: localización del valor máximo de tensión.

El cuarto y último análisis tiene como objetico estudiar la resistencia del gancho cuando se coloca una carga de 8 kilogramos. Para realizar el análisis se ha aislado la palma y se ha fijado en la parte de la muñeca como muestra la Fig. 107.

La carga de 80 N se sitúa en la dirección en la que el gancho se utilizará habitualmente. También se tiene en cuanta la fuerza de la gravedad.

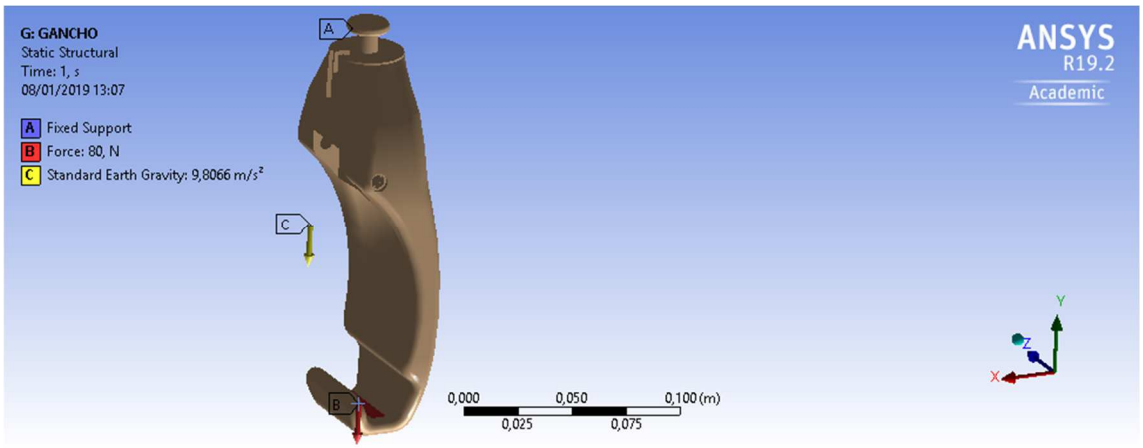


Fig. 107 Análisis de tensiones 4: posición y cargas.

Los resultados muestran que las tensiones mayores aparecen en el eje de la muñeca y en el gancho (Fig. 108). La tensión máxima, situada en el eje, es igual a 4,76 MPa. Esta tensión es muy inferior al límite elástico del material por lo que la pieza es segura.

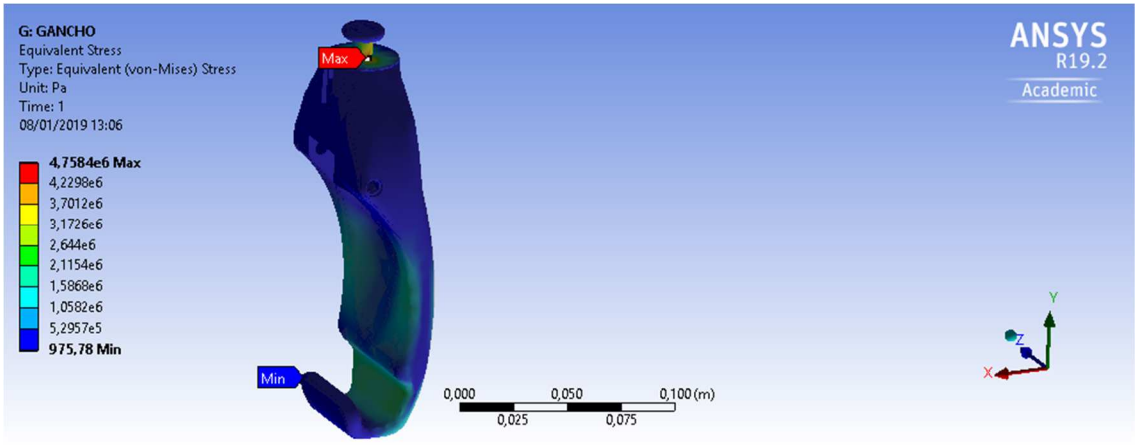


Fig. 108 Análisis de tensiones 4: valores de tensión máximo y mínimo.

5.5.3. Optimización del diseño

Tras la realización de los análisis de tensión se puede determinar que el diseño soporta bien los esfuerzos a los que puede estar sometido. Se ha observado que muchos de los valores de tensión máxima quedan lejos de alcanzar el valor del límite elástico del material. Solo en algún caso se aproxima a este valor.

En lo que a resistencia mecánica se refiere se podría decir que algunas de las piezas están sobredimensionadas, sin embargo, la geometría y dimensiones de las piezas no solo dependen de esta resistencia, sino que responden a los requerimientos y condiciones de diseño. Por ejemplo, la palma es una pieza que soporta mayores esfuerzos, pero su forma cumple una función y su tamaño se corresponde con las dimensiones del usuario.

Con el objetivo de mejorar el producto se ha tratado de evitar las aristas vivas en las diferentes piezas, por un lado, porque son zonas donde las tensiones se acumulan con mayor facilidad y, por otro lado, porque resultan más molestas al tacto que una arista redondeada. Por ello una modificación del diseño de las piezas es el redondeo de las aristas.

Por otro lado, se han pensado varias modificaciones para optimizar el diseño utilizando menos material y reduciendo el peso. Dos de los cambios se localizan en la palma y el tercero en el extensor radial de la articulación del codo.

La primera modificación consiste en un agujero situado en la concavidad del interior de la palma (Fig. 109). Con este cambio se elimina bastante material y aún permite el agarre de elementos esféricos. Sin embargo, se ha decidido no implementar la optimización ya que reduce la funcionalidad del diseño al aumentar el tamaño mínimo del objeto que se puede sujetar.

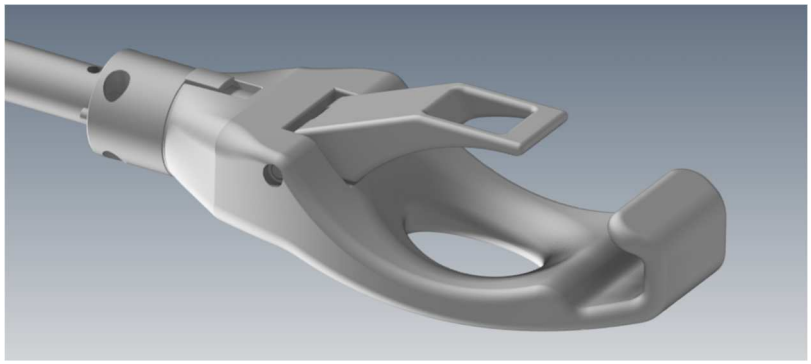


Fig. 109 Optimización del diseño 1: agujero en la palma.

La segunda optimización consiste en modificar el gancho de la palma conservando los contornos y eliminando el interior del sólido (Fig. 110). Aunque se logra una reducción del material utilizado también se elimina una de las funciones de la palma. Su terminación plana está diseñada para la función de empuje y, eliminando el material, se limitaría esta función.

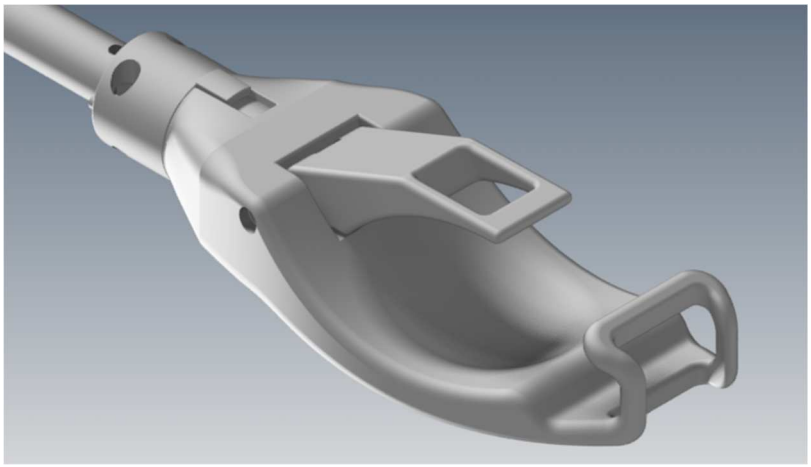


Fig. 110 Optimización del diseño 2: gancho de la palma.

La última modificación, realizada en el extensor radial, consiste en la elaboración de varios agujeros en las paredes de la pieza que eliminan material no necesario (Fig. 111). Esta será la única optimización que se llevará a cabo en el producto.

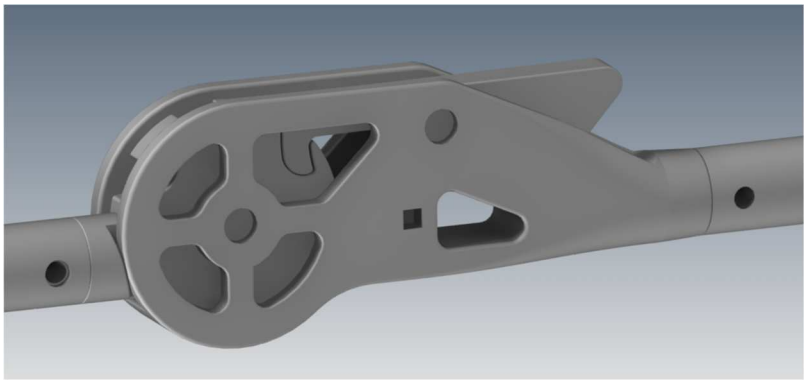


Fig. 111 Optimización del diseño 3: extensor radial.

Para comprobar si la optimización es válida se ha realizado un análisis de tensiones sobre la pieza. Al aislar la pieza se ha definido el eje de rotación del codo como punto fijo y se ha aplicado una fuerza remota de 80 N a la distancia a la que se encuentra la carga (Fig. 112).

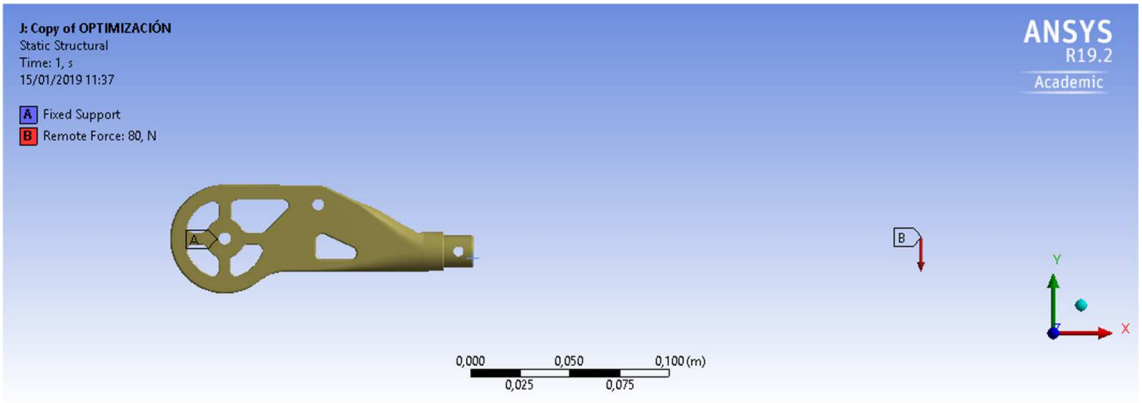


Fig. 112 Análisis de tensiones de la pieza optimizada: posición y cargas.

Se observa que el valor máximo de tensión se encuentra en uno de los agujeros realizados para eliminar material y tiene un valor de 72,1 MPa (Fig. 113). Si se compara con el límite elástico del material, que es 100 MPa, podemos determinar que la pieza es resistente con un factor de seguridad de 1,4. También se observa acumulación de tensiones en el eje de rotación de la muñeca y en la zona de unión con la muñeca.

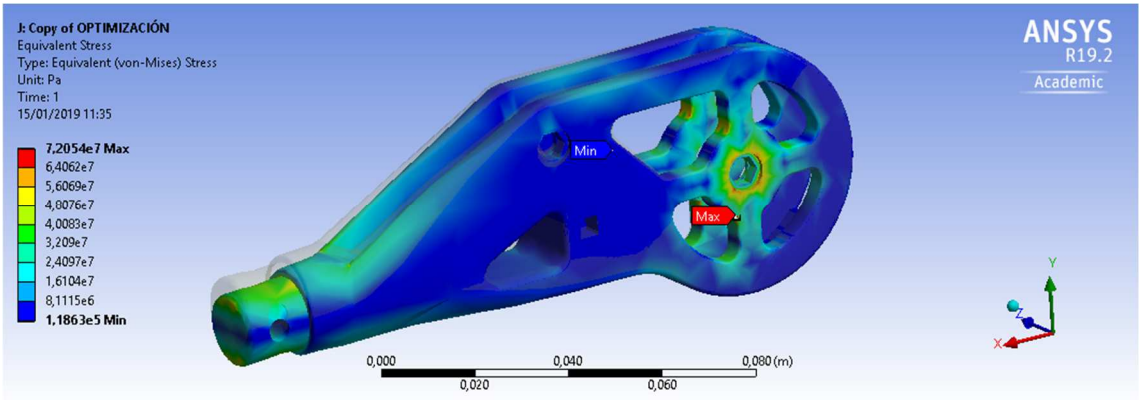


Fig. 113 Análisis de tensiones de la pieza optimizada: valores de tensión máximo y mínimo.

En conclusión, la optimización realizada es apta para la incorporación en el producto, ya que ofrecerá un buen resultado. Así se ha logrado reducir el material utilizado en la prótesis.

6. Fabricación y montaje

Los procesos de fabricación de las diferentes partes de la prótesis de brazo son variados. En este apartado se indican las características necesarias con respecto a la fabricación del producto y su montaje. La fabricación se divide en tres apartados: piezas fabricadas mediante impresión 3D, piezas mecanizadas y fabricación del arnés.

Además, se incluye la fabricación de un prototipo mediante impresión 3D. Este prototipo se realiza con el objetivo de comprobar la geometría del producto y el funcionamiento de los mecanismos y mostrar el producto logrando una mayor comprensión de este.

6.1.Fabricación del producto

6.1.1. Fabricación por impresión 3D

Las piezas de la prótesis que se fabrican por impresión 3D son el encaje y las dos carcasas. Para la fabricación aditiva por impresión 3D en FDM es necesario especificar los parámetros de impresión, así como la dirección de impresión de las piezas. En la siguiente tabla, se especifican los parámetros de impresión comunes para las piezas fabricadas en fibra de carbono (Tabla 30).

PARAMETROS	FIBRA DE CARBONO
Tecnología de impresión	FDM
Máquina	TEVO Tornado
Altura de capa (mm)	0,2
Velocidad de impresión (mm/s)	50
Temperatura del Hot-End (°C)	245
Temperatura de la cama (°C)	50
Relleno (%)	100

Tabla 30 Fabricación: parámetros de impresión.

En la Fig. 114 se puede observar la dirección de impresión de las tres piezas.

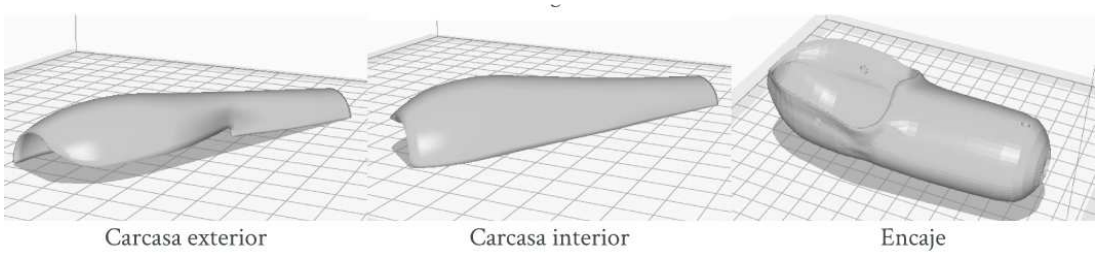


Fig. 114 Fabricación: posiciones de impresión.

En la impresión 3D es importante tener en cuenta el material de aporte necesario para la fabricación de las piezas. El material de aporte es material añadido que sirve como soporte para aquellas partes de la pieza que no se sostienen por sí solas durante la impresión. Posteriormente, estas estructuras se retiran de la pieza con ayuda de herramientas para dejar únicamente la pieza deseada. La inclusión del material de aporte implica un aumento en costes, ya que se utiliza más material y más tiempo para la fabricación.

Utilizando el programa Ultimaker Cura se han calculado los tiempos de impresión de las piezas (Tabla 31), incluyendo los soportes.

PIEZA	Carcasa interior	Carcasa exterior	Encaje
TIEMPO	12 h 13 min	12 h 12 min	18 h 14 min

Tabla 31 Tiempo de impresión de las piezas.

6.1.2. Fabricación por mecanizado

Las piezas que se van a fabricar por mecanizado son, por un lado, las de aluminio: la muñeca, el bloqueador de la muñeca, el húmero, el bloqueador del codo y los tubos; y por otro lado, las piezas de PEEK: la palma, el pulgar y el extensor radial.

Combinado tecnologías como el torneado, el fresado o el taladro se pueden obtener las piezas. Utilizando programas CAM se puede calcular el proceso necesario y el código CNC para la fabricación de las piezas a partir de una preforma de material. El programa lo realiza a partir de un modelo 3D de la pieza.

A continuación, se muestra una aproximación de las dimensiones de la preforma de cada pieza y del tiempo de mecanizado (Tabla 32). Esta aproximación servirá para realizar una estimación de costes posteriormente.

PIEZA		PREFORMA	TIEMPO
Aluminio	Muñeca (dos piezas)	43 x 35Ø	2 h
	Bloqueador de la muñeca	18 x 12 x 10	15 min
	Húmero	55 x 50 x 20	1 h 30 min
	Bloqueador del codo	80 x 16 x 10	45 min
	Tubos	61 x 19Ø	30 min
PEEK	Palma	194 x 75 x 41	3 h
	Pulgar	89 x 30 x 31	30 min
	Extensor radial	153 x 55 x 21	1 h 30 min

Tabla 32 Fabricación por mecanizado: aproximación de dimensiones y tiempo.

6.1.3. Fabricación del arnés

La fabricación del arnés se lleva a cabo utilizando una máquina de coser. Está formado por una pieza de neopreno, una correa, un cojín protector y una hebilla (Fig. 115). El neopreno es una tela fuerte, gruesa, suave y algo elástica, que se adapta bien a las formas del hombro y la prótesis. La correa es una cinta de espiga de tres centímetros de ancho. El cierre es una hebilla de apertura rápida de poliamida. Para la costura se utiliza hilo de torzal, un hilo de poliéster utilizado para coser telas fuertes como telas vaqueras, lonas, cuero y neopreno.

Fig. 115 Fabricación del arnés: materiales.

En primer lugar, se corta la tela utilizando un patrón (Fig. 116). Se unen las dos mitades de la manga. La correa se cose a la manga por la parte trasera y la hebilla, por la parte delantera, utilizando un trozo de la correa. El cojín protector consiste en una pieza de neopreno cosida en forma cilíndrica que se introduce alrededor de la correa.

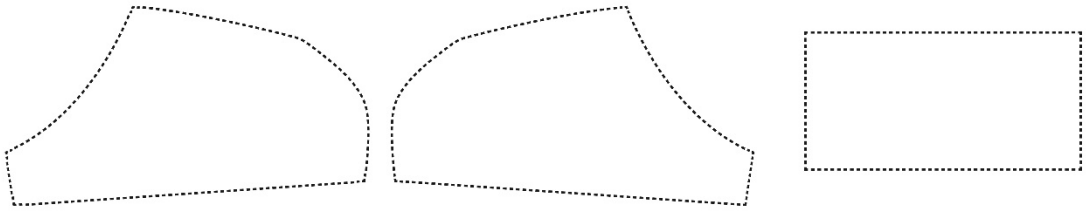


Fig. 116 Fabricación del arnés: patrones de la manga y el cojín.

De esta forma, el arnés ya estaría listo para el montaje sobre la prótesis (Fig. 117). Los agujeros necesarios para el montaje se hacen durante el mismo proceso, haciéndolos coincidir con los agujeros del encaje.

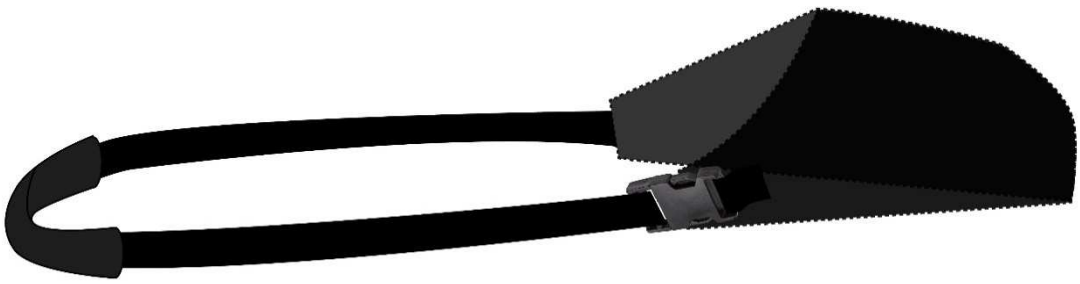


Fig. 117 Fabricación del arnés. Resultado.

6.1.4. Piezas comerciales

Para la fabricación de la prótesis de brazo se utilizan algunas piezas adquiridas en el mercado. En general son piezas de unión entre aquellas de fabricación propia. En la Tabla 33 se incluye el conjunto de piezas adquiridas, indicando el distribuidor, las especificaciones del producto y la parte de la prótesis en la que se utilizan.

PIEZA	ESPECIFICACIONES	DISTRIBUIDOR	UTILIDAD
Hebilla de apertura rápida	Material: poliamida Enganche: 30mm. Color: negro	Leroy Merlín	Cierre del arnés
Remaches para tela	Material: latón Diámetro de la cabeza: 9mm. Color: negro	Curtidos Carrasco	Unión de la manga y el encaje.
Tornillos con funda	Material: acero inoxidable Métrica: 4mm. Diámetro de la funda: 5mm.	Mengual	Ejes de unión: dos en la articulación del codo, uno en el pulgar, dos en la muñeca y uno en el encaje.
Resorte de torsión 180°	Material: acero inoxidable Diámetro: 10mm. Alambre: 2mm.	Muelles Ros	Mecanismo del pulgar.
Resorte de torsión 90°	Material: acero inoxidable Diámetro: 9mm. Alambre: 1,5mm.	Muelles Ros	Mecanismo del codo.
Resorte de compresión	Material: acero inoxidable Diámetro: 4mm. K: 2 N/mm.	Muelles Ros	Mecanismo de la muñeca
Remaches	Cuerpo: 5 x 25mm. Material: aluminio	Gesipa	Uniones entre articulaciones

Tabla 33 Piezas adquiridas en el mercado.

6.2. Fabricación del prototipo

La fabricación del prototipo se realiza enteramente mediante impresión 3D. El material seleccionado es PETG y los parámetros de impresión de las piezas se especifican en la Tabla 34. El encaje se imprime en una máquina diferente por sus dimensiones.

PARAMETROS	ENCAJE	RESTO DE PIEZAS
Tecnología de impresión	FDM	FDM
Máquina	TEVO Tornado	PRUSA MK3
Altura de capa (mm)	0,2	0,2
Velocidad de impresión (mm/s)	50	50
Temperatura del Hot-End (°C)	235	235
Temperatura de la cama (°C)	85	85
Relleno (%)	100	100

Tabla 34 Fabricación del prototipo: parámetros de impresión.

En la Fig. 118 se muestra la dirección de impresión de cada una de las piezas.

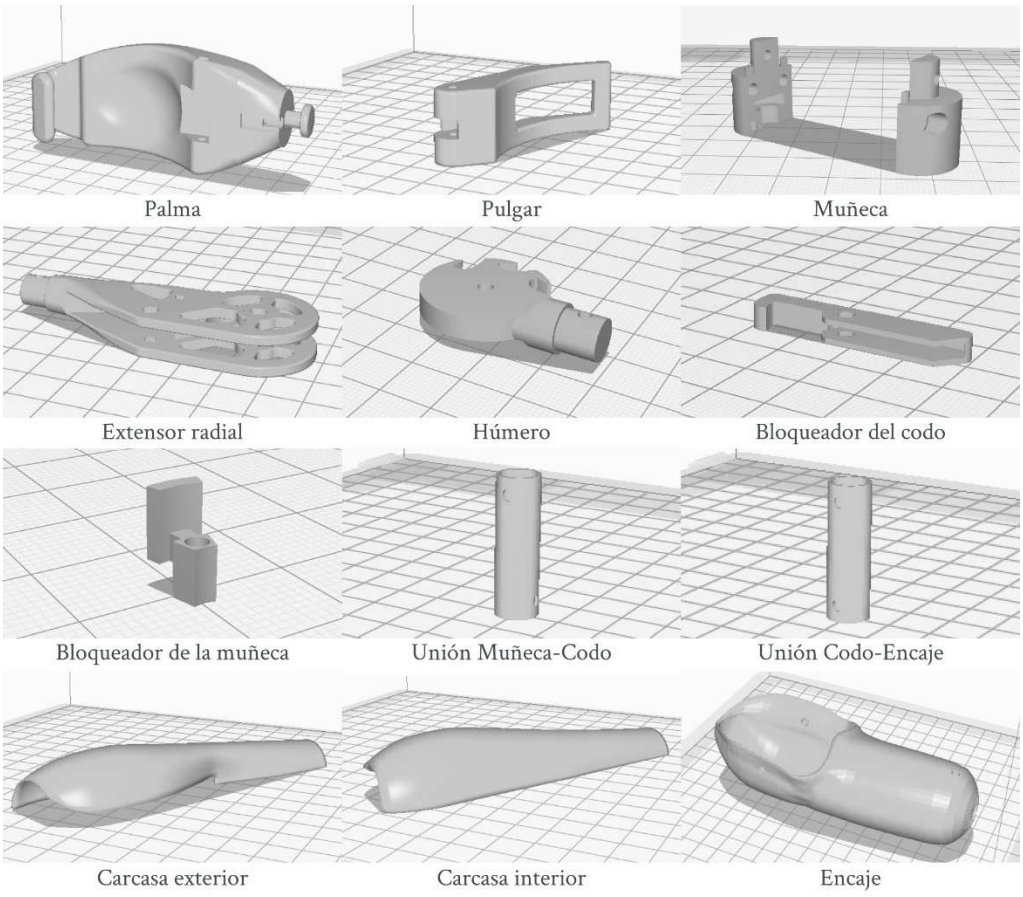


Fig. 118 Fabricación del prototipo: posiciones de impresión.

En la Tabla 35 se especifican los tiempos de impresión para cada pieza teniendo en cuanta el material de aporte.

PIEZAS	TIEMPO
Palma	12 h 46 min
Pulgar	4 h 42 min
Muñeca	3 h 16 min
Bloqueador de la muñeca	11 min
Unión muñeca-codo	1 h 22 min
Extensor radial	7 h 09 min
Húmero	2 h 09 min
Bloqueador del codo	1 h 05 min
Unión codo-encaje	1 h 22 min
Encaje	18 h 14 min
Carcasa interior	12 h 13 min
Carcasa exterior	12 h 12 min

Tabla 35 Fabricación del prototipo: tiempo de impresión de las piezas.

6.3. Montaje

El montaje de la prótesis se lleva cabo en tres fases: montaje de las articulaciones, unión de las articulaciones y unión del arnés. En la primera fase se unen las piezas que forman la muñeca y el codo. En la segunda, se unen mediante los tubos y se colocan las carcasas. Finalmente se coloca el arnés.

El montaje de la mano y la articulación de la muñeca tiene como pieza base la palma (Fig. 119). Para el montaje del pulgar se coloca un lado del resorte en el orificio de esta pieza y el otro en el que se encuentra en la palma. Se sitúa el pulgar en posición y, con el eje, se unen las piezas. Previo al montaje de la muñeca, se coloca el muelle de compresión y el bloqueador en la ranura de la palma. Mientras se mantiene el muelle comprimido se colocan las dos piezas que forman la muñeca y se unen atornillando dos ejes. En la imagen se muestran las diferentes partes del montaje. Los ejes se representan mediante cilindros.

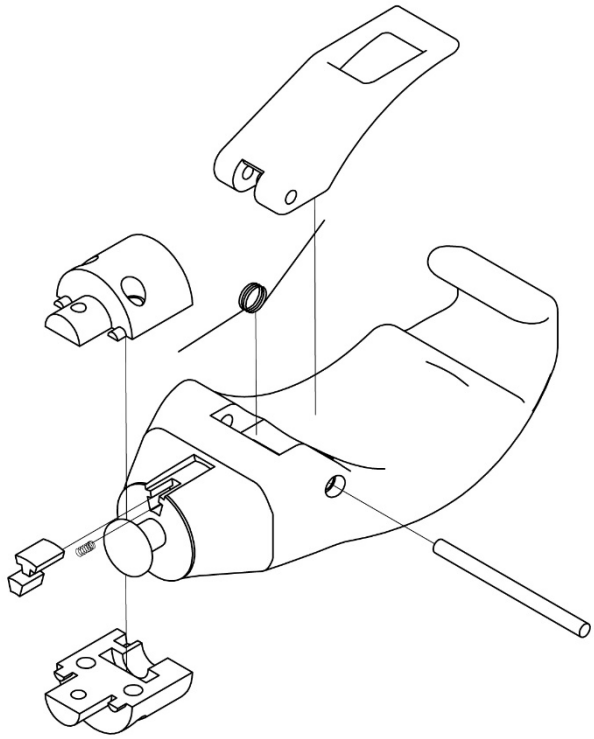


Fig. 119 Montaje: mano y articulación de la muñeca.

El extensor radial es la base del montaje de la articulación del codo (Fig. 120). En primer lugar, se coloca una parte del muelle de torsión en el hueco bajo el bloqueador y, forzando el resorte contra la pieza base, se alinean los ejes para colocar el eje. Por último, se introduce el húmero entre las paredes del extensor radial y se bloquea con otro eje.

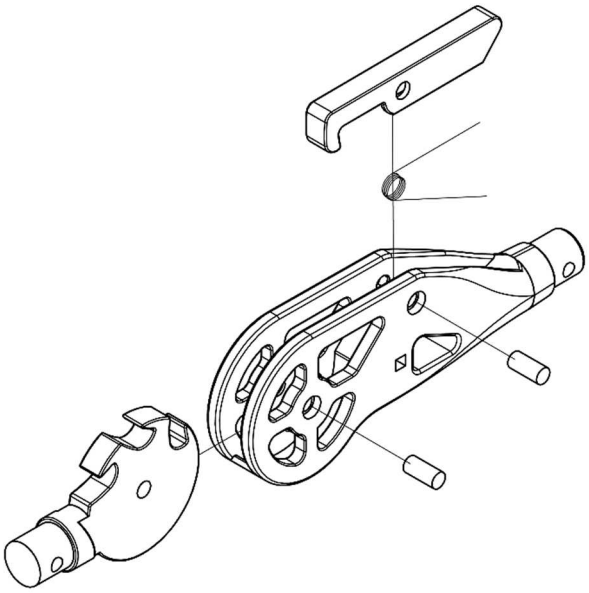


Fig. 120 Montaje: articulación del codo.

Con estas dos articulaciones montadas comienza la segunda fase (Fig. 121). El codo y la muñeca se encajan en el interior de los extremos del primer tubo. Se fijan con remaches en posición trasversal. El segundo tubo se une al codo de la misma forma, pero su unión con el encaje es diferente. El tubo se introduce en el agujero del encaje y se fija con un eje trasversal. En este punto del montaje se unen las carcasas a ambos lados de la prótesis.

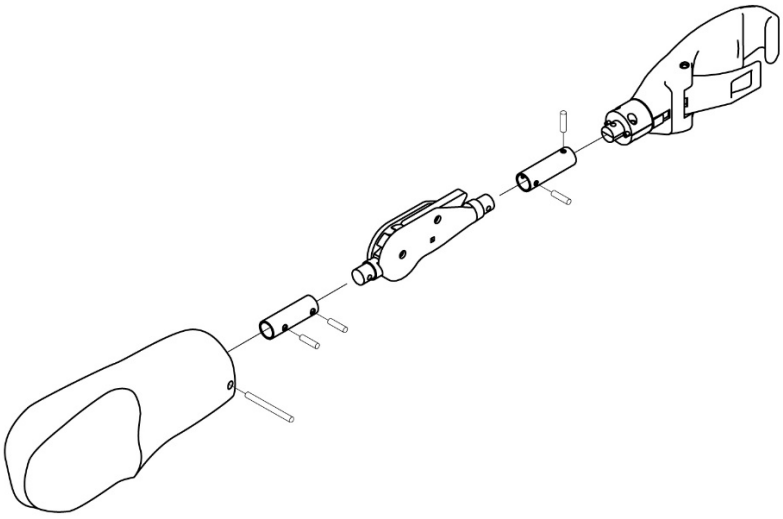


Fig. 121 Montaje: unión de las articulaciones.

Para el montaje del arnés y el encaje el usuario se coloca ambas partes para ajustar la colocación cómoda y natural de la manga y marcar los puntos de unión en la manga. Utilizando una remachadora se hacen los agujeros en la tela y se une al encaje mediante remaches para tela.

Tras estas dos fases la prótesis queda montada. Para su utilización, se ajusta la correa a la medida a la que el usuario se encuentre más cómodo y pueda manejar la prótesis con normalidad.

7. Presupuesto

En este apartado del proyecto se elabora un presupuesto del producto determinando los costes de fabricación. Se consideran los costes directos asociados a la unidad de producción y los costes indirectos. Los costes de fabricación contemplan los costes de mano de obra, de materiales y de equipos y maquinaria.

La Tabla 36 muestra los costes de mano de obra directa. Al ser un proyecto en el que se realiza una única unidad, la fabricación de cada pieza se encarga a entidades externas, por lo tanto, no se contratan operarios y los costes correspondientes al mecanizado, la impresión 3D y a la fabricación del arnés se incluyen en los costes de producción. Los costes de mano de obra directa incluyen el diseño del producto, y el montaje.

DESCRIPCIÓN	PIEZA	TIEMPO (h)	COSTE (€/h)	COSTE TOTAL (€)
Diseño de producto	Completo	160	15	2400
Montaje	Completo	1	10	10
COSTE UNITARIO (€)	2410			

Tabla 36 Costes de mano de obra directa.

Generalmente, el proceso de montaje supone costes de mano de obra y de amortización y puesto de trabajo. Sin embargo, en este proyecto no se requiere maquinaria para realizar el montaje del producto. Solo es necesario un operario y el utillaje.

La Tabla 37 muestra los costes directos de material. El precio del PEEK se ha consultado a un proveedor de materiales plásticos para mecanizado [29], el precio del aluminio a un proveedor de metales [30]. Los precios corresponden al material necesario para la preforma teniendo en cuenta las mediadas disponibles. El precio del filamento de fibra de carbono se ha consultado en la página web la marca ColorFabb [31]. Se muestran también en esta tabla los costes indirectos de material.

MATERIAL		PIEZA	UNIDAD DE MEDIDA	COSTE (€/u)	CANTIDAD (u)	COSTE TOTAL (€)
COSTE DIRECTO	PEEK	Palma	Kilogramos	200	0,78	156
		Pulgar	Kilogramos		0,10	20
		Extensor radial	Kilogramos		0,23	76
	Filamento FC	Carcasa interior	Kilogramos	67	0,030	2,01
		Carcasa exterior	Kilogramos		0,030	2,01
		Encaje	Kilogramos		0,669	44,8
	Aluminio 7075	Muñeca	Kilogramos	5,45	0,090	0,49
		Bloqueador de muñeca	Metros	(50 x 20) 21,92	0,010	0,22
		Bloqueador codo	Metros		0,010	0,22
		Húmero	Metros		0,055	1,21
		Tubos	Kilogramos	1,90	0,027	0,05
	Neopreno	Manga	Metro	7,50	0,5	3,75
	Comercial	Muelle (torsión)	Unidades	3,6	2	7,2
		Muelle (compresión)	Unidades	2	1	2
		Hebilla	Unidades	1,56	1	1,56
		Correa	Unidades	0,98	1	0,98
COSTE INDIRECTO	Comercial	Ejes	Unidades	0,57	6	3,42
		Remaches	Unidades	0,67	3	2,01
		Remaches para tela	Unidades	0,09	3	0,27
		Hilo	Bobinas	2,40	1	2,40
COSTE UNITARIO (€)		326,60				

Tabla 37 Coste de material.

La Tabla 38 muestra los costes de puesto de trabajo, amortización, electricidad y mano de obra de las operaciones contratadas que incluyen la impresión 3D, la de mecanizado y la confección del arnés. Los costes se han consultado a diversas empresas del sector.

DESCRIPCIÓN	PIEZA	TIEMPO (h)	COSTE (€/h)	COSTE TOTAL (€)
Impresión 3D	Carcasa interior	12,22	6	73,32
	Carcasa exterior	12,20		73,2
	Encaje	18,23		109,38
Mecanizado	Bloqueador de muñeca	0,25	30	7,5
	Muñeca	2		60
	Bloqueador codo	1		30
	Húmero	1,5		45
	Tubos	0,5		15
	Palma	3		90
	Pulgar	1,5		45
	Extensor radial	2		60
Confección del arnés	Arnés	1	15	15
COSTE UNITARIO (€)	623,40			

Tabla 38 Costes de procesos externalizados.

Sumando los tres tipos de coste se obtiene el coste unitario total del producto (Tabla 39):

MANO DE OBRA DIRECTA	MATERIAL	PRODUCCIÓN	TOTAL
2410	326,60	623,40	3360

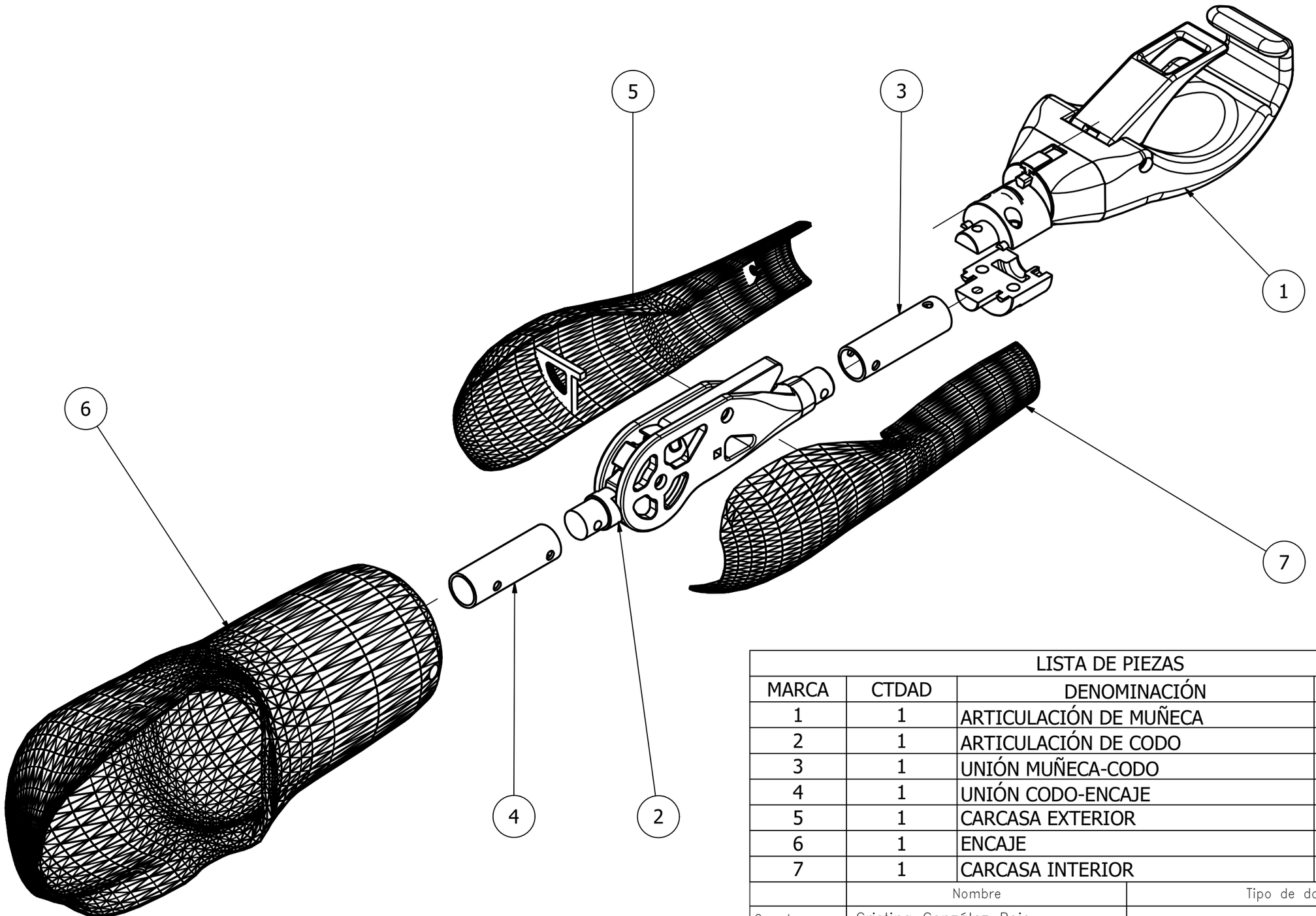
Tabla 39 Coste total unitario.

8. Representación gráfica del producto

8.1.Planos

A continuación, se incluyen los planos de las diferentes piezas que conforman la prótesis de brazo. Como se ha mencionado anteriormente, para la fabricación del producto se necesitan únicamente los modelos 3d digitales. Por ello, los planos que se muestran sirven como apoyo a la comprensión de las piezas y sus dimensiones básicas. Los planos ofrecen una visualización rápida de los componentes del producto y del conjunto que forman, para ello se incluye en el plano de conjunto la lista de materiales.

Los planos explosionados son una útil fuente de información para aquel trabajador que se encarga del montaje del producto. Estos planos le permitirán entender los pasos para el montaje, de modo que su trabajo resulte lo más sencillo posible.



LISTA DE PIEZAS			
MARCA	CTDAD	DENOMINACIÓN	Nº
1	1	ARTICULACIÓN DE MUÑECA	PB1.01.00
2	1	ARTICULACIÓN DE CODO	PB1.02.00
3	1	UNIÓN MUÑECA-CODO	PB1.03.00
4	1	UNIÓN CODO-ENCAJE	PB1.04.00
5	1	CARCASA EXTERIOR	PB1.05.00
6	1	ENCAJE	PB1.06.00
7	1	CARCASA INTERIOR	PB1.07.00

	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo explosionado
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:2

U.DIM.

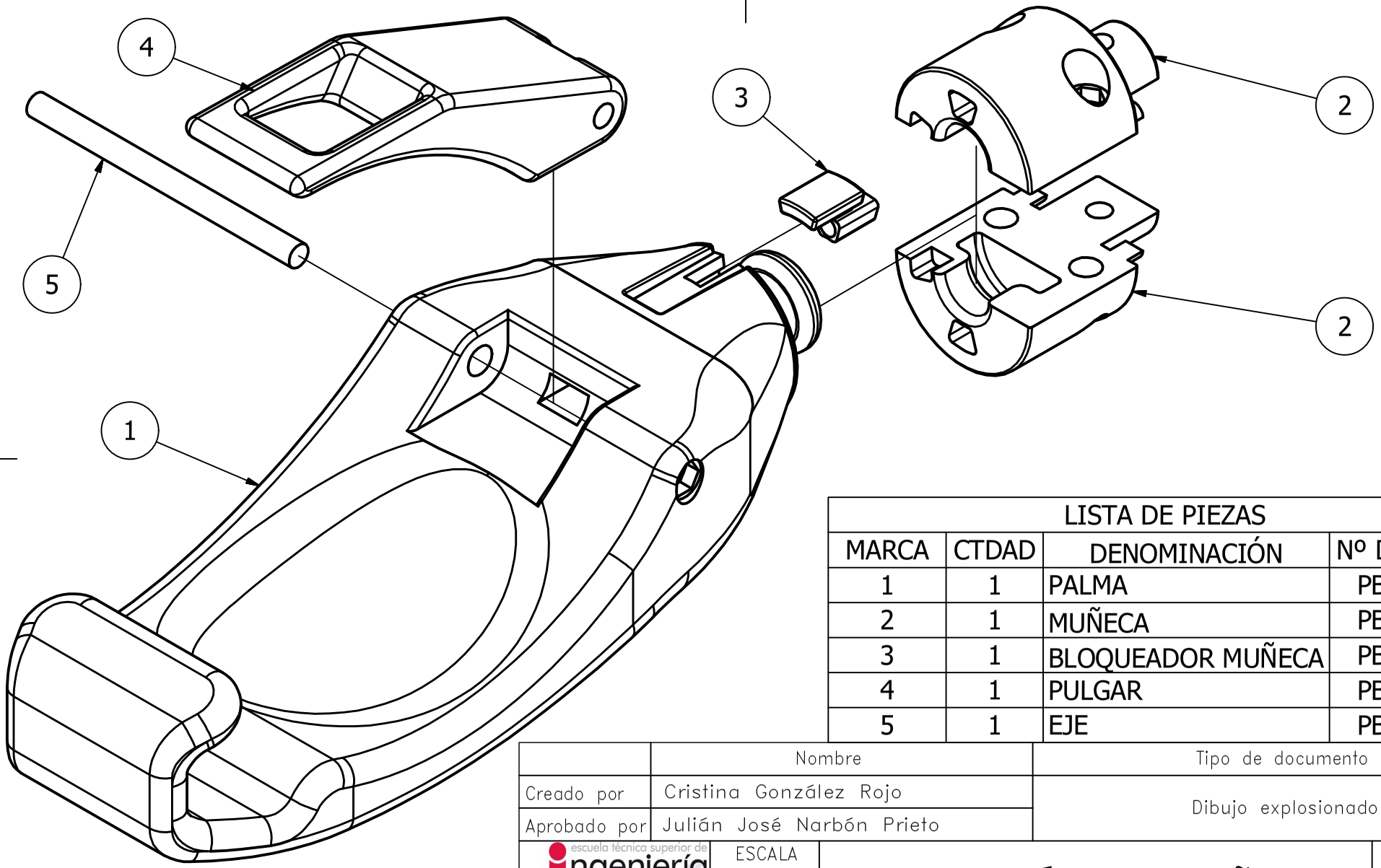
PROTESIS DE BRAZO

HOJA Nº 1/1

Fecha de edición 25-01-2019

E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Nº PB1.00.00



LISTA DE PIEZAS			
MARCA	CTDAD	DENOMINACIÓN	Nº DE PLANO
1	1	PALMA	PB1.01.01
2	1	MUÑECA	PB1.01.02
3	1	BLOQUEADOR MUÑECA	PB1.01.03
4	1	PULGAR	PB1.01.04
5	1	EJE	PB1.01.05

	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo explosionado
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:1

U.DIM.

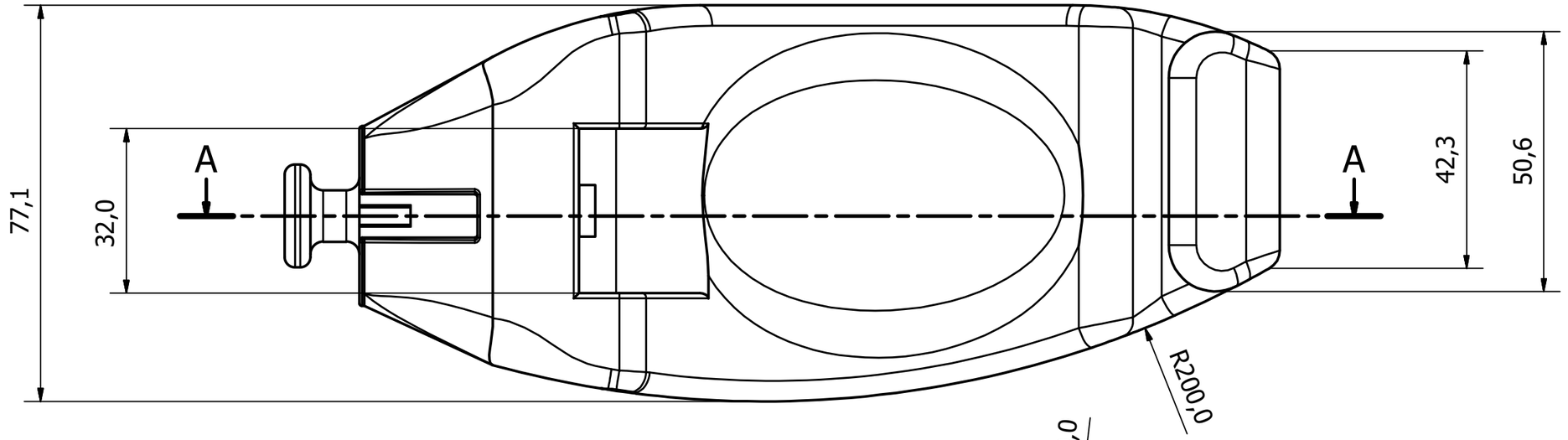
ARTICULACIÓN DE MUÑECA

HOJA Nº 1/1

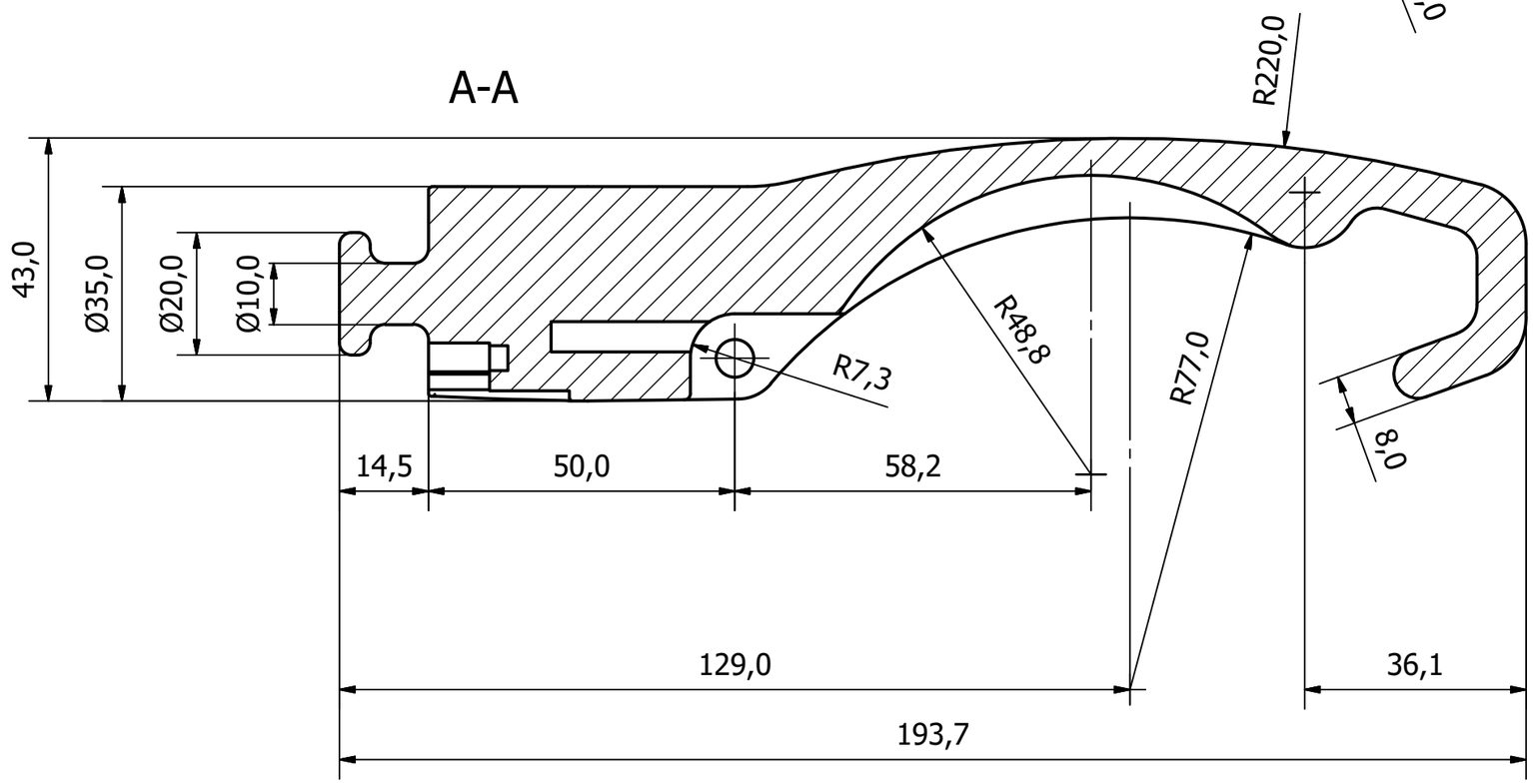
Fecha de edición 25-01-2019

E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

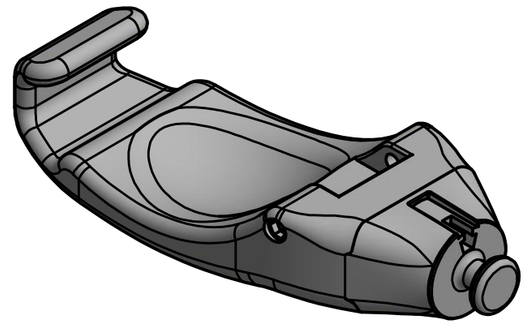
Nº PB1.01.00



A-A



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 2)

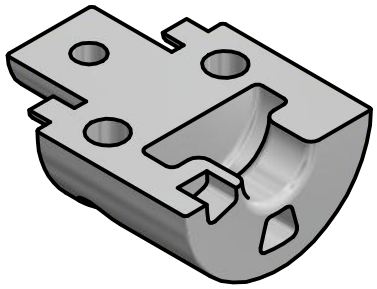


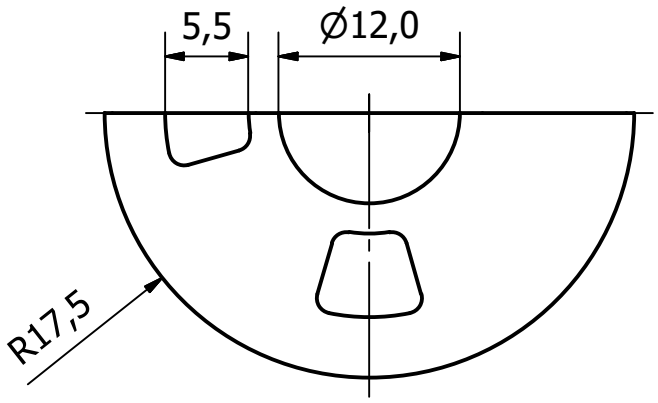
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

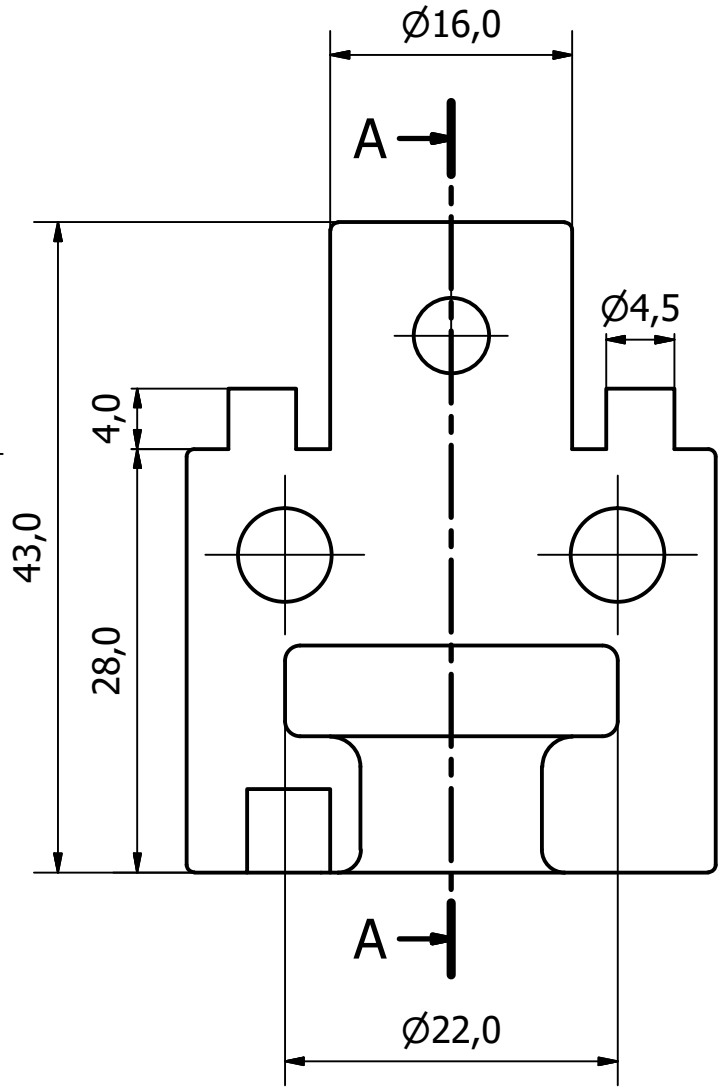
escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

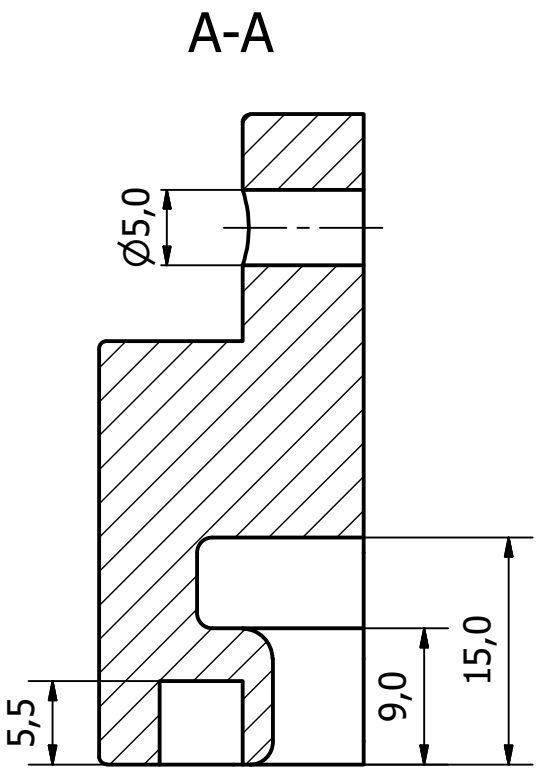
ESCALA 1:1	PALMA	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.01

MUÑECA MITAD 1
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1/1)







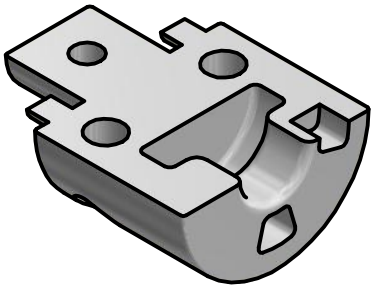


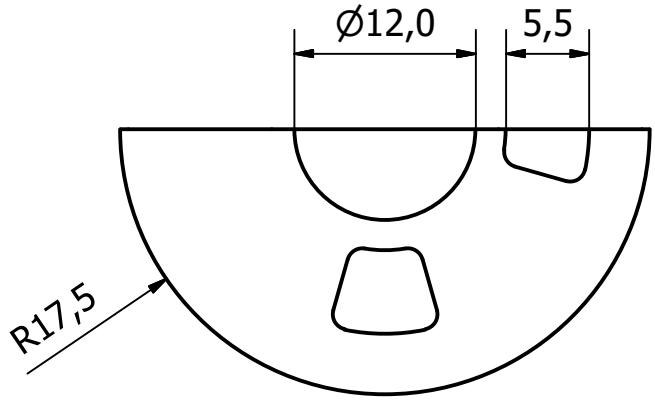
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

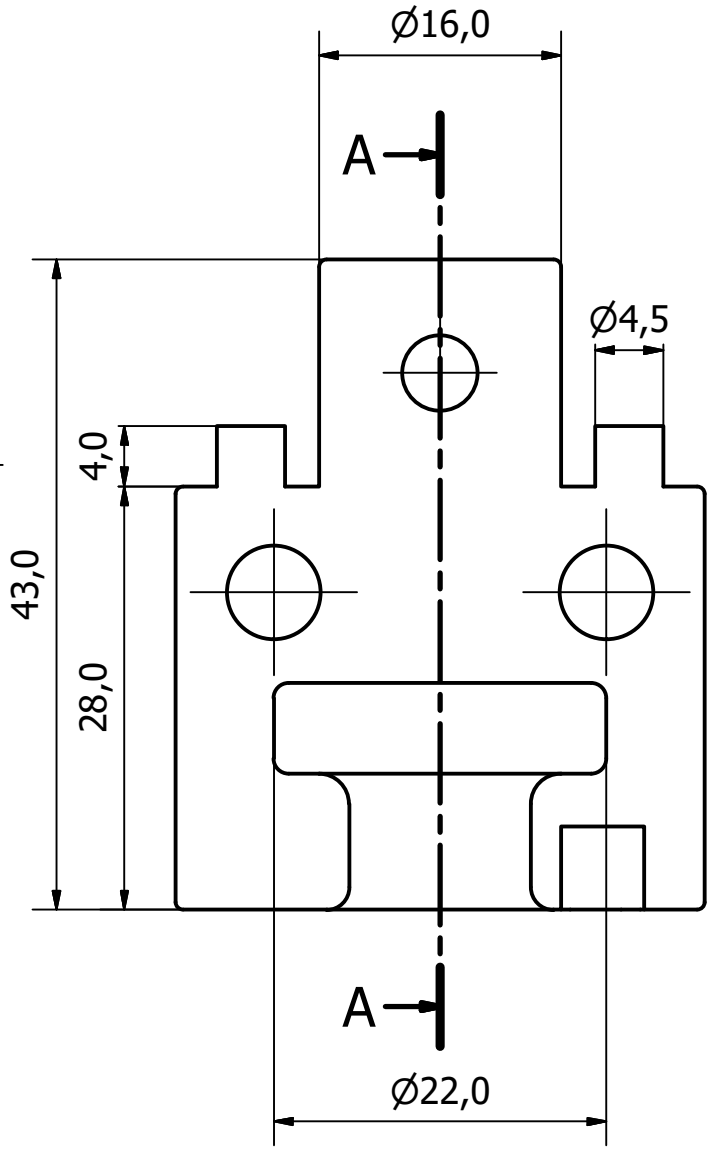
escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

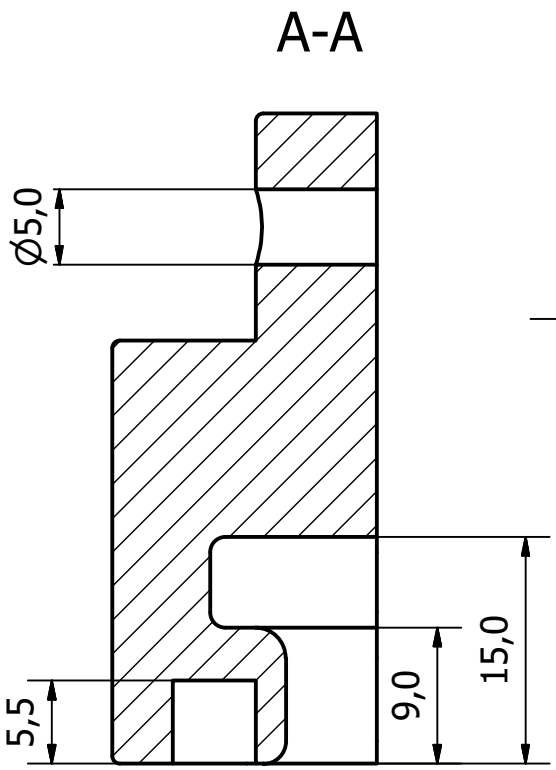
ESCALA 2:1	MUÑECA	HOJA Nº 1/3
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.02

MUÑECA MITAD 2
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1/1)







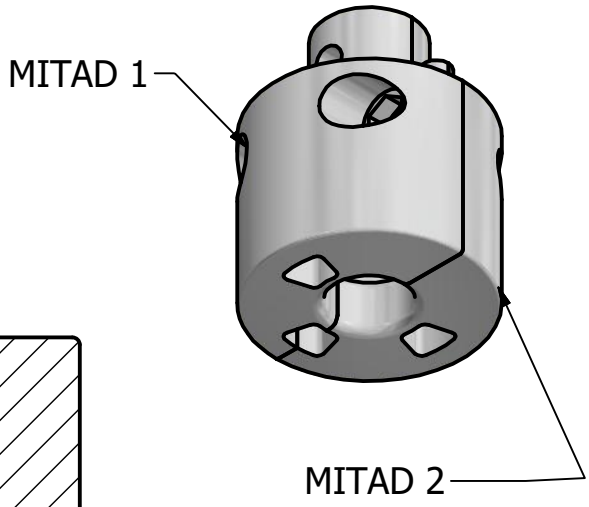


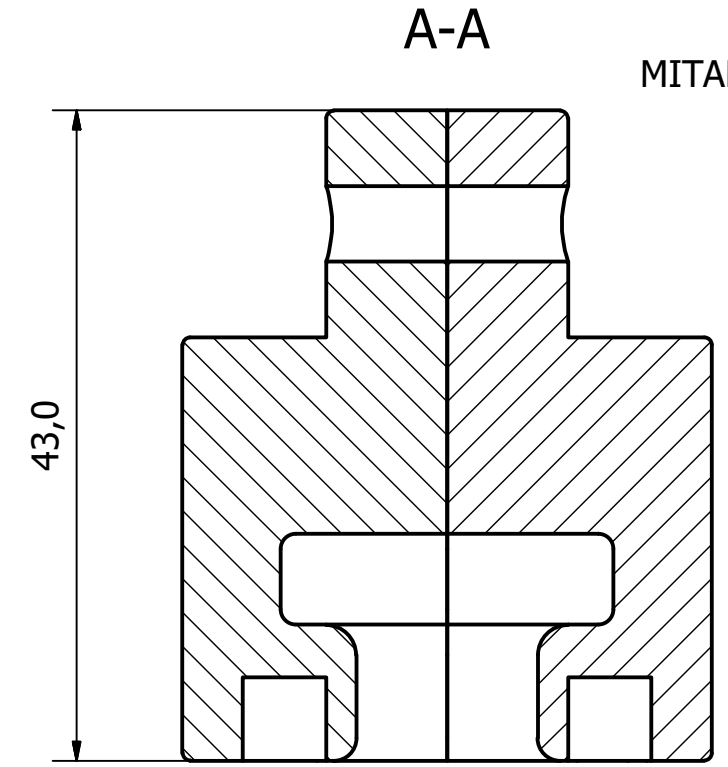
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

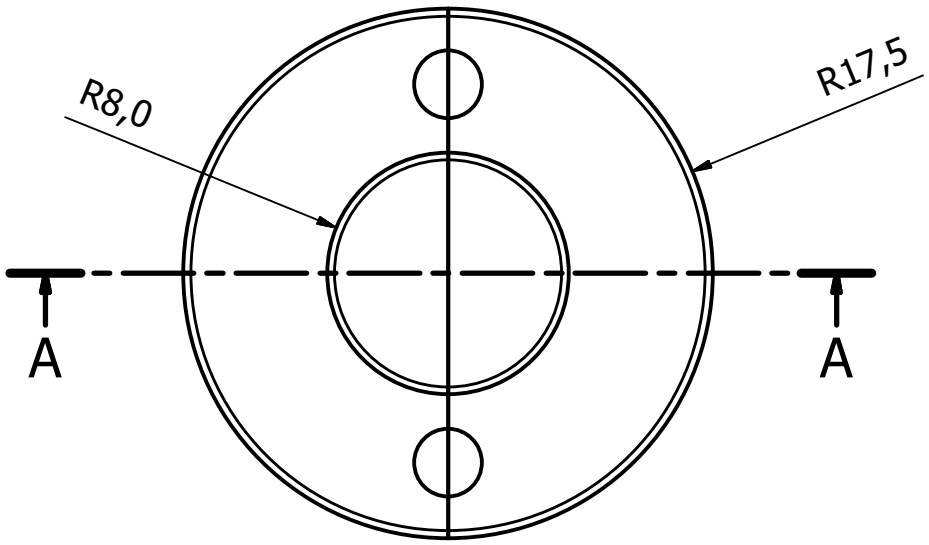
escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 2:1	MUÑECA	HOJA Nº 2/3
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.02

MUÑECA CONJUNTO
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)



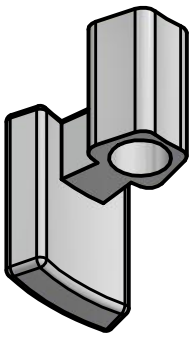


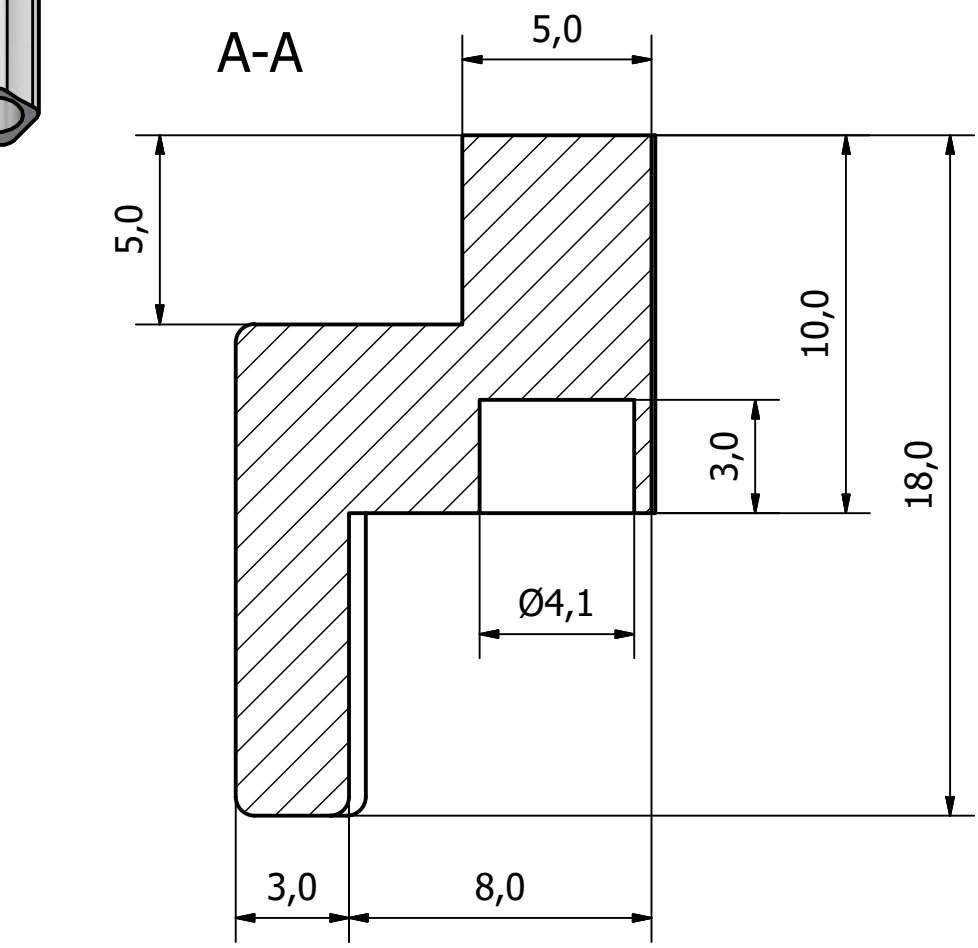


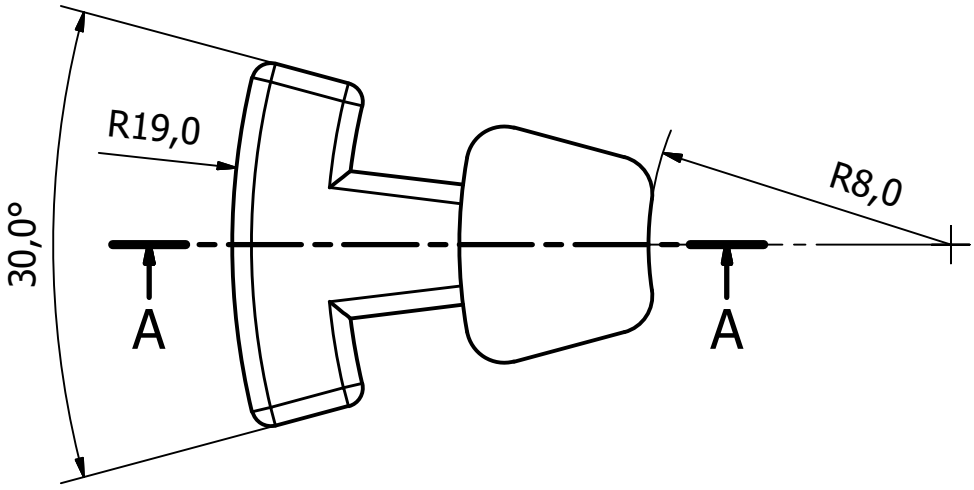
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de conjunto
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial	ESCALA 2:1	MUÑECA	HOJA Nº 3/3
	U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019		E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.02

VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (2 : 1)



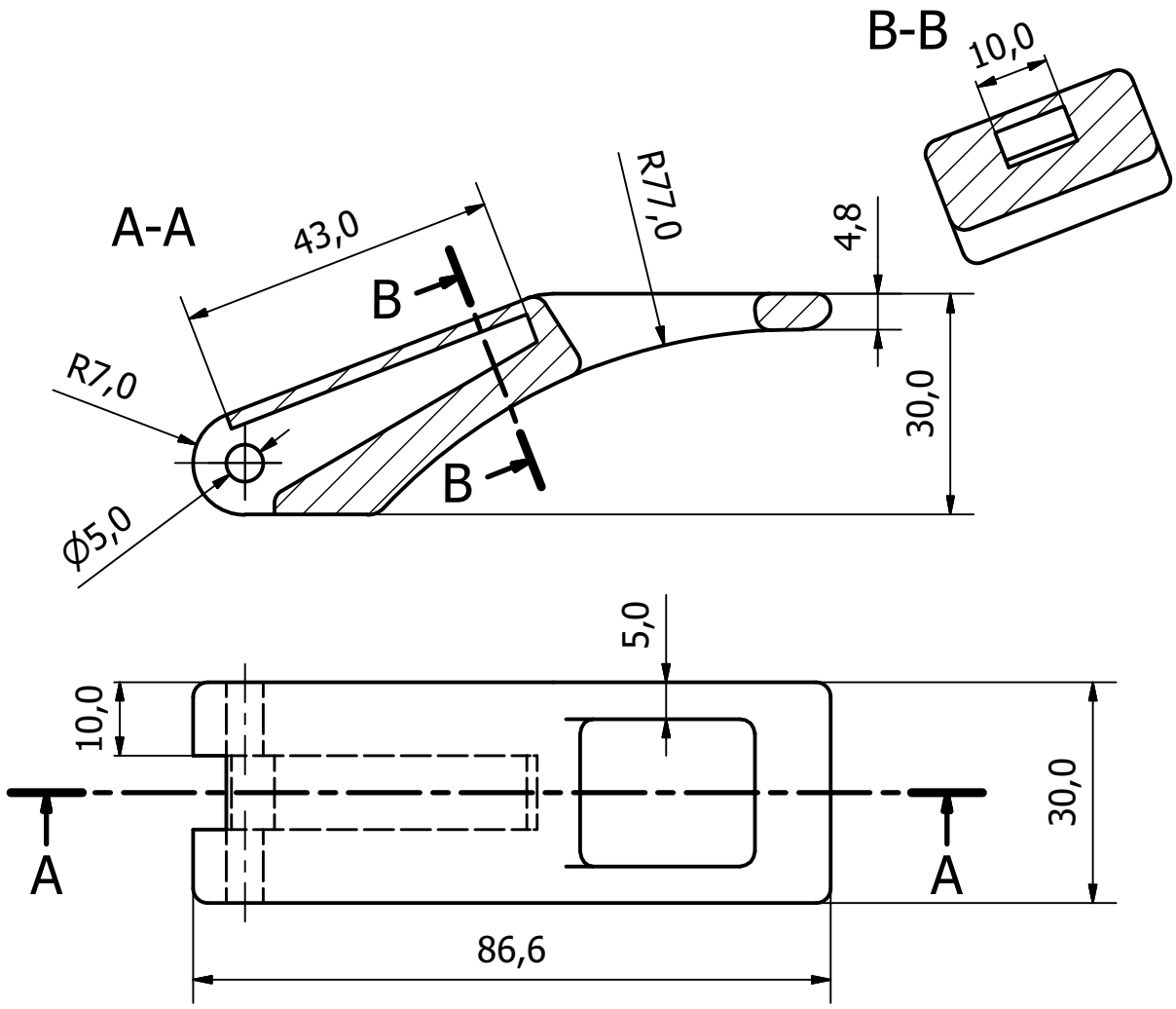




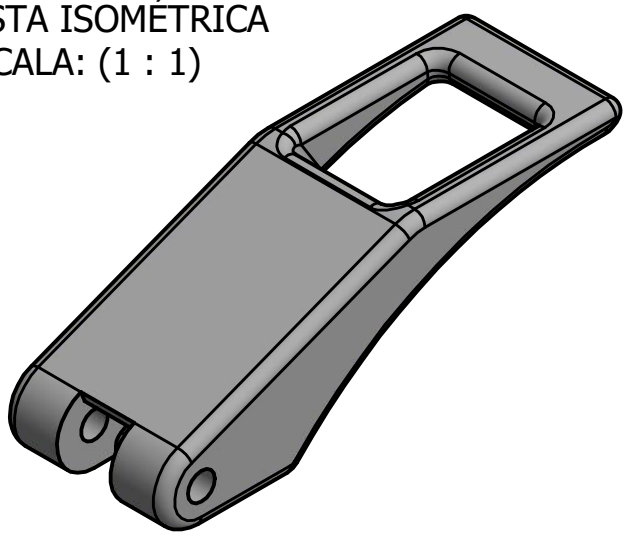
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 5:1	BLOQUEDOR DE LA MUÑECA	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.03



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)

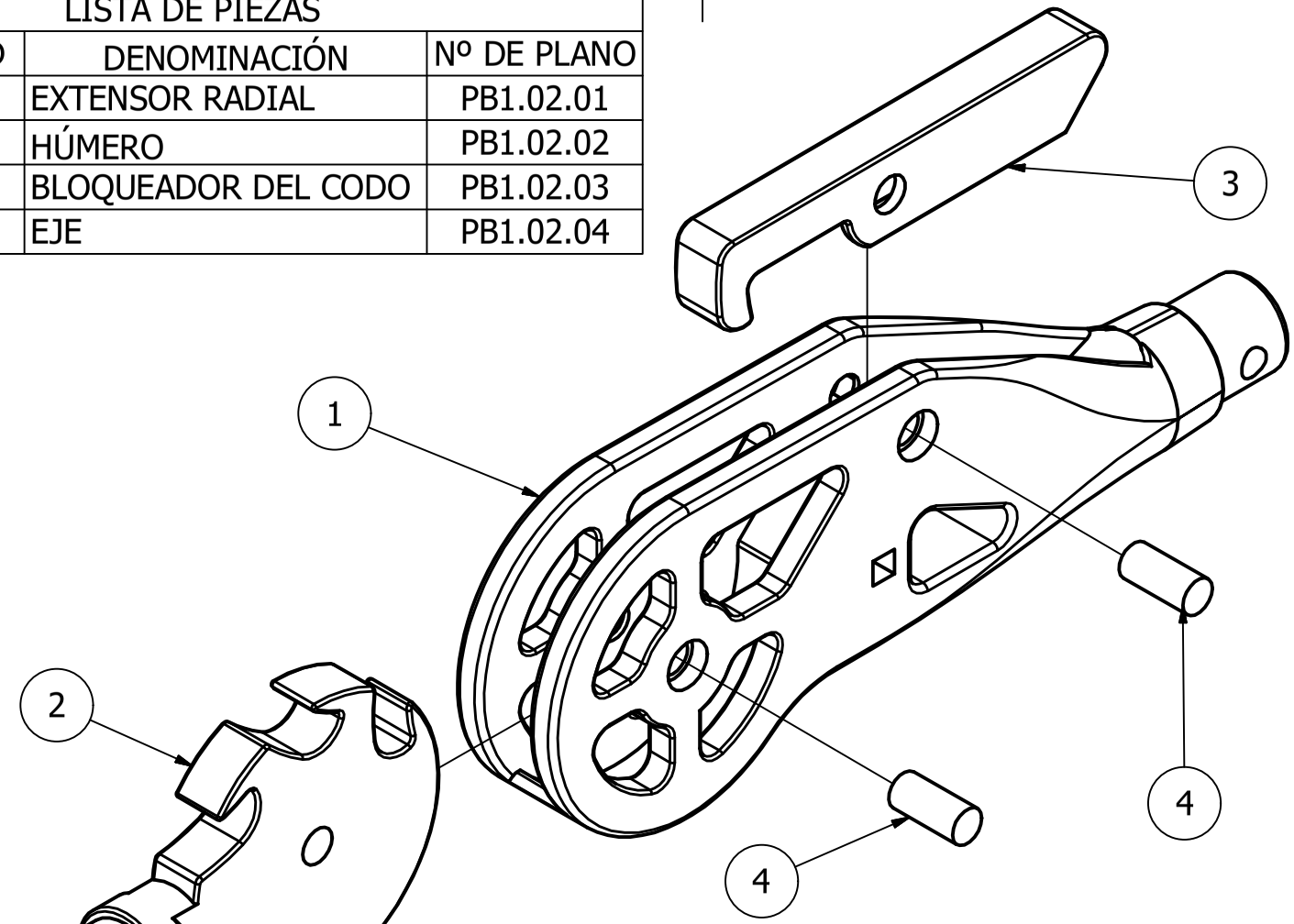


	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:1	PULGAR	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.01.04

LISTA DE PIEZAS			
MARCA	CTDAD	DENOMINACIÓN	Nº DE PLANO
1	1	EXTENSOR RADIAL	PB1.02.01
2	1	HÚMERO	PB1.02.02
3	1	BLOQUEADOR DEL CODO	PB1.02.03
4	2	EJE	PB1.02.04



	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo explosionado
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:1

U.DIM.

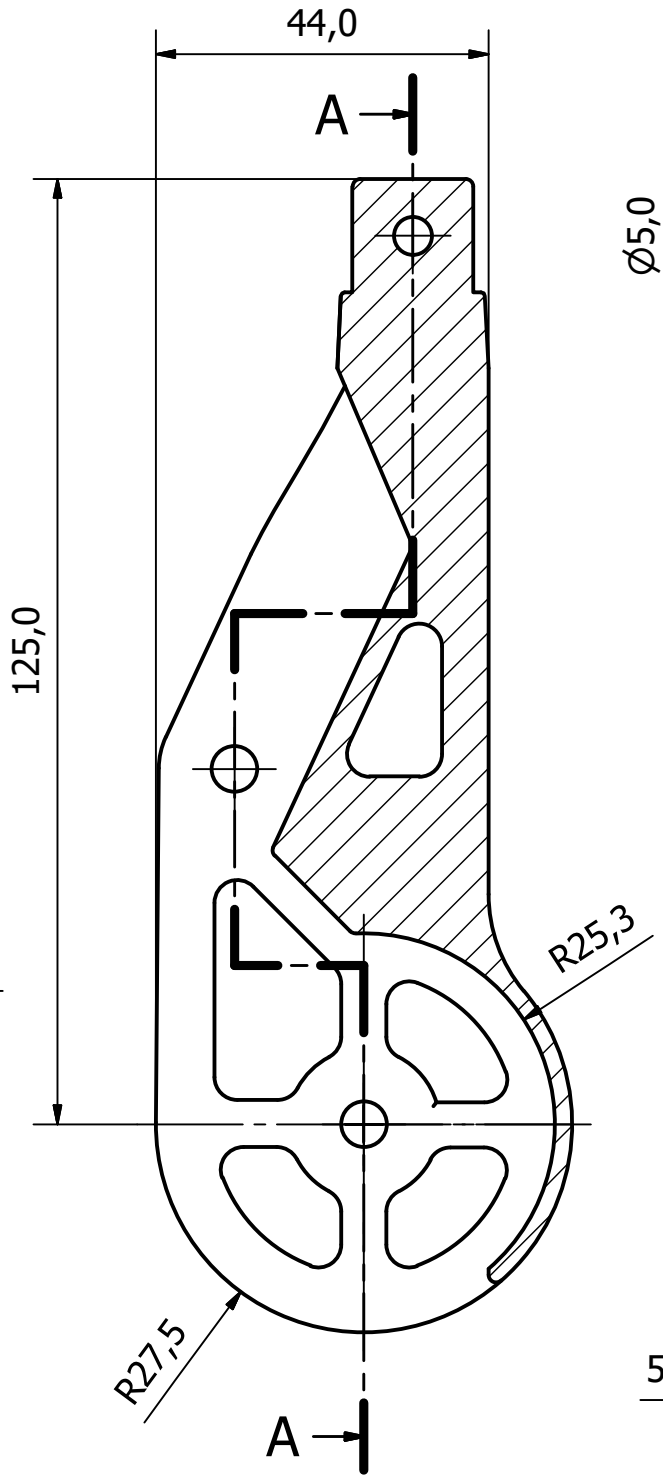
ARTICULACIÓN DE CODO

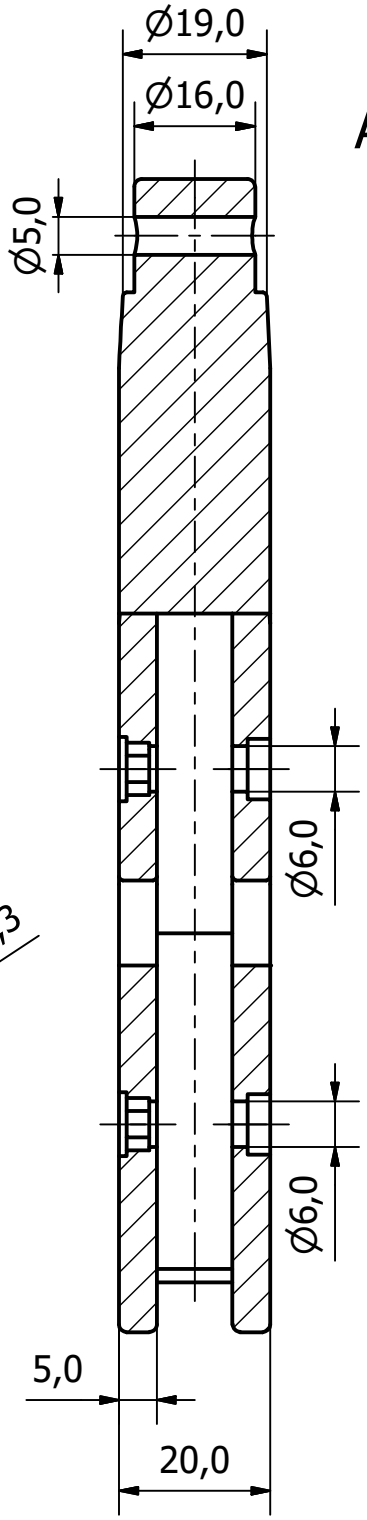
HOJA Nº 1/1

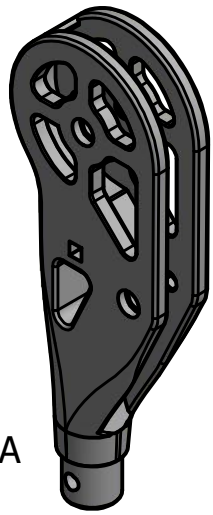
Fecha de edición 25-01-2019

E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL

Nº PB1.02.00





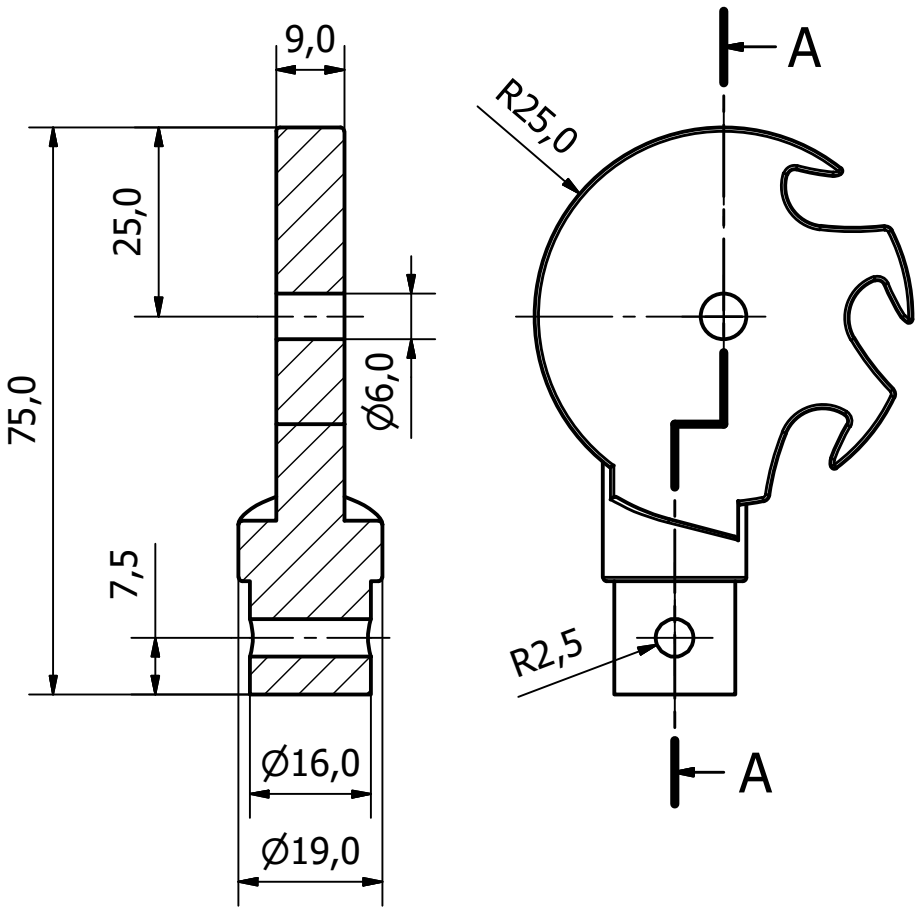


VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 2)

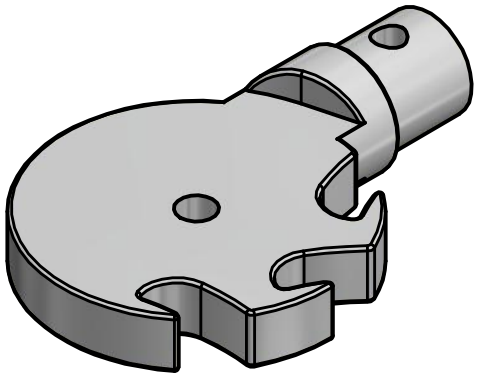
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:1	EXTENSOR RADIAL	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.02.01



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)

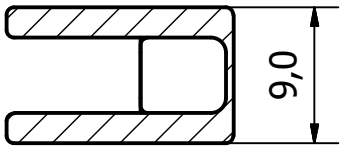


	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

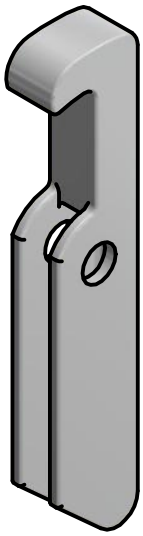
escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 1:1	HÚMERO	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.02.02

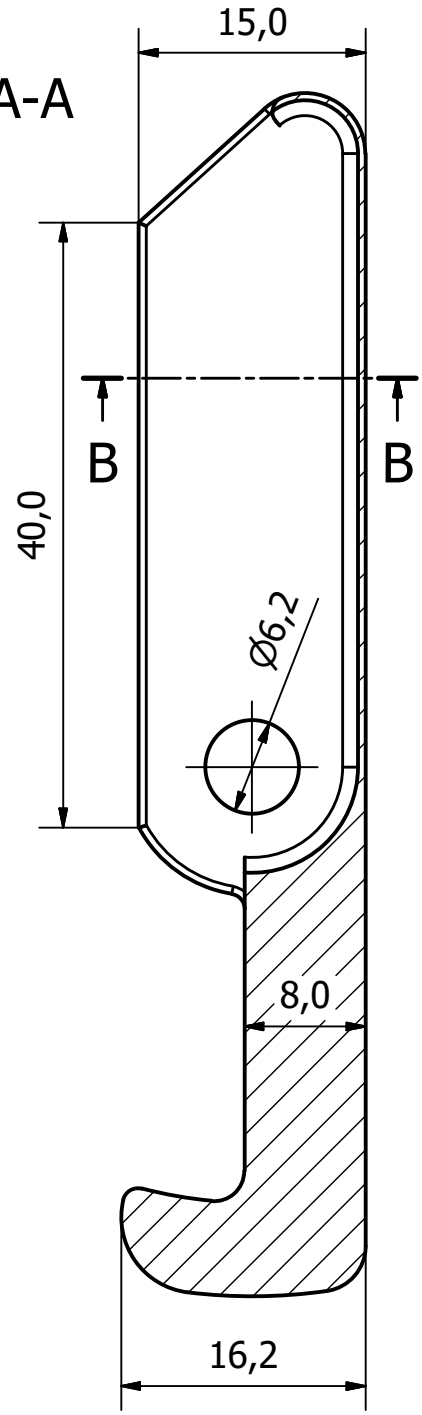
B-B

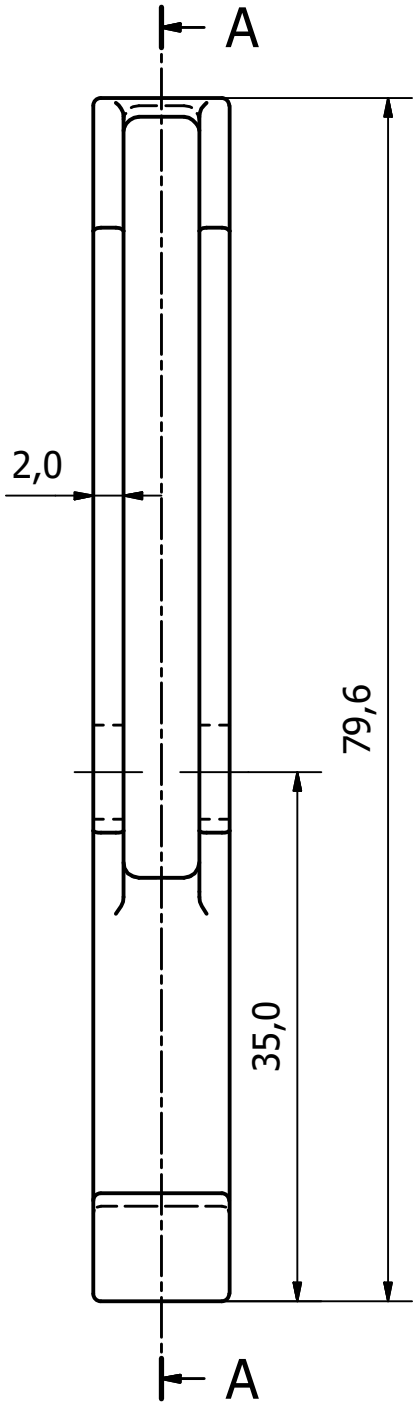


VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)



A-A

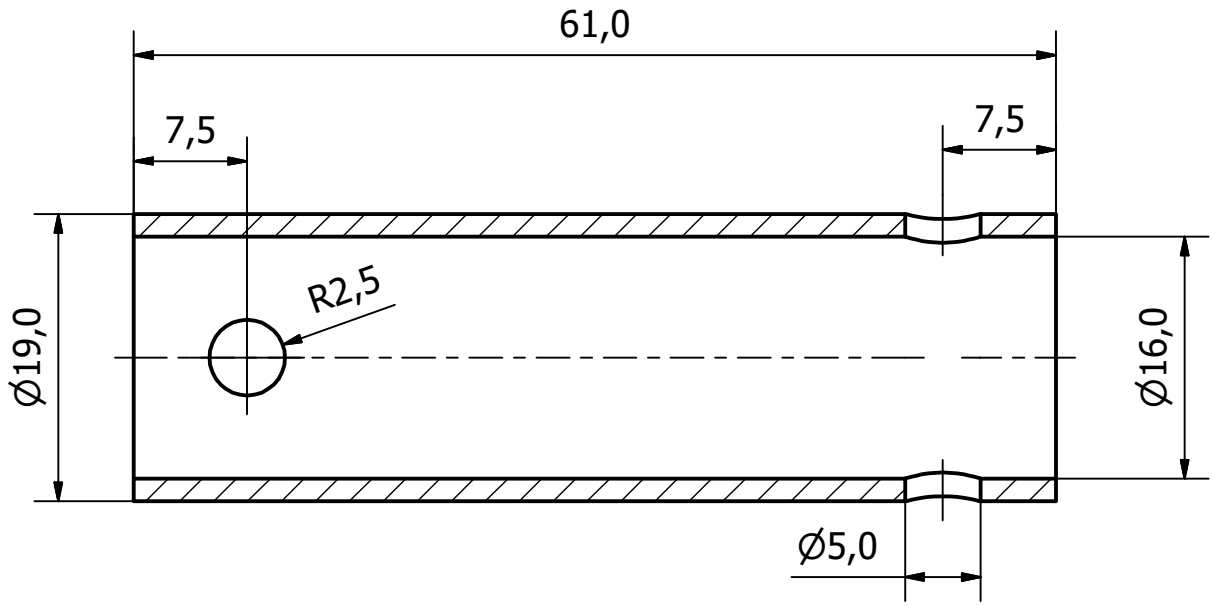




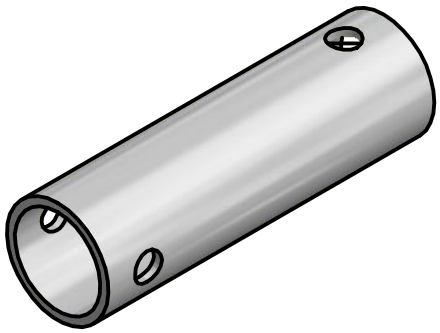
	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 2:1	BLOQUEDOR DEL CODO	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25-01-2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.02.03



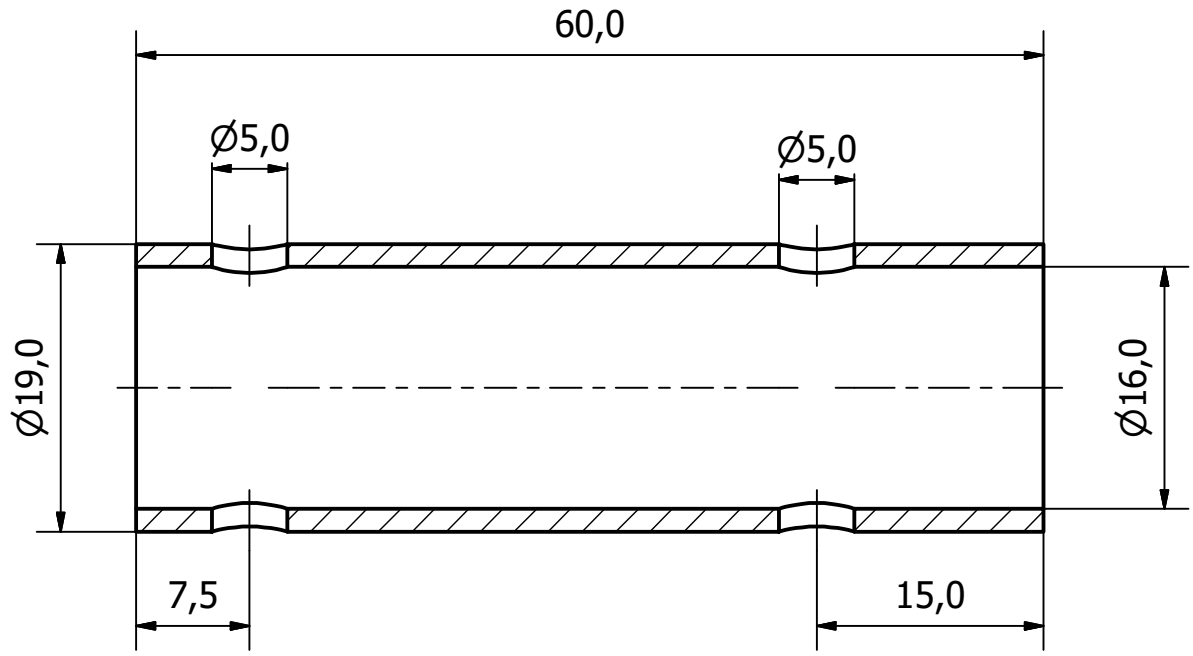
VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)



	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 2:1	UNIÓN MUÑECA–CODO	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25–01–2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.03.00



VISTA ISOMÉTRICA
ESCALA: (1 : 1)

	Nombre	Tipo de documento
Creado por	Cristina González Rojo	Dibujo de despiece
Aprobado por	Julián José Narbón Prieto	

escuela técnica superior de ingeniería y diseño industrial

ESCALA 2:1	UNIÓN CODO–ENCAJE	HOJA Nº 1/1
U.DIM.		
Fecha de edición 25–01–2019	E.T.S. DE INGENIERÍA Y DISEÑO INDUSTRIAL	Nº PB1.04.00

8.2. Imágenes fotorrealistas

Por último, se incluyen las siguientes imágenes que muestran una aproximación del producto fabricado con los materiales determinados. Exponen el resultado del proyecto en su fase final de fabricación y una simulación de su fase de uso. Los renders se han obtenido utilizando el programa Blender.

En la Fig. 122 se muestran dos imágenes de la prótesis colocada en dos posiciones diferentes. Se puede ver el aspecto que tendría el producto fabricado.

Fig. 122 Render 1: prótesis en la fase final de fabricación (dos posiciones).

Para mostrar la fase de uso de la prótesis se han realizado varios renders que muestran la utilización se los mecanismos. En la Fig. 123 se observa el uso del pulgar para sostener un vaso de cristal con el codo en posición flexionada.

Fig. 123 Render 2: prótesis en la fase de uso.

La Fig. 124 muestra el uso del gancho que sujeta la guitarra por el asa de su funda mientras el otro brazo queda libre para llevar la chaqueta o abrir una puerta.

Fig. 124 Render 3: prótesis en la fase de uso.

En la Fig. 125 se muestra la posibilidad de llevar la prótesis con una prenda de manga larga. El bloqueador de muñeca queda aún a la vista mientras que el bloqueador del codo se encuentra tapado. Aun así, con el tiempo el usuario estará acostumbrado a accionar su prótesis sin necesidad de mirar.

Fig. 125 Render 4: prótesis en la fase de uso.

9. Referencias

[1] «Comprehensive prosthetics and orthotics,» [En línea]. Available: http://www.cpousa.com/prosthetics/upper-extremity/. [Último acceso: 03 09 2018].

[2] «Ortopedia Jens Muller,» [En línea]. Available: http://ortopediajensmuller.com/. [Último acceso: 03 09 2018].

[3] «Ottobock,» [En línea]. Available: https://www.ottobock.es/protesica/miembro-superior/sistemas-de-brazo-y-mano/sistema-por-encima-del-codo-dynamicarm/. [Último acceso: 03 09 2018].

[4] «Medicine Net,» 13 mayo 2016. [En línea]. Available: https://www.medicinenet.com/script/main/art.asp?articlekey=15985. [Último acceso: 20 09 2018].

[5] C. H. Taboadela, Goniometría. Una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales., Buenos Aires, 2007.

[6] R. Cailliet, Síndromes dolorosos mano, Manual moderno, 1999.

[7] J. L. Melo, «Estrucplan,» 9 agosto 2002. [En línea]. Available: http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=64. [Último acceso: 20 08 2018].

[8] J. A. A. Jáuregui, «La biomecánica: concepto integral y su contexto práctico,» 11 febrero 2013. [En línea]. Available: https://g-se.com/jose-a-acero-jauregui-bp-j57cfb26f0f7ae.

[9] Diego-Mas, José Antonio, «Análisis biomecánico estático coplanar. Ergonautas. Universidad Politécnica de Valencia.,» 2015. [En línea]. Available: https://www.ergonautas.upv.es/metodos/biomecanica/biomecanica-ayuda.php. [Último acceso: 03 10 2018].

[10] W. T. Dempster, THE ANTHROPOMETRY OF BODY ACTION, 1955.

[11] «Touch Bionics by Ossur,» [En línea]. Available: http://www.touchbionics.com/. [Último acceso: 03 09 2018].

[12] «Ortosur,» [En línea]. Available: https://www.ortosur.es/catalogo-de-productos/protesis/miembro-superior/codo/ergoarm-de-ottobock/. [Último acceso: 03 09 2018].

[13] «Arm Dynamic Redefining Possibility,» [En línea]. Available: https://www.armdynamics.com/success-stories/max-okun. [Último acceso: 26 08 2018].

[14] «Mobius Bionics,» [En línea]. Available: http://www.mobiusbionics.com/luke-arm/. [Último acceso: 03 09 2018].

[15] «Sculpteo,» [En línea]. Available: https://www.sculpteo.com/es/glosario/prototipado-rapido-3d/. [Último acceso: 07 12 2018].

[16] «Materialise,» [En línea]. Available: https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/estereolitografia. [Último acceso: 07 12 2018].

[17] «Full Mecánica,» [En línea]. Available: http://www.fullmecanica.com/component/content/article/18-r/1248-resortes-helicoidales-de-torsion. [Último acceso: 04 01 2019].

[18] A. Pérez González, M. Jurado Tovar, J.L. Sancho Bru, «Fuerzas de contacto entre mano y objeto en el agarre cilíndrico: comparación de dos técnicas de medición.,» Castellón.

[19] «Full Mecánica,» [En línea]. Available: http://www.fullmecanica.com/component/content/article/18-r/1248-resortes-helicoidales-de-torsion. [Último acceso: 04 01 2019].

[20] «Campz,» [En línea]. Available: https://www.campz.es/neopreno.html. [Último acceso: 2018 12 13].

[21] Rafael Pérez Dell'Olmo, director Técnico de WNT Ibérica Herramientas de Precisión, S.L. (Grupo Ceratizit), «Interempresas,» 15 10 2012. [En línea]. Available: http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101212-Influencia-materiales-aeronauticos-seleccion-herramientas-corte-para-su-mecanizado.html. [Último acceso: 14 11 2018].

[22] S.A., Alu-Stock, [En línea]. Available: http://www.sict.fail/Enginyeria%20Aeroespacial/3A/Teoria%20d%27Estructures/Laboratori/Practica%201/aleaciones%20datasheet.pdf. [Último acceso: 15 10 2019].

[23] s.l., Industrias Metadel, «Metadell,» [En línea]. Available: https://metadell.com/mecanizado-materiales/mecanizado-plasticos/. [Último acceso: 28 12 2018].

[24] «Elaplas,» [En línea]. Available: http://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/. [Último acceso: 28 12 2018].

[25] «Ensiger,» [En línea]. Available: https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plastico#/?filter=N4XyAA$$. [Último acceso: 28 12 2018].

[26] «Simplify3d,» [En línea]. Available: https://www.simplify3d.com/. [Último acceso: 14 11 2018].

[27] «Impresoras3D,» 23 01 2018. [En línea]. Available: https://www.impresoras3d.com/filamento-nylon/.

[28] «3D hubs,» [En línea]. Available: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/sla-3d-printing-materials-compared. [Último acceso: 23 11 2018].

[29] «Ensinger Plastics,» [En línea]. Available: https://www.ensingerplastics.com/es-es/semielaborados/plastico#/?filter=N4XyAA$$. [Último acceso: 08 01 2019].

[30] «Lumetal,» [En línea]. Available: https://www.lumetalplastic.com/productos-metales/. [Último acceso: 08 01 2019].

[31] «ColorFabb,» [En línea]. Available: https://colorfabb.com/. [Último acceso: 24 01 2019].