



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

**DISEÑO, ESTUDIO Y
DESARROLLO DE MÁQUINA
HERRAMIENTA DE SOLDADURA
POR FRICCIÓN-AGITACIÓN PARA
ESTRUCTURAS FABRICADAS
MEDIANTE TÉCNICAS ADITIVAS**

Alumno/a: Almazán Lázaro, Miguel Ángel

Tutor/a: Prof. D. Elías López Alba
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Octubre, 2019



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don ELÍAS LÓPEZ ALBA , tutor del Trabajo Fin de Máster titulado: DISEÑO, ESTUDIO Y DESARROLLO DE MÁQUINA HERRAMIENTA DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN PARA ESTRUCTURAS FABRICADAS MEDIANTE TÉCNICAS ADITIVAS, que presenta MIGUEL ÁNGEL ALMAZÁN LÁZARO, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, OCTUBRE de 2019

El alumno:

Los tutores:

MIGUEL ÁNGEL ALMAZÁN

ELÍAS LÓPEZ ALBA



A mis padres por sus consejos y visión, a Esperanza por aguantar mis retahílas chinas y a mi hermano por el aporte técnico. A mis profesores, por aguantar mi afán de inventar y descubrir.

Gracias.

Hace más quien quiere, que quien puede

Índice

Glosario	13
Lista de figuras y tablas	14
1. Resumen.....	22
2. Abstract.....	24
3. Introducción.....	25
4. Justificación.....	27
5. Objetivos	28
6. Estructura del trabajo	29
7. Pruebas experimentales previas	30
8. Análisis teórico	31
8.1. Consideraciones previas	31
Tipos de unión	31
Diferencias, componentes fabricados mediante inyección	31
8.2. Soldadura plástica	34
Aire caliente (hot gas welding).....	34
Placa caliente (hot plate welding	35
Ultrasónica (ultrasonic welding).....	35
Rotacional (spin welding).....	36
Vibracional, alta frecuencia	36
8.3. Soldadura en estado sólido.....	36
8.4. FSW	38
Proceso.....	39
Principales parámetros	40
Ventajas e inconvenientes.....	40
Disposiciones de aplicación	43
Materiales	45

Herramienta	45
Fijaciones	47
8.5. Variantes FSW	48
Hombro estacionario	48
Friction Stir Sport Welding (FSSW)	49
8.6 FSW en polímeros termoplásticos	50
Parámetros óptimos	51
Zonas	55
Flujo de material	56
Efecto de la cristalinidad en las propiedades de los polímeros	61
Conclusión FSW en polímeros	61
Desarrollo herramienta de soldeo	61
10. Fase de selección de componentes.....	61
a. Giro principal	63
❖ Motor	63
❖ Transformador	65
❖ Regulador de velocidad	65
b. Alimentación de material	66
❖ Motor-reductor	66
❖ Regulador de voltaje.....	68
❖ Regulador de velocidad	68
c. Escobillas	69
d. Anillos rozantes	70
e. Rodamientos.....	71
f. Tórica	72
g. Otros.....	73
i. Conectores	73

i. Tubos	73
PTFE	73
Aluminio	73
h. Cableado	73
i. Interruptores-pulsadores	74
j. Voltímetros LCD	75
k. Conectores magnéticos	75
l. Ventilación	75
m. Pasa cables	76
11. Fase de diseño	76
Componentes	77
12. Fase de fabricación de componentes - prototipo	88
Impresión 3D	88
Corte láser CNC	90
Técnicas manuales	93
13. Fase de ensamblaje del prototipo	99
14. Iteraciones realizadas	104
15. Fase de caracterización mecánica	104
Normativa	104
Fase de fabricación de probetas	105
Fase de soldeo de probetas	107
Preparación de la herramienta.	107
Preparación de soldadura	108
Sujeción	108
Proceso de soldeo	109
Parámetros de soldeo - Resultados	110
Conclusión soldeo de probetas	114

Planificación ensayos de tracción	116
Preparación de probetas	117
Realización de ensayos	118
Análisis de ensayos	122
Conclusión de ensayos	123
16. Conclusión y aportaciones.....	124
17. Trabajo futuro	125
Ensayos	126
Flujo	127
Monitorización y control	127
Mejoras en el diseño	128
Posibles mejoras en la herramienta	129
Enfriamiento soldadura	129
Adicción de calor	129
Rodillos.....	130
Mejora en refrigeración	131
Inversión de giros	132
Sensores	132
Velocidad de giro	132
Temperatura	132
Estudios de comercialización	133
18. Anexos.....	133
14.1. Materiales	133
14.2. Breve descripción de patentes relacionadas.....	134
14.3. Historial impresión	138
19. Planos	141
20. Bibliografía	151

Glosario

FSW – Friction Stir Welding

FSP – Friction Stir Processing

FSSW – Friction Stir Spot Welding

AM - Additive Manufacturing

FDM - Fused Deposition Modeling

ABS – Butadiene Styrene

ZAT – Zona Afectada Térmicamente

LBW – Laser Beam Welding

MIG – Metal Inert Gas

Tg – Transición vítrea

TIG – Tungsten Inert Gas

TWI – The Welding Institute

UTS – Ultimate Tensile Strength

Lista de figuras y tablas

Figura 1. (Superior Izquierda) Modelo CAD sistema propuesto. (Superior Derecha) Herramienta fabricada. (Inferior Izquierda) Ensayo y testo de prototipo de máquina herramienta. (Inferior Derecha) Soldadura obtenida con el método.....	23
Figura 2. Crecimiento global de sistemas de prototipado rápido vendidos, como se muestra ha tenido un constante crecimiento [5]. (Wohlers 2003b).....	26
Figura 3. Cambios en la manufactura durante los últimos 30 años [3].	26
Figura 4. Incremento de la complejidad de los productos [8].....	27
Figura 5. Incremento del número de publicaciones en Friction	28
Figura 6. Uso de soldadura FSSW, Friction Stir Sport Welding en Mazda RX-8. Cortesía de Ford Motor Company [10].	28
Figura 7. Dremel® 4300.	30
Figura 8. Construcción de esfera mediante RP: (izquierda) teórica, (derecha) real [5].	32
Figura 9. Patrones de relleno disponibles en Cura 3: A, Rejilla. B, Lineal. C, Triangular D. Trihexagonal. E, Cubica. F, Cúbica (subdivisión). G. Octeto. H, Concéntrica. I, Concéntrica 3D, J. Zig-zag. K, Cruzada. L, Cruzada 3D. Fuente: www.ultimaker.com.....	33
Figura 10. Izquierda: sólida. Centro: estructura Sparse. Derecha: Double Sparse. Fuente: Stratasys. [14].....	33
Figura 11. Componente fabricado mediante SLS de acero y cobre, material sin fundir (a), fundido (b), porosidad (c) [15].....	34
Figura 12. Soldadura mediante aire caliente Fuente: TWI Ltd.	34
Figura 13. Proceso de soldeo con placa caliente [18].....	35
Figura 14. Fases de soldeo con placa caliente [18].	35
Figura 15. Soldadura ultrasónica. Fuente: Substech.....	35
Figura 16. Izquierda: Fase inicial del proceso de soldeo por rotación. Gatwick Technologies Ltd, 2013. Derecha: Sección final soldada. Se muestra un collar de material externo donde la mayor parte de impurezas y contaminación es expulsada hacia el exterior [23].	37
Figura 17. Principio de LFW. Stephan Kallee TWI (2000).....	37
Figura 18. Esquema del proceso de fricción	38
Figura 19. Proceso de soldeo por FSW [26].	39
Figura 20. a) Flujo de material en sección longitudinal. b) Zonas de proceso metalúrgico desarrolladas durante FSW [27].	39
Figura 21. Ratio de importancia en la contribución de los parámetros [30].	40

Figura 22. Se muestra como las uniones soldadas con adicción de material soportan mejor los esfuerzos de fatiga AA6061-T4 [39].....	43
Figura 23. Disposiciones comunes de unión que son de aplicación para la tecnología FSW. También se muestra la sección transversal de los apoyos recomendados [11].....	44
Figura 24. Patente US6193137B1	45
Figura 25. Herramienta convencional de FSW y variables clave [11]. El ángulo de inclinación se realiza de forma que en la parte delantera del pin quede el hombro levantado, es decir, la dirección de avance de la herramienta en la imagen derecha es hacia la derecha [40].....	46
Figura 26. Soldadura FSW en bobina [11].....	46
Figura 27. Geometrías de herramienta más comunes [11].	47
Figura 28. Geometrías de pin más comunes [42].....	47
Figura 29. Fijaciones en FWS convencional [11].	48
Figura 30. FSW con hombro estacionario, para soldaduras con una disposición en T con y sin adicción de material [39].....	49
Figura 31. Resistencia a cortante de especímenes soldados con diferentes técnicas [45].	49
Figura 32. 5 Fases de soldeo en FSSW [28].....	50
Figura 33. Herramienta con hombro estacionario de teflón y control de temperatura de la herramienta [26].....	50
Figura 34. Resumen de estudios realizados hasta la fecha de publicación del presente documento.....	53
Figura 35. Resistencia a fatiga del polipropileno y la unión soldada, se aprecia que esta última tiene una ligera menor resistencia a fatiga [62].	54
Figura 36. Velocidad de rotación y avance recomendada para distintos polímeros [41].	55
Figura 37. 4 zonas típicas en sección transversal de soldadura FSW. 25.4mm de espesor en aluminio 2195 [11].	56
Figura 38. Esquema del proceso [66].....	57
Figura 39. Modelo de Arbogast para materiales metálicos. Se tienen dos partes diferenciadas: el lado de avance AS (izquierda) y retroceso RS de material (derecha). Además, se disciernen 4 zonas de deformación [46]. En la imagen inferior derecha se muestran las variables para aplicar las ecuaciones de conservación de masa desarrolladas en [63]. En todas ellas se muestran secciones transversales en la parte trasera del pin.....	58
Figura 40. Radiografía del flujo de soldadura en aluminio 6061 visto en planta para diferentes posiciones. Se muestra como las partículas situadas en el lado de avance son batidas en frente	

del pin hasta situarse en la parte posterior de este en la parte de retracción. Se tiene el mismo resultado se tiene para aluminio 7075 [40]	59
Figura 41. Flujo creado en la soldadura FSW de PMMA. La interfaz del material agitado y el material base permanece recta, no mostrando flujo de material desde el material base a la zona de batido [46].	60
Figura 42. componentes herramienta principal. *Por tamaño de la imagen se ha omitido el tubo PTFE de 3*4*120mm situado en el eje de rotación principal.....	62
Figura 43. Componentes caja reguladora.	63
Figura 44. Motor XD-3420 con doble salida y eje hueco.	64
Figura 45. Dimensiones principales.....	64
Figura 46. Especificaciones técnicas motor XD-3420.....	65
Figura 47. Transformador con salida 5 A, 24 V y placa de características.....	65
Figura 48. Regulador de velocidad PWM 40V PWM. Modelo real y modelado CAD.	66
Figura 49. Dimensiones (mm) del motor N20 con caja reductora lineal.....	67
Figura 50. Motor N20 con caja reductora angular acoplada a la lineal.	67
Figura 51. Modelo 3D regulador LM2596S.....	68
Figura 52. Regulador de tensión basado en el LM2596S. Como se muestra posee dos entradas y dos salidas, además de un potenciómetro para la regulación de la tensión.	68
Figura 53. Especificaciones regulador de tensión LM596S.	68
Figura 54. Expresión dimensionado escobillas [74].....	69
Figura 55. Escobilla multi-herramienta.....	70
Figura 56. Desgaste escobillas [75].	70
Figura 57. (Izquierda) Colectores de delgas de multi-herramientas (opción rechazada). (Derecha) Solución final adoptada, anillos rozantes cortados a partir de tubo de cobre de diámetro interior 33 mm.....	71
Figura 58. (Izquierda) rodamientos usados en el contra apoyo.....	72
Figura 59. Tórica 30x1 mm	72
Figura 60. Conector GX12 de 4 pines.....	73
Figura 61. Tubo de teflón (PTFE).	73
Figura 62. Cable en espiral extraído de dispositivos de conexión a toma de 12V USB en vehículos y conector GX12 de 4 pines.	73
Figura 63. (Izquierda) Interruptor de balancín principal. (Derecha) Pulsador SMD (6x6x2.5mm).	74
Figura 64. Voltímetro digital empleado.	75

Figura 65. Ventilador 30x30 (Izquierda) modelo CAD. (Derecha) real.	76
Figura 66. Pasa cables modelados. (Izquierda y centro): en herramienta principal. (Derecha): pasa cables reales.	76
Figura 67. (Izquierda) primera versión realizada. (derecha) última versión.	78
Figura 68. Porta escobillas. (Izquierda) segunda versión. (Derecha) Última versión.....	79
Figura 69. Ensamblaje y posición de porta escobillas.	79
Figura 70. (Izquierda) primera versión del sistema de impulsión con un solo motor y contrapesas regulables para equilibrado basadas en tornillos y arandelas. (derecha) última versión, simétrica, más corta con dos motores para su impulsión.	80
Figura 71. Vista explosionada del conjunto de impulsión final.	81
Figura 72. Primera versión de caja reguladora. Tapadera con ajuste a presión, interruptor, dos reguladores PWM y tomas de conexión Jack.	82
Figura 73. Solución final llevada a cabo para la caja auxiliar. En esta versión además de cumplir la funcionalidad, se ha integrado el transformador para minimizar el número de componentes visibles.....	82
Figura 74. Alojamiento para los dos voltímetros y 4 conectores magnéticos.	83
Figura 75. Sistema de acople rápido de media vuelta para el sistema de guiado de filamento.	84
Figura 76. Versión inicial del contra apoyo de filamento, (izquierda) construcción. (Derecha) testeo en filamento de 3 mm.	85
Figura 77. Segunda versión del contra apoyo. Construida con tubo de teflón de 2*4 en el centro y 4*6 en los extremos.	85
Figura 78. Contra apoyo para filamento de 1.75 (izquierda) y 3mm (derecha) con alojamiento para rodamientos de 2x4x2 en sus extremos.	86
Figura 79. Llaves Allen usadas en el	86
Figura 80. (Izquierda) Modelo Bisagra, pasador de diámetro 1 mm. (Derecha) Modelo del cierre.	87
Figura 81. Maletín de transporte del conjunto.....	88
Figura 82. Carcaza principal.	89
Figura 83. Rotor de impulsión.	89
Figura 84. Porta escobillas.	89
Figura 85. Contra apoyos de filamento.	89
Figura 86. Caja transformadora-reguladora.	89
Figura 87. Separadores PCB roscados.	90

Figura 88. Rejilla.	90
Figura 89. Soporte voltímetros.....	90
Figura 90. Guiado de filamento.....	90
Figura 91. Fresadora – láser CNC usado para corte de goma EVA (etilvinilacetato) para logo y embellecedor.	91
Figura 92. (Izquierda) Configuración de la herramienta láser que se asimila a fresa. (Derecha) Configuración principal perfilado.....	92
Figura 93. Trayectorias generadas para el corte del logo.	92
Figura 94. (Izquierda) Encabezado código G generado para fresado. (Derecha) Encabezado código G modificado para Láser.	93
Figura 95. Proceso de soldeo	93
Figura 96. Proceso de lijado con distintos granos.	94
Figura 97. Proceso de enmasillado. La masilla empleada para polímeros es aplicada mediante espátula [81].	94
Figura 98. Proceso de pintado.	95
Figura 99. Proceso de inserción que somete el tubo de teflón a compresión. Basado en varilla roscada M3 y ser apretada por uno de los extremos. Resultó insatisfactorio.	96
Figura 100. Proceso de inserción final de tubo de teflón en el interior de tubo de aluminio. Se realizó un acople provisional del primero a alambre para ser traccionado e introducido con lubricación.	96
Figura 101. Lijado exterior tubo de aluminio [82].	97
Figura 102. Tubos para el guiado de filamento.	97
Figura 103. Proceso de construcción de conectores magnéticos y resultado final.	98
Figura 104. Corte de varilla roscadas en motor [83].	99
Figura 105. (Izquierda) primera versión del sistema de impulsión con un solo motor y contrapesas regulables para equilibrado basadas en tornillos y arandelas. (Derecha) última versión, rotor simétrico, más corto con dos motores para su impulsión.	99
Figura 106. Montaje de pulsadores. La función de la cinta americana es solo facilitar el montaje, ya que los pulsadores se apoyarán en el propio motor.	100
Figura 107. Inserción de cableado para montaje de motor.	101
Figura 108. Montaje de escobillas. (Izquierda) primer prototipo. (Derecha) prototipo final.	101
Figura 109. Montaje de escobillas.	102
Figura 110. Prototipo final.	102
Figura 111. Prototipo final de maletín de transporte	103

Figura 112. Modelado de probeta B4.0:2007	104
Figura 113. (Izquierda) probeta según norma ISO-527. (Centro) norma ASTM 638. (Derecha) norma AWS B4.0:2007 transversal.	105
Figura 114. Geometría de probeta con soldadura transversal según AWS B4.0:2007.	105
Figura 115. Trayectorias generadas para probeta tipo I.	106
Figura 116. Preparación unión [88].	106
Figura 117. (Izquierda superior) Filamento en forma natural (Izquierda inferior) filamento enderezado (derecha) Filamentos cortados a 40 cm.	107
Figura 118. (Izquierda) afilado extremo de extremo. (Derecha) Filamento insertado en la herramienta.	108
Figura 119. Sistema de sujeción, probeta y herramienta.....	109
Figura 120. Probeta de PLA soldada con ABS blanco como material de aporte.....	110
Figura 121. (Izquierda) soldadura con alta velocidad de avance 60 mm/min. (Derecha) Estado de la herramienta cuando el ángulo de inclinación de la herramienta es menor a 60° respecto la horizontal.	111
Figura 122. (Izquierda) Soldadura con falta de penetración y exceso de adición de material. (Centro, Izquierda) soldadura siguiendo patrón de zig-zag a una alta velocidad (sentido de giro horario).	112
Figura 123. (Izquierda) Unión realizada con falta de penetración y exceso de material de aporte. (Derecha) Aspecto de unión soldada a alta velocidad (4500 rpm \pm 200 rpm, \approx 60mm / min. La alta velocidad de rotación hará defectos de mordedura y mal adhesión del material de aporte. En ambas figuras se ha usado filamento blanco ABS.....	113
Figura 124. Forma de la herramienta para diferentes parámetros de soldadura. (Izquierda) Velocidad de giro de 4500 rpm \pm 200 rpm. (Derecha) 2000 rpm \pm 200 rpm. En ambos casos se usa filamento de PLA.	113
Figura 125. Cordón de soldadura obtenido a 2000 rpm \pm 200 rpm y 30 mm/min.	114
Figura 126. Ángulo de cabeceo en herramienta convencional [11]. La dirección de avance ensaya por los autores [40] es un movimiento de la herramienta hacia la derecha del lector, mientras que en nuestro caso se ha ensayado un movimiento de avance hacia la izquierda del lector.	116
Figura 127. Parámetros de probetas soldadas.....	117
Figura 128. Proceso de pintado base blanca mate (izquierda) y rociado de speckle negro (derecha).....	118
Figura 129. Probetas soldadas preparadas para ser numeradas y ensayadas.....	118

Figura 130. Montaje de elementos para ensayo.....	119
Figura 131. Instalación de galgas virtuales	119
Figura 132. Diagrama tensión deformación para todas las probetas	120
Figura 133. Diagrama tensión deformación para probetas soldadas con PLA	120
Figura 134. Diagrama de tensión deformación para probetas soldadas con ABS	121
Figura 135. Diagrama tensión deformación para probetas no soldadas	121
Figura 136. Tensión de rotura y módulo elástico de las probetas ensayadas	122
Figura 137. Módulo elástico promedio por grupos	122
Figura 138. Tensión de rotura promedio por grupos	123
Figura 139. Aspecto soldadura probetas número 1 (izquierda) y 4 (derecha).....	123
Figura 140. Solución prototipo final de soldeo.....	125
Figura 141. Soldadura deficiente realizada.....	126
Figura 142. Técnica de partículas.....	127
Figura 143. Radiación infrarroja emitida.....	127
Figura 144. Principales defectos en soldadura FSW realizada en aluminio [92].....	128
Figura 145. Sistema de distribución criogénico de CO2 (Gabzdyl et al., 2001, Richards et al., 2008) [11].	129
Figura 146. Sistema de calentamiento por inducción.....	130
Figura 147. Rodillo aliviador de tensiones residuales (Airbus UK) [11].	131
Figura 148. Conmutador	132
Figura 149. Sensor óptico RPM Turnigy TGY	132
Figura 150. Sensor infrarrojos	132
Figura 151. Propiedades PLA [90].	133
Figura 152. Propiedades ABS [94].	134
Figura 153. CN105397276A.....	134
Figura 154. CN107160030A.....	135
Figura 155. EP1738856B1.	135
Figura 156. US8534529.	135
Figura 157. US9987707.	135
Figura 158. US5893507A.....	136
Figura 159. US5697544A.....	136
Figura 160. US5713507A.....	136
Figura 161. US5718366A.....	136
Figura 162. US5971247A.....	137

Figura 163. US5794835A.....	137
Figura 164. US6543671B2.....	137
Figura 165. CN205927497U.....	137
Figura 166. US20060163328A1.....	138
Figura 167. US6206268B1.....	138
Figura 168. Parámetros para herramienta principal y caja reguladora.	139
Figura 169. Parámetros de los restantes elementos del prototipo.....	140
Figura 170. Parámetros de impresión de probetas.	141

1. Resumen

En el presente Trabajo Fin de Máster se propone y desarrolla un sistema de soldadura por fricción con adicción de material, orientado a la unión de componentes fabricados mediante técnicas aditivas.

Los materiales fabricados por técnicas aditivas presentan diferentes características de los fabricados por otras técnicas, como la inyección. En consecuencia, los dispositivos de unión hasta la actualidad han sido desarrollados y estudiados para estas últimas técnicas de fabricación, encontrándose deficiencias cuando se tratan de aplicar a componentes obtenidos por la manufactura aditiva.

La primera parte del documento consistirá en una descripción de la técnica de soldadura por fricción rotatoria (FSW, Friction Stir Welding), para posteriormente desarrollar el sistema de unión basado en la dicha. El sistema propuesto será variante de FSW con adicción de material, en la que la propia herramienta de soldadura será material consumible.

Tras el análisis teórico se diseña el modelo 3D de la herramienta y elementos auxiliares, para posteriormente pasar a la fabricación del prototipo.

Para la fabricación se hará uso de técnicas de prototipado rápido FDM y corte por láser, además de técnicas manuales de taller.

Se finalizará con la caracterización mecánica de los componentes unidos mediante el sistema desarrollado.

En el presente TFM se han pasado por todas las fases que conllevan el desarrollo de un producto, teniendo como resultado un sistema de soldeo basado en FSW orientado a estructuras pequeñas, siendo una herramienta manual ligera, pequeña y económica.



Figura 1. (Superior Izquierda) Modelo CAD sistema propuesto. (Superior Derecha) Herramienta fabricada. (Inferior Izquierda) Ensayo y testeo de prototipo de máquina herramienta. (Inferior Derecha) Soldadura obtenida con el método.

2. Abstract

In the present Master's Thesis, a friction welding system with addition of material is proposed and developed, oriented to the union of components manufactured by additive techniques.

The materials manufactured by additive techniques present different characteristics of those manufactured by techniques, such as injection. Consequently, the union devices until the present time have been developed for these last techniques of manufacture, finding deficiencies when they try to apply to components obtained by the additive manufacturing.

The first part of the document will consist of a description of the technique of rotary friction welding (FSW, Friction Stir Welding), then the new joining system has been developed. The proposed system will be variant of FSW with addition of material, in which the welding tool itself will be consumable material.

After the theoretical analysis, the 3D model of the tool and auxiliary elements is designed, to later go on to manufacture the prototype.

FDM rapid prototyping and laser cutting techniques have been used for manufacturing, in addition to manual workshop techniques.

The document is concluded with the mechanical characterization of the components joined by the developed system.

In this TFM we have gone through all the phases involved in the development of a product, resulting in a welding system based on FSW, being a small and economical tool.

3. Introducción

Actualmente es conocido que uno de los objetivos de la fabricación aditiva es construir componentes de grandes volúmenes, además de complejos, donde la variable temporal no sea un factor limitante.

Una de las ventajas del AM (Additive Manufacturing) es que el componente puede ser fabricado con una reducida planificación de procesos [1]. Así el AM incluye un abanico de tecnologías y procesos en el que los objetos pueden ser rápidamente creados a partir de los modelos generados. El concepto básico del RP es la construcción de estructuras 3D a partir de laminados en 2 dimensiones. Es decir, otros procesos de manufactura requieren de un detallado y cuidadoso análisis de la geometría, para determinar características como qué herramientas deben de ser usadas [2].

Actualmente la competitividad en los mercados, obliga a desarrollar productos con ciclos tendiendo a mercados que se están transformando del product-push al market-pull [2], es decir, se va más allá de satisfacer la necesidades del cliente, incrementando la complejidad de los productos y reduciendo el ciclo de vida [3] [4].

El número de corporaciones que han optado por usar técnicas aditivas ha crecido exponencialmente desde el 1988, alcanzando en 1999 un movimiento de 1 billón de dólares, la siguiente gráfica muestra el crecimiento anual global de sistemas de prototipado vendidos [5].

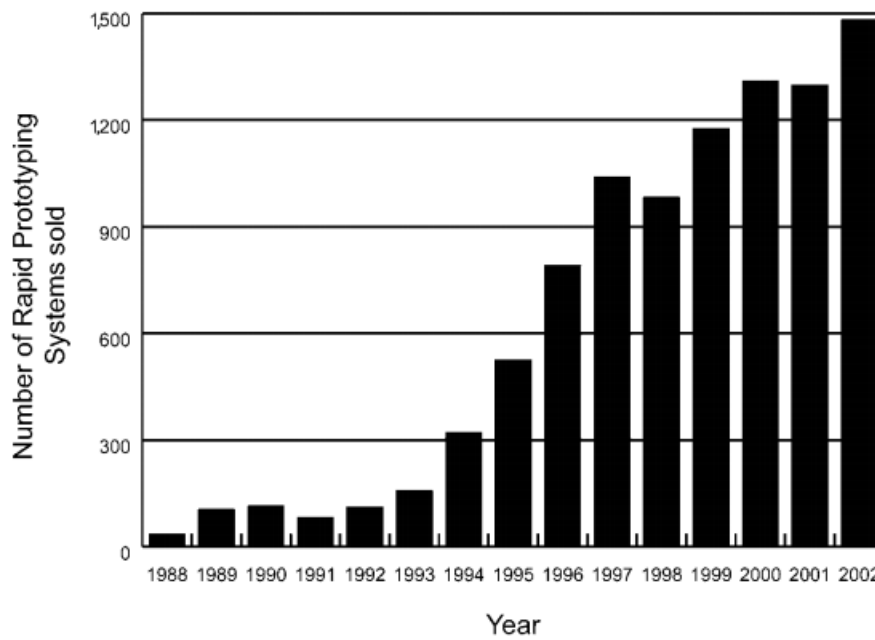


Figura 2. Crecimiento global de sistemas de prototipado rápido vendidos, como se muestra ha tenido un constante crecimiento [5]. (Wohlers 2003b).

Además, la tendencia del mercado es a una mayor segmentación, resultando un cliente individualizado incrementando el abanico de productos [2] [6]. La consecuencia de ello será pasar de una producción en masa, a una producción con un reducido volumen de productos pero un amplio rango de ellos [7].

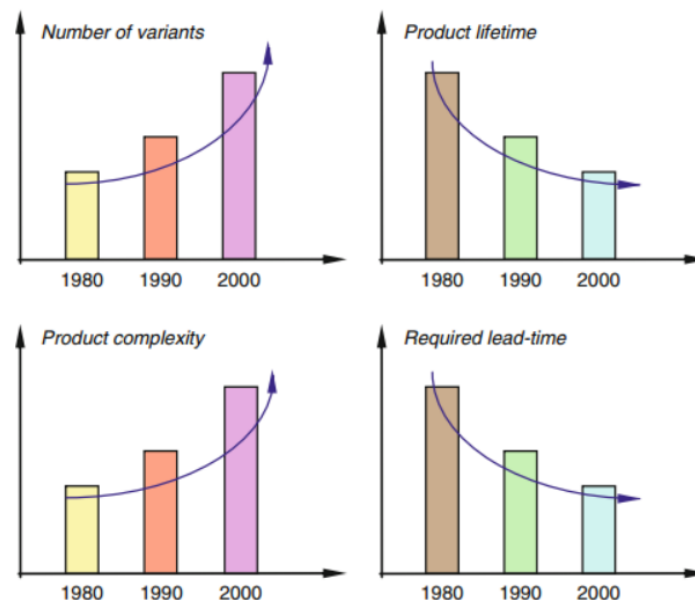


Figura 3. Cambios en la manufactura durante los últimos 30 años [3].

4. Justificación

Las expectativas que se tienen para la fabricación aditiva es que se pase de estar orientada a la obtención de prototipos, a una fabricación masiva [1]. La tendencia es que cada vez más partes de los productos de consumo sean personalizados al deseo del cliente, suponiendo ello un importante reto para la industria. Además, como se ha mencionado anteriormente, la evolución del mercado tiende a realizar complejos ensamblajes de componentes. Siendo por todo ello necesario la ejecución de métodos de unión.

Con lo anteriormente introducido, las aplicaciones de la soldadura son claras, ya que, además, la evolución del mercado tiende a realizar complejos ensamblajes de componentes, como se muestra en la Figura 4 (caso de BMW), donde se requieren que estos sean unidos [8].

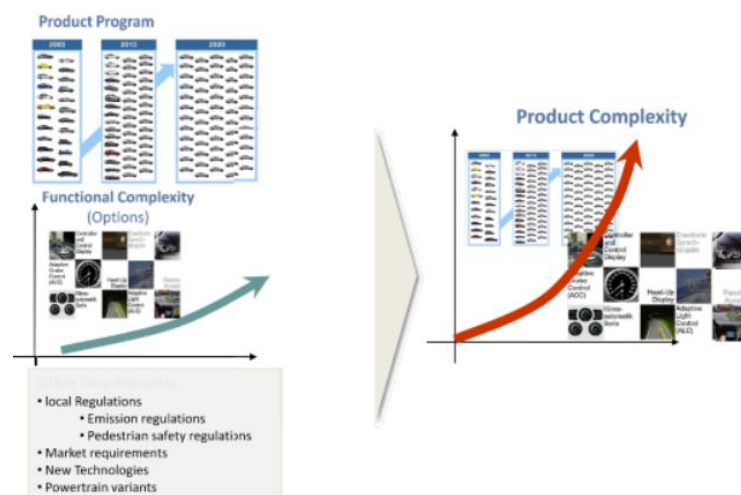


Figura 4. Incremento de la complejidad de los productos [8].

Como se sabe, el FSW es una técnica usada para la unión de componentes, no solo metálicos, sino también poliméricos [9], la cual se encuentra en crecimiento debido a sus ventajas medioambientales e ingenieriles [10], dicho proceso se aplica principalmente en el sector aeroespacial (industria del espacio y aviación), sector naval y automotriz [9]. Pero, como se verá, la aplicación de los métodos convencionales de FSW no se adaptan convenientemente a los componentes obtenidos mediante AM, motivo por el cual se desarrolla el presente trabajo.

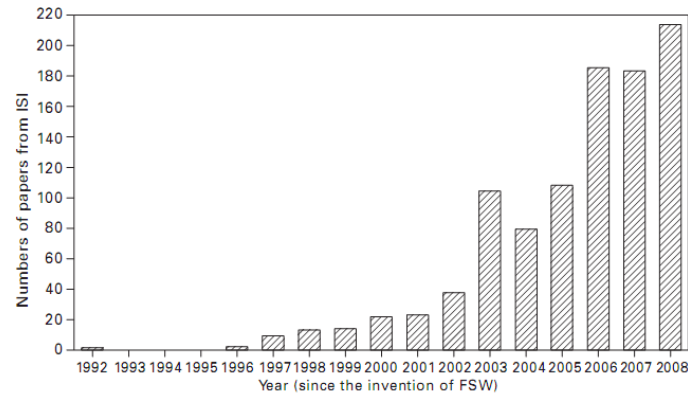


Figura 5. Incremento del número de publicaciones en Friction Stir Welding / Friction stir Processing. Web of Science data-base [11].



Figura 6. Uso de soldadura FSSW, Friction Stir Sport Welding en Mazda RX-8. Cortesía de Ford Motor Company [10].

Un aspecto importante del sistema propuesto es que aporta una solución en cuanto a la manufactura sostenible. Es decir, el sistema desarrollado es medioambientalmente sostenible, en cuanto a que el consumo de energía es reducido comparado con otras tecnologías. Dicha tendencia está cada vez más presente, regularizándose en el horizonte 2020 [6], obteniendo productos de la industria óptimos y sostenibles en cuanto a su manufactura.

5. Objetivos

Se pretenderá tener como resultado un sistema de soldeo basado en FSW, realizando el desarrollo completo de una máquina herramienta, así como la

metodología de actuación para obtener piezas soldadas, centralizados en componentes poliméricos fabricados mediante técnicas aditivas.

Para ello, previamente es necesario realizar una revisión de la bibliografía, así como adquirir conocimientos de las técnicas actuales que tienen un mayor número de aspectos en común. Es decir, se realizará un análisis teórico de los distintos parámetros que tienen influencia en el proceso y se diseñará la herramienta atendiendo a dichas necesidades.

Para el diseño de la herramienta se usa un software CAD para posteriormente exportarlo en formato de malla y poder realizar el prototipado 3D.

Junto con técnicas manuales de taller, se tendrá el prototipo de la máquina herramienta con el cual se realizarán las primeras pruebas de soldeo.

El mayor grueso de tiempo de este trabajo se ha desarrollado en la fase central, es decir, en obtener un prototipo funcional- Ello es debido a que se trata de un sistema novedoso por lo que hay muchos aspectos que no ha sido estudiados y no se encuentran en bibliografía. Es por ello que la solución final se tendrá tras varias iteraciones y mejoras del producto.

En la última fase se realizan ensayos para demostrar la viabilidad del trabajo, no extendiéndose demasiado en cuanto al estudio detallado de parámetros y su influencia en la soldadura.

6. Estructura del trabajo

El presente documento se estructura tal y como se ha desarrollado el trabajo, en orden lógico de actuación, se ha dividido en los siguientes bloques:

- Análisis teórico
- Selección de componentes
- Diseño sistema
- Fabricación de prototipo
- Ensayo de prototipo

- Fabricación y soldeo de probetas
- Ensayos y caracterización mecánica.

7. Pruebas experimentales previas

Antes de realizar el desarrollo del presente trabajo, de cara a no realizar esfuerzo en vano se realizó un primer test para verificar la viabilidad de la tecnología. Para ello se usó una Dremel 4300® (Figura 7). A la cual en el mandril se le instaló un filamento de ABS blanco de diámetro 3 mm. En dicha aproximación a la tecnología se apreció como se producía un rápido consumo de filamento, por lo que constantemente era necesario interrumpir el proceso para sustituir un nuevo material de aporte.



Figura 7. Dremel® 4300.

Además, a lo anterior, se producía un gran rechazo de material de aporte, incremento de tiempo de operación, reduciendo la calidad de la unión. Es por ello que se consideró necesario implementarle a la tecnología un sistema de alimentación continua, la cual suministrase material de aporte de forma controlada, pero automática e ininterrumpida.

8. Análisis teórico

8.1. Consideraciones previas

Tipos de unión

Actualmente existen diferentes técnicas de unión fija, a continuación, se nombran las más relevantes que pueden ser aplicadas a materiales poliméricos:

- Soldadura
- Remaches - roblones
- Adhesivos
- Ajustes a presión

De las anteriores, si seleccionamos las más idóneas para materiales poliméricos, fabricados mediante técnicas AM encontramos que el ajuste a presión no es adecuado [12].

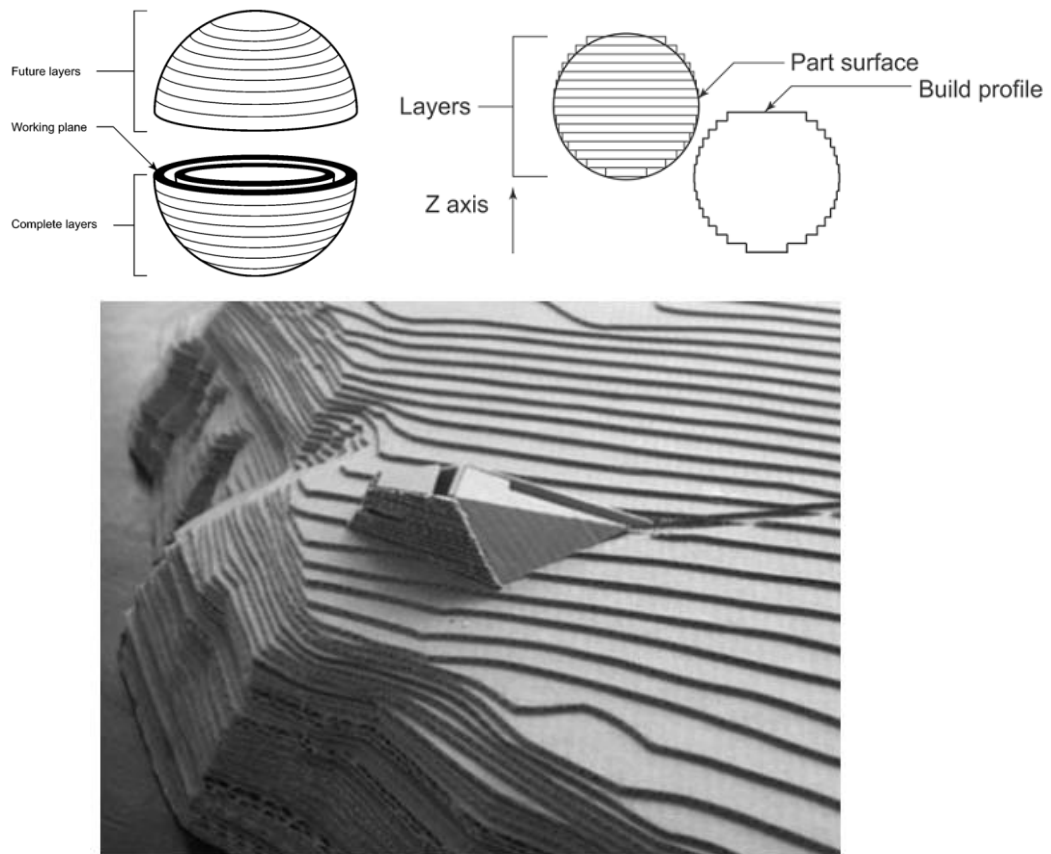
Dichos procesos, son conocidos y se omite su desarrollo, tan solo se mencionará las dificultades que se tienen cuando se pretende aplicar a componentes fabricados por AM:

- Soldado, se consigue penetración en la unión, por lo que si se realiza correctamente se tienen buenas propiedades mecánicas.
- Remaches, se consigue buenas propiedades mecánicas, debiéndose de tener en cuenta la posibilidad de reforzar la zona a remachar. Puede presentar limitaciones estéticas en componentes finales.
- Adhesivo, unirá solo la parte exterior de este, por lo que tendrá una transmisión de carga mecánica deficiente.

Diferencias, componentes fabricados mediante inyección

Los componentes fabricados mediante técnicas AM presentan una estructura diferente a los componentes análogos fabricados por técnicas tradicionales. Esta diferencia principalmente es dada por la propia tecnología, es decir, por la geometría de construcción, o como defectos de la dicha. Esto es; en la fabricación aditiva los

componentes se generan mediante la adición de capas (Figura 8), por lo que ello llevará asociada una defectología. Por otro lado el usuario puede controlar la cantidad de material que se deposita en las diferentes partes de los componentes, teniendo ventajas en cuanto a reducción de masa [5]. Es decir, si lo comparamos con el análogo fabricado por inyección, por ambas causas, el componente es más poroso, con una superficie exterior rugosa.



**Figura 8. Construcción de esfera mediante RP: (izquierda) teórica, (derecha) real [5].
(Abajo) Superficie exterior de un componente fabricado mediante AM [13].**

Los parámetros de relleno (solapamiento, espesores, offset, etc.) y patrones seguidos son parámetros controlables existiendo una gran variedad de ellos (Figura 9, Figura 10), pero por lo general se tienen estructuras similares a las siguientes:

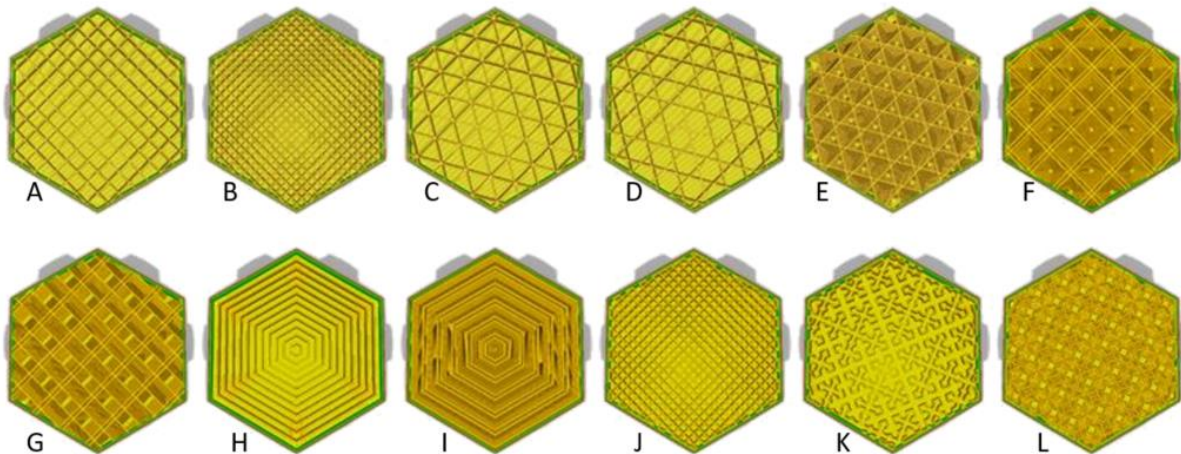


Figura 9. Patrones de relleno disponibles en Cura 3: A, Rejilla. B, Lineal. C, Triangular. D, Tri-hexagonal. E, Cubica. F, Cúbica (subdivisión). G, Octeto. H, Concéntrica. I, Concéntrica 3D, J, Zig-zag. K, Cruzada. L, Cruzada 3D. Fuente: www.ultimaker.com.

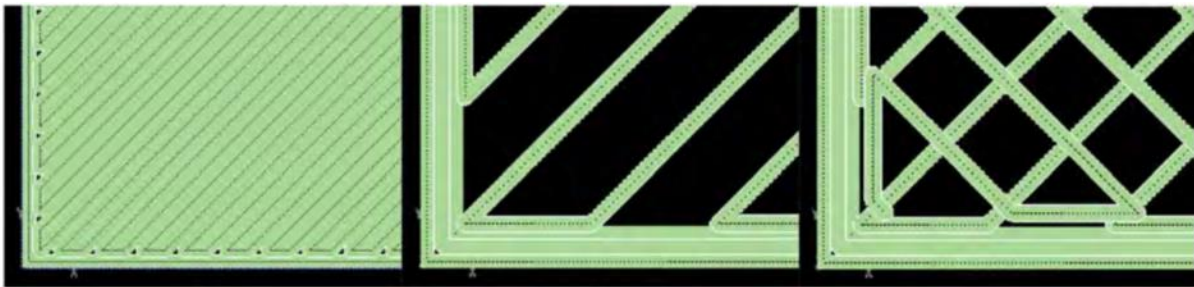


Figura 10. Izquierda: sólida. Centro: estructura Sparse. Derecha: Double Sparse. Fuente: [Stratasys](http://Stratasys.com). [14].

Además de lo anterior, que se realiza mediante parámetros controlables previos a la fabricación de los componentes, las tecnologías de fabricación aditivas dejan un mayor número de poros y defectos que los componentes fabricados por inyección. La siguiente figura muestra un componente fabricado mediante SLS (Selective Laser Sintering) de acero y cobre, en la cual se puede discernir una parte de material que se encuentra sin fundir (a), material fundido (b) y por último porosidad (c) [15].

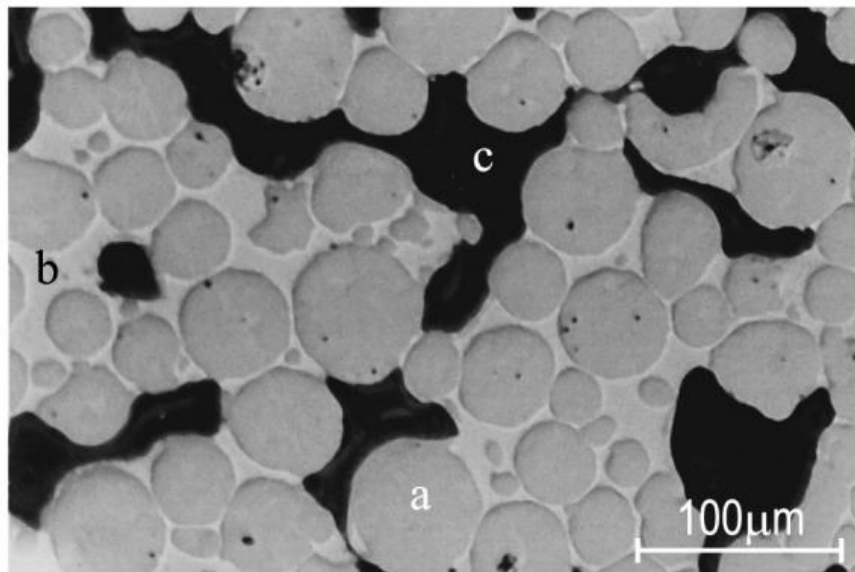


Figura 11. Componente fabricado mediante SLS de acero y cobre, material sin fundir (a), fundido (b), porosidad (c) [15].

Por lo que, a la vista de la figura anterior, es de esperar que se comporte mecánicamente diferente a una estructura fabricada por otros métodos.

8.2. Soldadura plástica

La soldadura plástica es el proceso de unión entre dos o más piezas termoplásticas con o sin aporte de material. La unión se formará cuando se enfríe por debajo de la transición vítrea en polímeros amorfos y por debajo de la temperatura de fusión en polímeros cristalinos [16]

La soldadura plástica puede ser por:

Aire caliente (hot gas welding)

Se produce la fusión parcial de material superficial mediante la aplicación de aire caliente. Se aplica de forma manual, en combinación con presión y aporte de material, formará la unión (Figura 12). En ella se pueden alcanzar resistencias del 90% del material base. Requiere una alta habilidad del soldador [17].



Figura 12. Soldadura mediante aire caliente Fuente: TWI Ltd.

Placa caliente (hot plate welding)

Se alcanza el estado de plasticidad mediante la transferencia de calor usando una superficie caliente, el proceso se ilustra en Figura 13. Además, es necesaria la aplicación de presión siguiendo un esquema similar al mostrado en la Figura 14 [16][19][18].

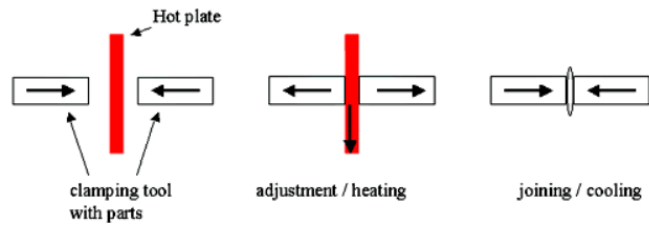


Figura 13. Proceso de soldeo con placa caliente [18].

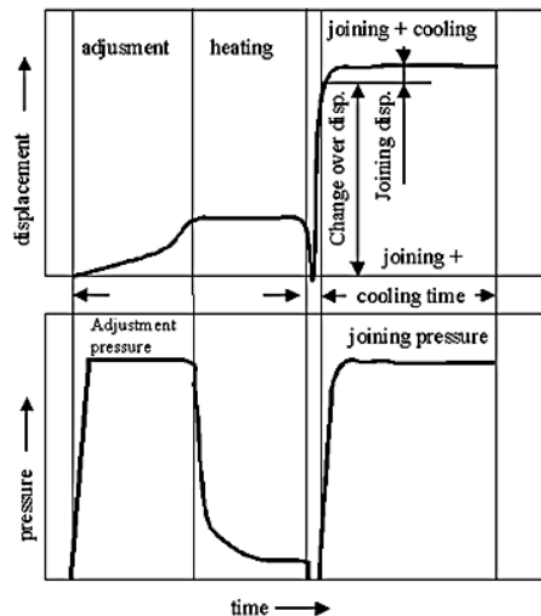


Figura 14. Fases de soldeo con placa caliente [18].

Ultrasónica (ultrasonic welding)

El plástico es unido como combinación de presión y aplicación de un movimiento con frecuencia ultrasónica. El movimiento es aplicado mediante el sonotrodo, la frecuencia comúnmente aplicada está comprendida entre 20 y 40 kHz con una amplitud de aproximadamente 0.05 mm [16].

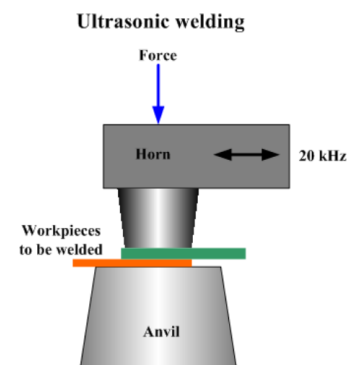


Figura 15. Soldadura ultrasónica. Fuente: Substech.

Rotacional (spin welding)

Dos piezas cilíndricas de revolución se ponen en contacto, una de ellas se hace girar, generando calor, para que al detener el giro se produzca la unión. Se verá más en detalle.

Vibracional, alta frecuencia.

La soldadura se produce como consecuencia del movimiento vibracional de los componentes. el ciclo de soldeo es muy reducido (milisegundos) con una vibración del rango de 100-500 Hz y una amplitud entre 0.5 – 5 mm [16].

8.3. Soldadura en estado sólido

La soldadura en estado sólido ha tenido un significativo impacto en cuanto a procesos de soldeo se refiere. Es ampliamente usado en el sector automotriz y aeronáutico dadas las ventajas que nos aporta asociadas al estado sólido [20]. En cuanto al estado del arte se encuentra que el FSW está mucho más desarrollado que el proceso de soldeo FSP (Friction Stir Proccesing), ya que es una tecnología que se encuentra en una fase prematura [10].

Orientados a la soldadura en estado sólido para materiales metálicos y poliméricos se tienen las siguientes variantes [21]:

- Soldadura fría [20]
- Soldadura por fricción (dada su importancia se profundizará más adelante)
- Soldadura ultrasónica
- Soldadura por explosión
- Soldadura por difusión
- Soldadura por resistencia [20]

A su vez la soldadura por fricción se puede subdividir en las siguientes variantes [22]:

- **Spin Welding**, procedimiento que se realiza mediante la fijación de una de las partes y la rotación de la otra. La generación de calor se produce por el rozamiento entre

ambos materiales, que al detener el movimiento se produce la unión soldada. Es decir, la energía de entrada es puramente mecánica, teniendo importancia la velocidad de rotación, presión y tiempo en el cual se rota la pieza [23].

En la Figura 16 se muestra la fase inicial del proceso de soldeo rotacional y en la soldadura final obtenida

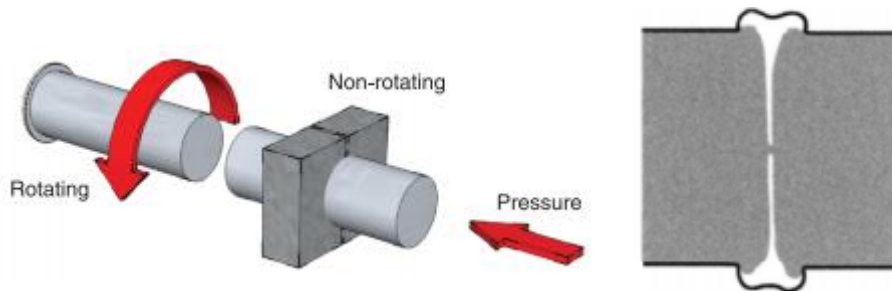


Figura 16. Izquierda: Fase inicial del proceso de soldeo por rotación. Gatwick Technologies Ltd, 2013. Derecha: Sección final soldada. Se muestra un collar de material externo donde la mayor parte de impurezas y contaminación es expulsada hacia el exterior [23].

- **Linear Friction Welding (LFW)**, similar a la anterior pero el movimiento es oscilatorio lateral en lugar de rotacional. Requiere que los componentes al soldar tengan alta resistencia a cortante. El resultado obtenido se ilustra en la Figura 18 [21].

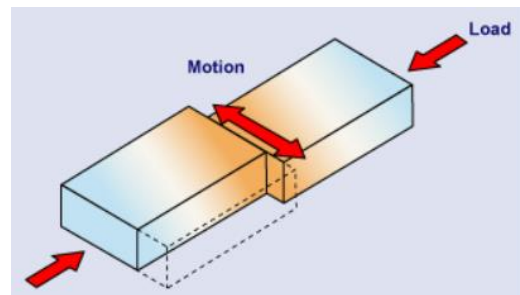


Figura 17. Principio de LFW. Stephan Kallee TWI (2000).

- Friction surfacing / Friction stir Processing,

Se menciona aquí por su similitud con FSW aunque actualmente no se considera como un método de unión, según [23] hasta la fecha solo existen pruebas experimentales sin éxito. Actualmente es usado como tratamiento térmico (aplicación de coating).

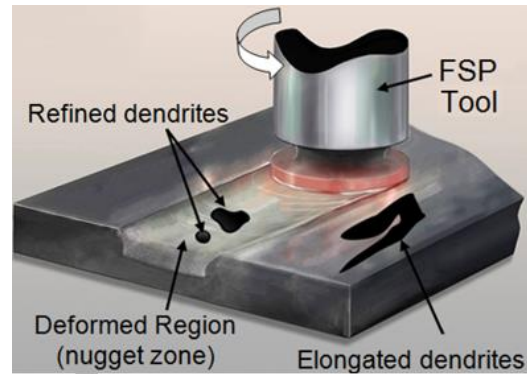


Figura 18. Esquema del proceso de fricción aplicada a la superficie [24].

El proceso consiste en la rotación de una barra redonda consumible la cual es presionada sobre el material a aplicar el coating [23]. Es decir, la herramienta, llamada mechtrode es un consumible que bajo presión y rotación genera una capa plástica que queda adherida en forma de sustrato [24]

- **Friction Stir Welding (FSW)**, se describirá con mayor detalle ya que es el procedimiento que más características comparte con el procedimiento propuesto.

8.4. FSW

Inventada por Wayne Thomas en el TWI (The Welding Institute) cuya patente [25] fecha en 1995 [9]. Las partes a unir son sujetadas, mientras que la herramienta se desplaza por la unión a la vez que se presiona y se hace rotar [23]. Por lo que es un proceso de deformación plástica sin llegar a la fusión. Es decir, soldadura por fricción se considera como soldadura plástica, ya que no se produce una completa fusión en las superficies a unir

Como se ha mencionado, el proceso usa una herramienta rotatoria, cuya geometría es distinta dependiendo de los materiales a unir, pero en todos los casos la herramienta tiene un pin que penetrará casi completamente en las piezas de trabajo (Figura 19). En el proceso es similar al fresado, en el que se sustituye la herramienta de corte por la herramienta de FSW, generando una mayor fuerza sobre las piezas a unir que en el caso del fresado [23].

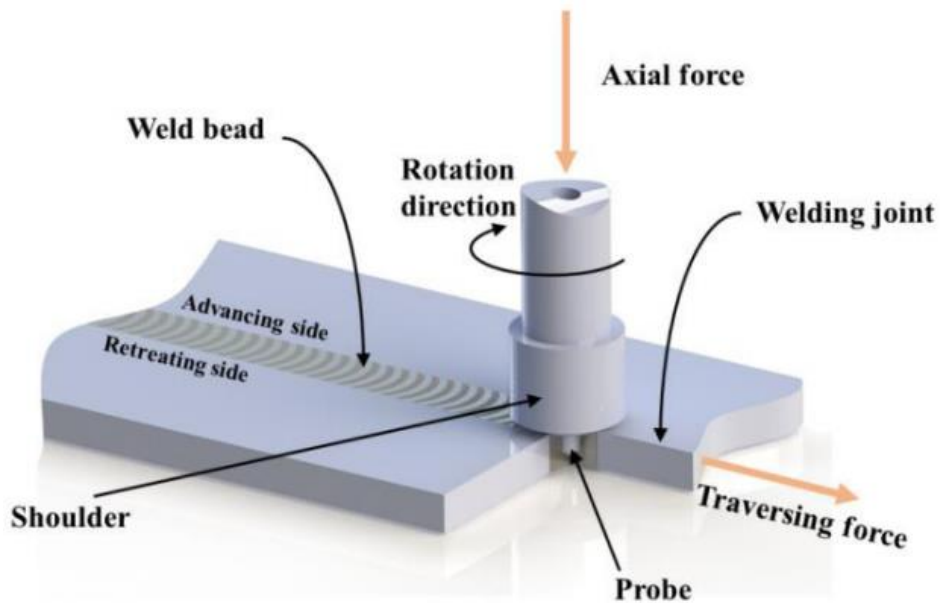


Figura 19. Proceso de soldeo por FSW [26].

Proceso

El proceso se puede modelar como un proceso de metalúrgico con una fase a) precalentamiento, b) deformación inicial, c) extrusión, d) forjado y e) enfriamiento [27] (Figura 20)

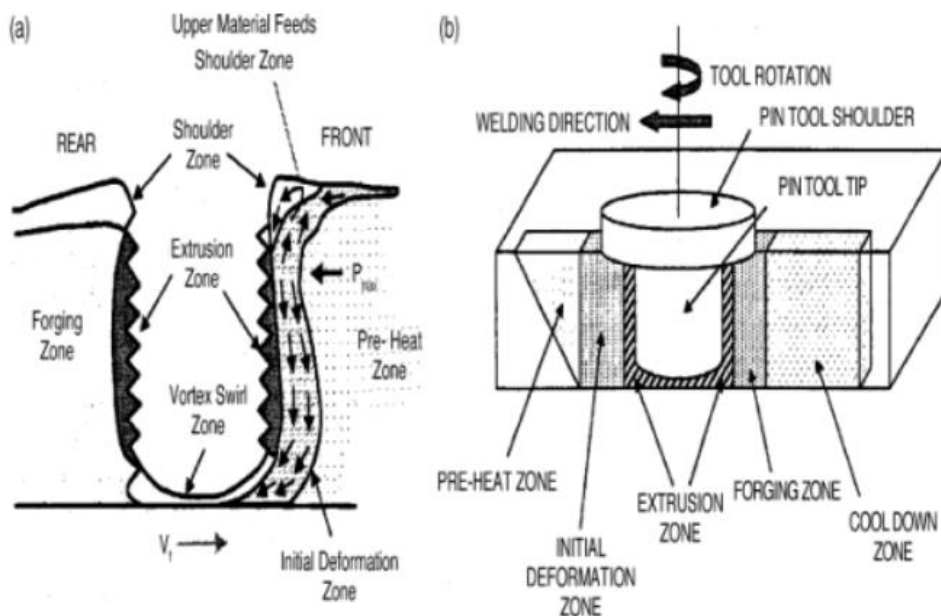


Figura 20. a) Flujo de material en sección longitudinal. b) Zonas de proceso metalúrgico desarrolladas durante FSW [27].

Principales parámetros

Principalmente influyen los siguientes parámetros [28]:

- penetración de la herramienta
- geometría de la herramienta
- avance, velocidad transversal
- velocidad de giro
- cabeceo de herramienta
- aporte de calor extra
- presión entre elementos a unir
- propiedades de materiales a unir
- parámetros de movimiento orbital

por lo que se trata un proceso complejo, dado el número de variables que influyen [29].

La contribución de las variables anteriores no tiene la misma importancia, la Figura 21 muestra la importancia de los parámetros principales, destacando la velocidad de giro con un 73.85% de la contribución total [30].

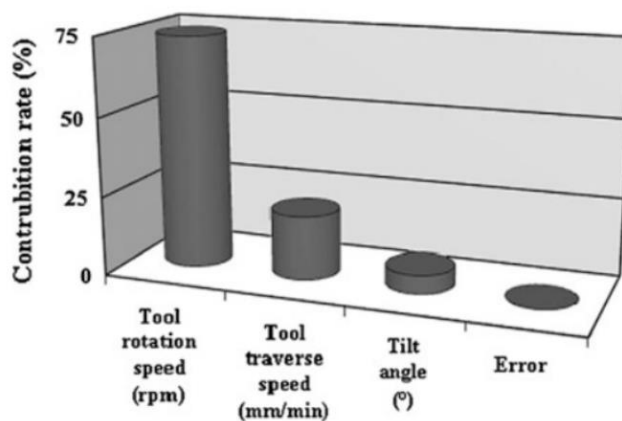


Figura 21. Ratio de importancia en la contribución de los parámetros [30].

Ventajas e inconvenientes

El interés por esta tecnología está en incremento dadas las siguientes ventajas [28], [21]:

- La resistencia de la soldadura es muy cercana a la del material base

- Mantiene las propiedades originales del material.
- La dureza cae solo entre un 10 y 20 % respecto al material base [23].
- ZAT (Zona Afectada Térmicamente) reducida. Con reducida entrada de calor se genera una reducida distorsión y tensiones residuales [26]
- Bajo consumo de energía, solo el 2.5% de la energía necesaria en soldadura láser [31]
- Evita el uso de gases de cobertura, sostenible medioambientalmente.
- No genera radiación visible, ruido o humo.
- Menos sensible a la compatibilidad física y química de materiales (p.e: PMMA – ABS, [32])
- Eliminación de problemas de porosidad y grietas de solidificación
- Baja concentración de defectos
- Seguro
- Fácilmente automatizable
- Tasa de producción similar a otros procesos
- Operable en todas las posiciones
- Reducida distorsión en elementos adyacentes
- Uniones en materiales con diferentes espesores [31]
- No requiere tratamiento de limpieza previo
- Microestructura fina (en metálicos)
- No requiere de consumibles difíciles y costosos [10].
- Buen acabado superficial. En la raíz del cordón puede ser invisible y en la parte superior queda la superficie suavizada [23]
- Reducida preparación de superficies a unir, no requiere tratamiento de limpieza previo [23]

Por otro lado, puede presentar las siguientes dificultades:

- Temperatura insuficiente resultado de una baja velocidad de rotación, alta velocidad de avance.
- Defectos tipo túnel
- Incremento excesivo de la fuerza de penetración y avance
- Falta de penetración si el pin no tiene la longitud suficiente
- Menos flexible que otro tipo de soldeo convencional (arco, electrodo...)
- Se requieren de altas fuerzas para la sujeción de piezas

- Dependiendo de donde se sitúe el final de la soldadura puede quedar un agujero en este [23].

Si comparamos FSW respecto a la soldadura por arco los principales puntos para la selección de la primera son [11]:

- *Resistencia mejorada a fatiga, corrosión, tensiones estáticas y ductilidad [33][34][35][36]. La resistencia a fatiga de la soldadura FSW es mayor que la de arco, pero menor a la del material base, aproximándose más al material base si la superficie es mecanizada. Esto principalmente se debe a que la microestructura en el cordón y en la ZAT es más fina que en el caso de la soldadura por arco. En cuanto a resistencia estática es similar a la soldadura por arco cuando los espesores a soldar son menores de 75mm. Para espesores mayores, el hecho de poder realizarla en una pasada simple resulta ventajoso.
- Reducida distorsión, tensiones residuales. El pico de temperatura es menor en FSW comparado con la soldadura de arco, reduciendo la distorsión longitudinal y transversal. Aun así, FSW no está libre de tensiones residuales, por lo que se debe tratar de balancearlas.
- Mejor aspecto superficial, en diversas aplicaciones no se permite material de exceso, en dicho caso es necesario el uso de la soldadura autógena como es la FSW.
- **Proceso automatizado. Implica costosa inversión inicial, pero es necesaria para la producción en masa. La producción en masa justifica económicamente la soldadura FSW al amplificar el ahorro de mano de obra y tiempo procesado. También se tiene en cuenta que para altos espesores las fuerzas generadas durante FSW son muy altas, lo que imposibilita su uso de forma manual. Para mitigar esto se están desarrollando herramientas para aplicaciones concretas [11], cuyo caso es el presente.

***Para el soldeo de una placa de aluminio 5083 de 25mm de espesor es necesario aplicar una fuerza de 44kN en la dirección del eje de rotación de la herramienta y simultáneamente una fuerza de avance de herramienta de 15 kN aplicando un par de giro de 360 Nm [37]. En el caso de una placa de aluminio 2198 con 2.8mm de espesor es necesario aplicar 5kN, 650 N en la misma dirección que en el caso anterior, además de 500N en la dirección transversal de soldadura [38].*

*La resistencia a fatiga está relacionada con el material de aporte, es decir, se ve mejorada cuando durante la soldadura se aporta material [39]. Ello se visualiza en Figura 22.

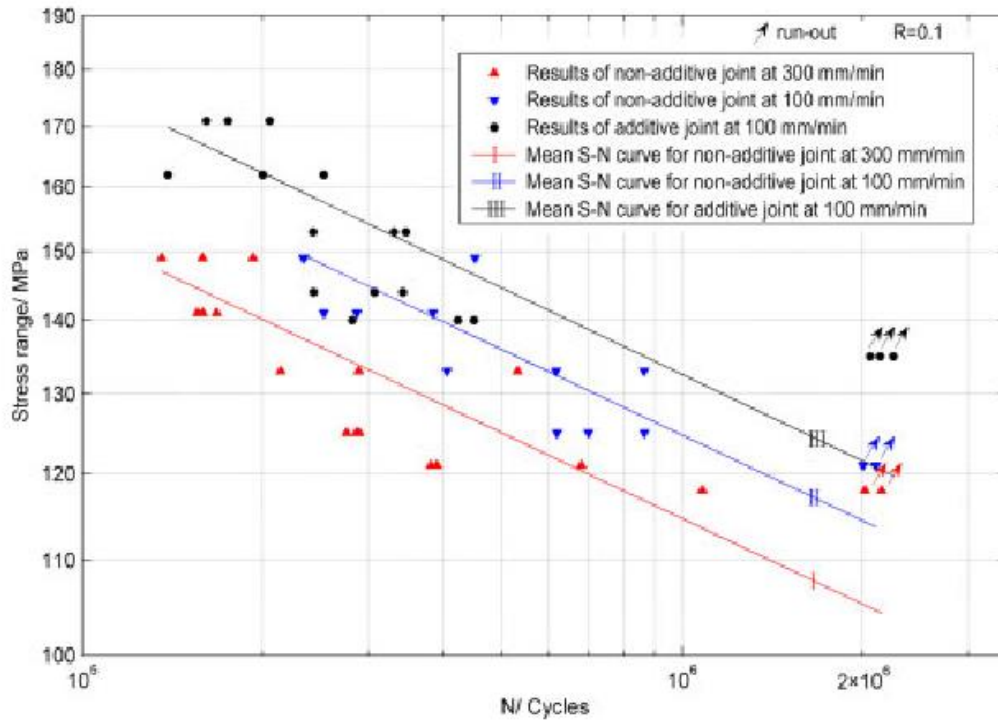


Figura 22. Se muestra como las uniones soldadas con adición de material soportan mejor los esfuerzos de fatiga AA6061-T4 [39].

Disposiciones de aplicación

La variedad de geometrías donde es posible aplicar FSW es amplia, en la Figura 23 se muestran las geometrías típicas en las que se puede aplicar FSW.

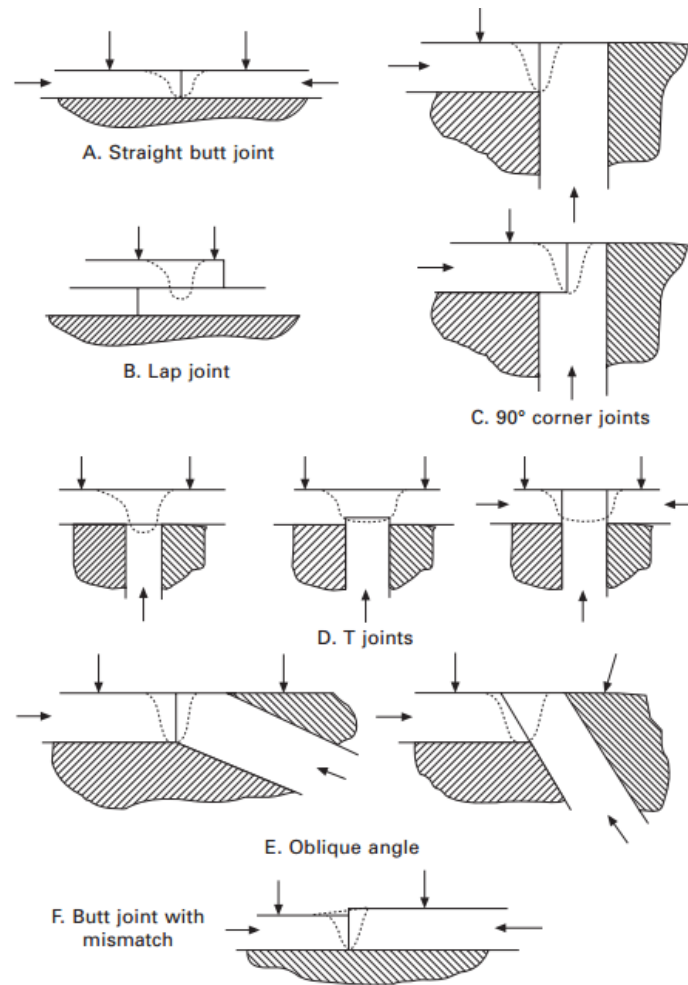


Figura 23. Disposiciones comunes de unión que son de aplicación para la tecnología FSW. También se muestra la sección transversal de los apoyos recomendados [11].

El área necesaria para la soldadura FSW (diámetro del hombro) depende del material y el espesor, para aleaciones de aluminio el área requerida es de tres a cinco veces el espesor, mientras que para acero y titanio requiere un menor diámetro de hombro al tener menor conductividad térmica [11].

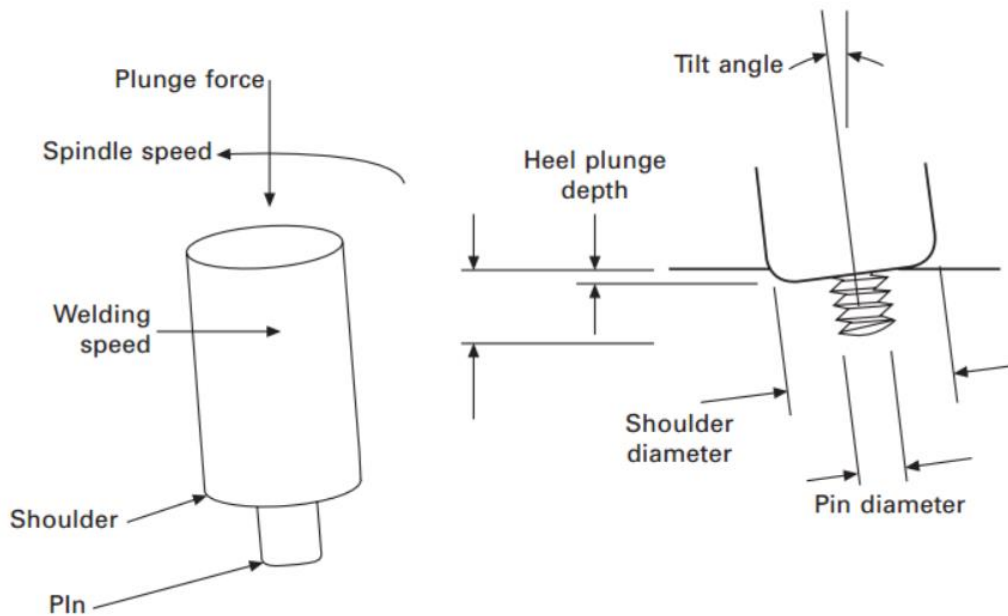


Figura 25. Herramienta convencional de FSW y variables clave [11]. El ángulo de inclinación se realiza de forma que en la parte delantera del pin quede el hombro levantado, es decir, la dirección de avance de la herramienta en la imagen derecha es hacia la derecha [40].

El diseño de la herramienta puede ser dividido en dos clases, convencionales y de bobina (carrete).

En la convencional se realiza la soldadura por un solo lado, la herramienta penetra parcialmente en la pieza de trabajo, dejando un reducido hueco (0.5mm) hasta el apoyo.

En contraste la herramienta en bobina consiste en dos hombros que están conectados por el pin, que rotan a lo unísono (Figura 26). La última conseguirá mejores propiedades en cuanto a que no se produce el defecto de unión en el cordón de raíz en la cara opuesta a la que se le ejecuta la soldadura [41].

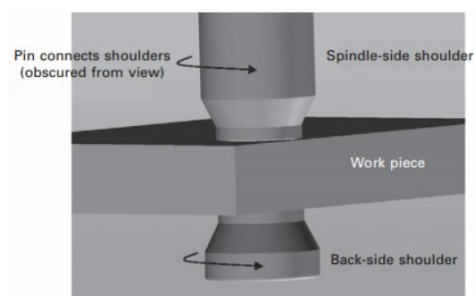


Figura 26. Soldadura FSW en bobina [11].

La geometría de la herramienta es muy diversa, debiendo prestar atención al coste, vida y limitaciones, siendo un desarrollo activo actualmente, la muestra las más extendidas.

Feature	Intended effect	Examples
Threads on pin	Compression of weld zone against anvil	
Flats or other re-entrant features	New mode of plastic work, thicker section welding, higher heat input	
Flat pin tip	Improved TMAZ penetration, higher penetration ligaments – better robustness	
Frustum pin profile	Reduced lateral forces, thicker section welding	
Flare pin profile	Wider root profile	
Shoulder scrolls	Elimination of tool tilt requirement, containment of softened work piece material	
Tapered shoulder	Variable shoulder contact width, variable shoulder penetration	

Figura 27. Geometrías de herramienta más comunes [11].

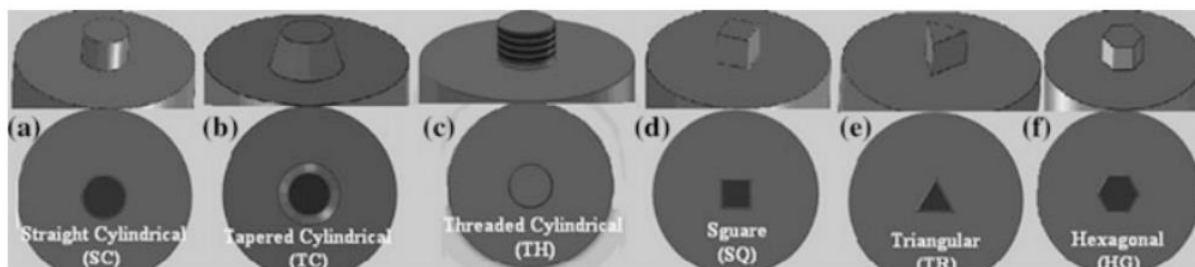


Figura 28. Geometrías de pin más comunes [42].

Fijaciones

El diseño de las fijaciones para realizar la soldadura es un aspecto importante, de forma que generalmente se disponen sin gap en la línea de unión, debiendo aplicar la restricción vertical lo más cerca posible de la zona que va a ser procesada (Figura 29). Es común la instalación de una placa de cobre en la parte inferior de la soldadura a efectos de mejorar la transmisión térmica y la seguridad del proceso, es decir, para prevenir la situación en la que el pin penetre una profundidad mayor al espesor de la pieza y pueda originar accidentes [11] [43].

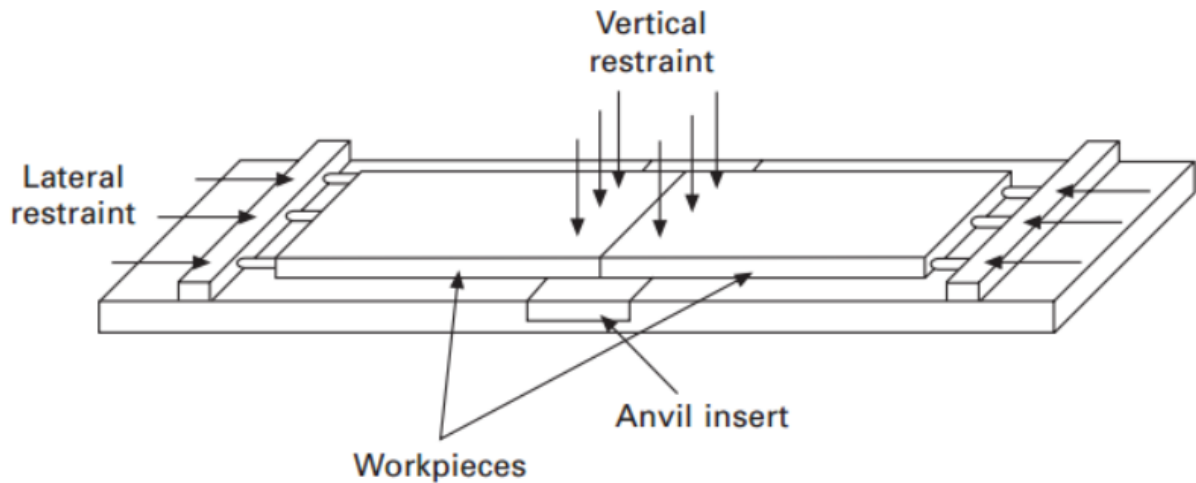


Figura 29. Fijaciones en FWS convencional [11].

8.5. Variantes FSW

Hombro estacionario

Una variante o accesorio que se le puede acoplar a la herramienta, interesante cuando la soldadura que se pretende realizar no están en disposición “a tope” o “solape”, es el caso de la FSW con hombro estacionario (Stationary Shoulder Friction Stir Welded). El accesorio consiste en un hombro fabricado con un material específico (dependiendo del material que sea soldado) en el cual se pueda o no controlar la temperatura. En la Figura 30 se muestra un detalle del proceso del dicho [39]:

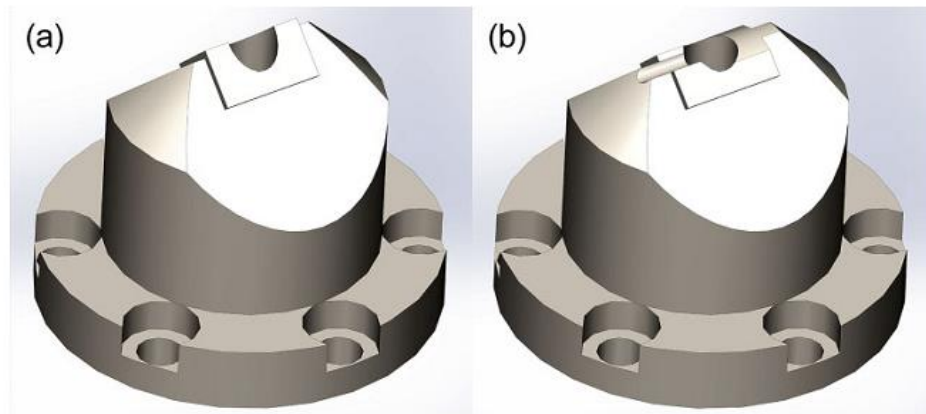
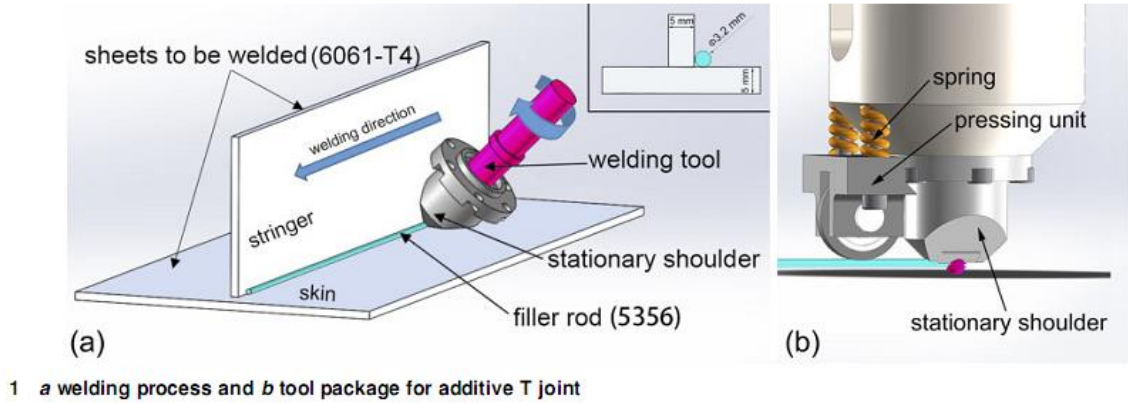


Figura 30. FSW con hombro estacionario, para soldaduras con una disposición en T con y sin adición de material [39].

Friction Stir Sport Welding (FSSW)

La diferencia entre FSW y FSSW es que en la segunda no existe movimiento transversal de la herramienta, es decir, FSSW produce una soldadura tipo punto en lugar de un cordón continuo, además el aporte de calor extra es nulo en el caso de FSSW [28]. Ello lo hace especialmente interesante en materiales poliméricos, así como compuestos. La soldadura FSSW se caracteriza por una alta resistencia a cortante, mayor que la que nos aportan otro métodos como la soldadura por microondas o ultrasónica [44][45]. Las fases del proceso se ilustran en la Figura 32.

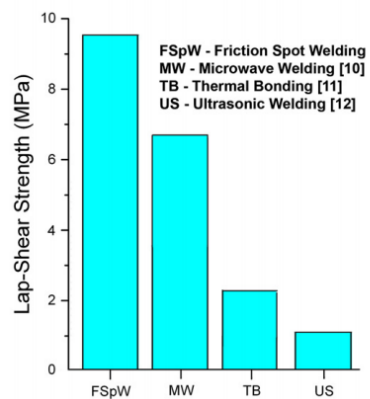


Figura 31. Resistencia a cortante de especímenes soldados con diferentes técnicas [45].

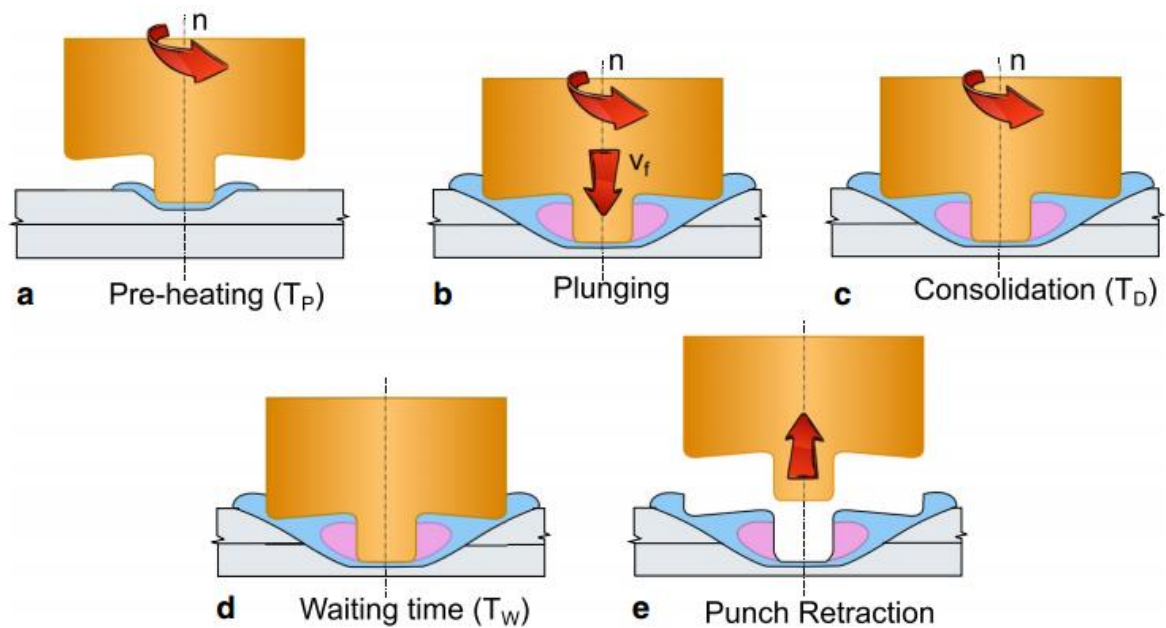


Figura 32. 5 Fases de soldeo en FSSW [28].

8.6 FSW en polímeros termoplásticos

La información que se encuentra en dichos materiales es más reducida, ya que el proceso inicialmente solo se concibió para materiales metálicos con bajo punto de fusión (aluminios). En termoplásticos se ven implicados diferentes parámetros termo-mecánicos con el añadido distinto comportamiento reológico – físico [46]. Hasta el momento solo existen breves

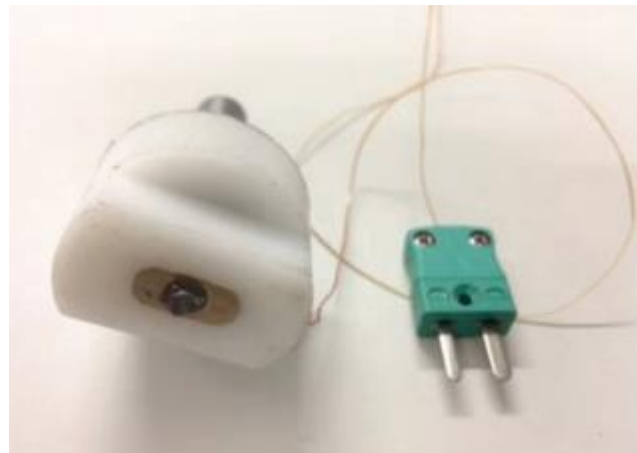


Figura 33. Herramienta con hombro estacionario de teflón y control de temperatura de la herramienta [26].

estudios de Stir Welding en polímeros, en concreto se han estudiado polietileno, polietileno de alta densidad (HDPE) polipropileno (PE), ABS, Polyethylene-terephthalate-glycol (PET-G) y poliamida Nylon 6 (referencias detalladas en Figura 34). Mostafapour y Azarsa [44] estudiaron experimentalmente la unión de polietileno de alta densidad (HDPE) llegando a la conclusión de que las uniones alcanzaban un 95% de la tensión última del material.

Es claro que la herramienta debe de ser distinta en el caso de que se pretenda soldar material metálico o material polimérico [47]. Es decir las herramientas tradicionales de FSW no son apropiadas para soldar polímeros debido al bajo punto de fusión, conductividad térmica y endurecimiento de los materiales poliméricos [48] La herramienta más efectiva para polímeros es la denominada “hot shoe” desarrollada por Strand, la cual incorpora un hombro estático de aluminio recubierto de teflón sin generación de calor adicional [49] .

Parámetros óptimos

A continuación, en la Figura 34 se muestra una tabla resumen de en los diferentes estudios los parámetros más relevantes y el resultado obtenido. Además, de ser útil en la fase de optimización del proceso (fuera del alcance del presente trabajo), será necesario para el dimensionamiento del sistema, tal como la velocidad de giro y su regulación [41].

Autor / Referencia	Material	Principales Parámetros	Resultados
Bozkurt [30]	HDPE	Diámetro hta: 18 mm Diámetro pin: 6 mm $\omega = 1500 - 3000 \text{ rpm}$ $v = 45 - 115 \text{ mm}/\text{min}$	Poros, bajas propiedades mecánicas.
Saeedy and Givi [50]	PE	$\omega = 1000 - 1800 \text{ rpm}$ $v = 12 - 20 \text{ mm}/\text{min}$ Cabeceo $1 - 2^\circ$	Resistencia mecánica del 75%
Arici and Selale [51] y Arici and Sinmaz [52]	PE	Herramienta convencional Doble pasada $\omega = 1000 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm}/\text{min}$	Insuficiente generación de calor para hasta $\omega = 800 \text{ rpm}$ La resistencia mecánica disminuye al aumentar el cabeceo de la herramienta.
Aydin [53]	PE	Herramienta convencional $\omega = 1000 \text{ rpm}$ $v = 60 \text{ mm}/\text{min}$	El precalentamiento mejora las propiedades a bajas velocidades de rotación.

		Pre-calentamiento del material base	
Squeo y Quadrini [54]	PE	Herramienta convencional Precalentamiento de herramienta y material base	Precalentar la herramienta mejora las propiedades.
Paneersselvam y Lenin [55]	PP	Herramienta convencional $\omega = 1500 - 2250 \text{ rpm}$ $v = 30 - 60 \text{ mm}/\text{min}$ Pin cuadrado, triangular, roscado y tapered	La herramienta de pin roscado es la que mejor resultados aporta.
Paneersselvam y Lenin [56]	Nylon 6	Herramienta convencional $\omega = 1000 \text{ rpm}$ $v = 10 \text{ mm}/\text{min}$ Herramienta roscada a izquierdas	Sentido de giro anti horario genera 0 defectos y mayor resistencia comparada con sentido horario.
Mostafapour and Azarsa [57]	HDPE	Herramienta con hombro estacionario calentado a 80, 110 y 140°C de PTFE. Pin roscado. $\omega = 1000 - 1600 \text{ rpm}$ $v = 10 - 40 \text{ mm}/\text{min}$	Se forma una piscina de material semifundido que incrementa el embotado de la herramienta a mayor velocidad. Utilizando calor externo se alcanzan resistencias superiores al 95% del material base.
Rezgui et al [58]	HDPE	Hombro de madera. Pin roscado, M10, M12 y M14	Soldadura reducida calidad.

		$\omega = 900 - 1700 \text{ rpm}$ $v = 16 - 44 \text{ mm}/\text{min}$	
<i>Kiss and Czigány [59]</i>	PP	Hombro sin precalentado de PTFE	Estructuras esferulíticas similar al material base
<i>Kiss and Czigány [60]</i>	PETG	Hombro sin precalentado de PTFE	Discontinuidad entre soldadura y material base.
<i>Mustafa Aydin [53]</i>	UHMW-Polyethylene	$\omega = 960 - 1960 \text{ rpm}$ $v = 10 - 20 \text{ mm}/\text{min}$ Precalentado de material entre 50 y 80°C	Resistencia de 72% sin precalentar y 89% precalentado a 50°C. El precalentamiento facilita el mezclado de material aumentando propiedades.
<i>Bagheri et al. [61]</i>	ABS	Herramienta con hombro estacionario calentado a 50, 80 y 100°C de PTFE. Pin roscado 10 mm de paso 7mm. $\omega = 800 - 1250 - 1600 \text{ rpm}$ $v = 20 - 40 - 80 \text{ mm}/\text{min}$	Incremento de la velocidad de rotación produce un importante incremento de temperatura pero puede producir quemado del material. Baja velocidad produce un inadecuado mezclado, falta de unión. Alta velocidad transversal produce discontinuidades. El mejor acabado se consigue con el hombro a 100°C.

Figura 34. Resumen de estudios realizados hasta la fecha de publicación del presente documento.

Por lo que las conclusiones extraídas de la bibliografía anteriormente indicada es que el hombro estacionario mejora las propiedades y el aspecto superficial de la soldadura,

ya que reduce defectos, permitiendo el batido del material alrededor del pin. Además, una alta temperatura en el hombro y alta velocidad de rotación conduce a la fusión del material (no siendo soldadura en estado sólido). Lo anterior indica que una de las mejoras que se pueden implementar al sistema propuesto es el acople de un hombro estacionario, ello se tiene en cuenta a la hora del diseño como se verá en el punto dedicado a ello.

En cuanto a la resistencia a fatiga en polímeros apenas se encuentra información, solo el estudio realizado por Shayan Eslami et. Al [62] en el cual se afirma que la resistencia a fatiga se ve ligeramente mermada Figura 35 respecto al material base ya que el comportamiento de la soldadura es más frágil.

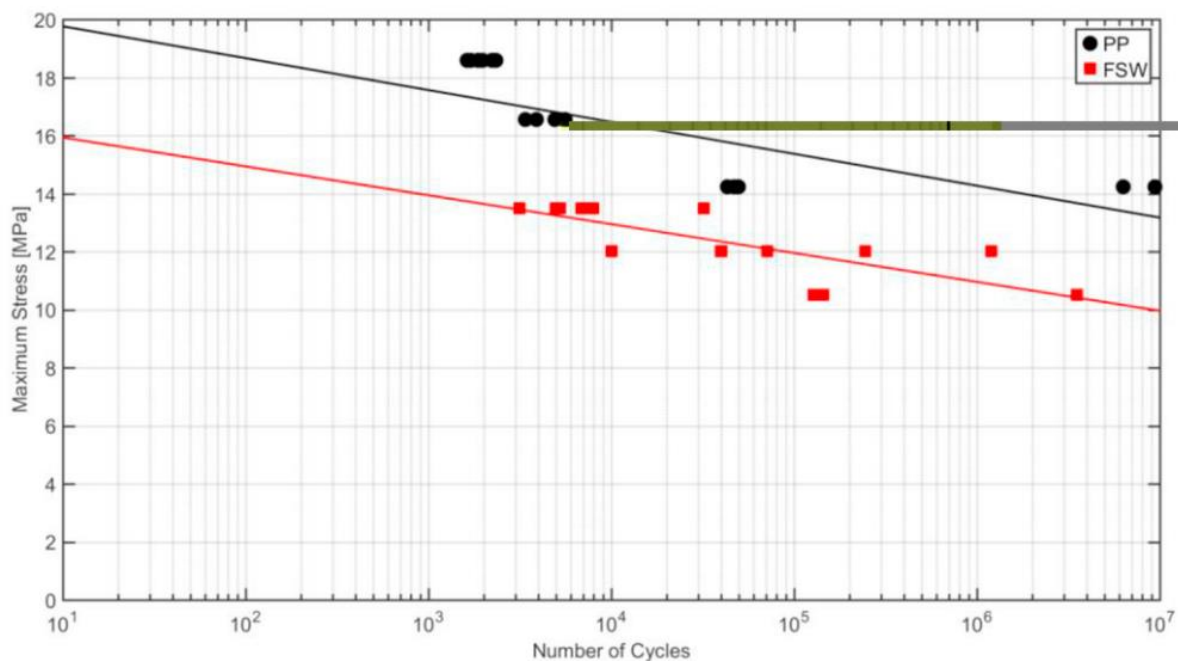


Figura 35. Resistencia a fatiga del polipropileno y la unión soldada, se aprecia que esta última tiene una ligera menor resistencia a fatiga [62].

Por otro lado, en la Figura 36, se muestra de forma gráfica, la velocidad de rotación para los diferentes materiales recomendada por los investigadores en [41] viéndose que el rango se sitúa entre las 250 – 3000 rpm

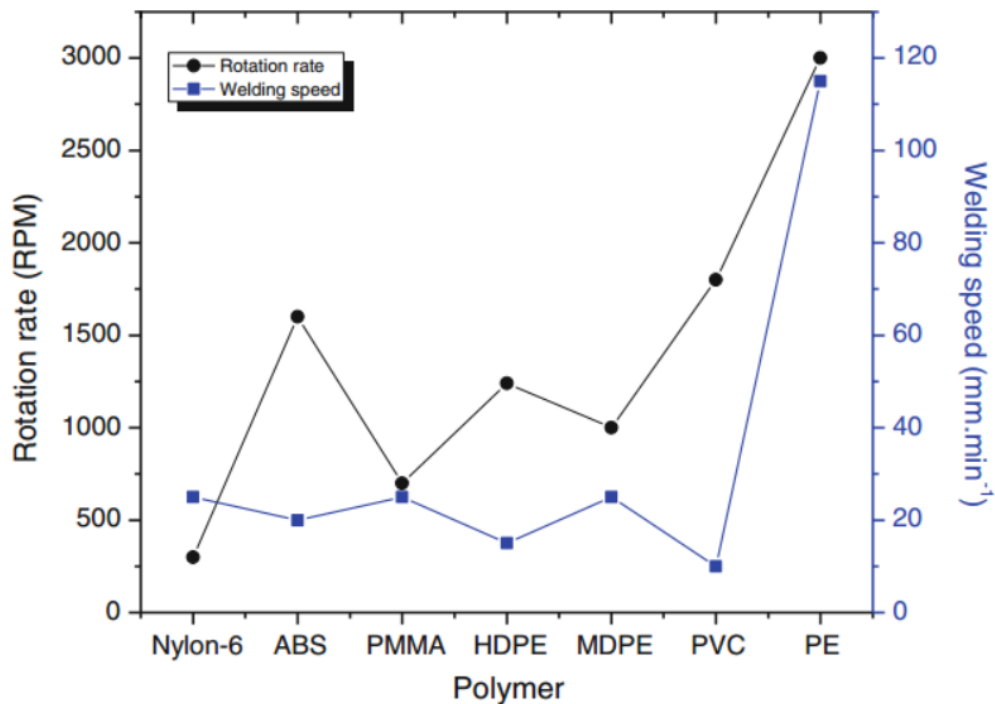


Figura 36. Velocidad de rotación y avance recomendada para distintos polímeros [41].

Zonas

Dada la complejidad existente, actualmente no existe información acerca del flujo de material en FSW para materiales poliméricos, pero existen algunas analogías con los metales [46]. La Figura 39 muestra una sección transversal de una soldadura en material metálico y los flujos de material que se producen en ella [63].

De forma general, en la sección transversal de una soldadura correctamente realizada, en materiales metálicos se pueden discernir las siguientes 4 zonas:

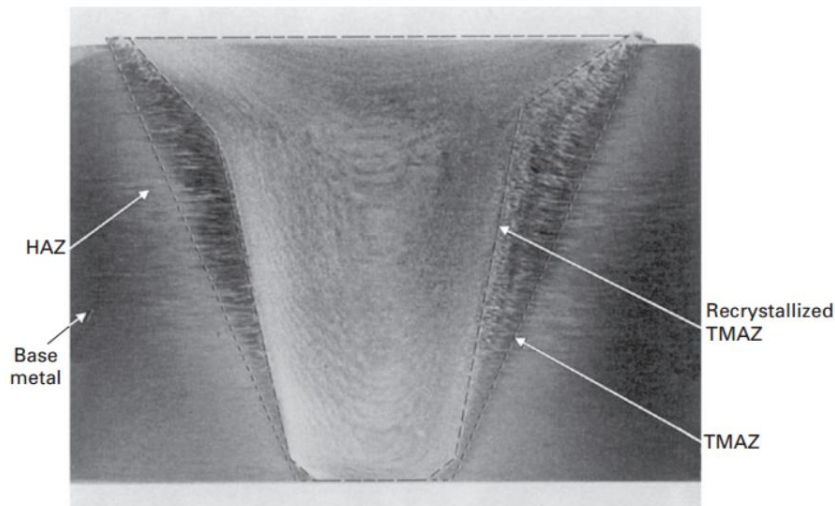


Figura 37. 4 zonas típicas en sección transversal de soldadura FSW. 25.4mm de espesor en aluminio 2195 [11].

- Base Metal. Material base que permanece inalterado
- HAZ, Heat affected zone. Sin deformación plástica existe alteración de las propiedades. Generalmente no produce cambios en la estructura de grano, pero si altera las propiedades de resistencia, ductilidad, susceptibilidad a la corrosión y tenacidad.
- TMAZ: Thermomechanically Affected Zone. Se tiene alta deformación plástica y por ello se produce deformación de la estructura de grano original. Dicha zona puede dividirse en una zona que recristaliza y otra que no lo hace [11].

Flujo de material

Entender el flujo de material es un punto importante, ya que la calidad de la unión depende del grado de batido entre ambas piezas [64], además, de cara a prevenir atrapamientos de aire y otros defectos que pueden generarse durante el proceso de batido [65].

En metales, Arbegast [63] distingue 4 zonas de deformación distribuidas alrededor del pin y debajo del hombro (Figura 39). El lado de la soldadura en la que el movimiento de la herramienta tiene la misma dirección que el avance, es el lado de avance, mientras el opuesto es el lado de retroceso [40]. Por lo

que la zona II estará en el lado de avance mientras que la zona I en la de retracción de este. Es decir, debido a la rotación del pin el material de la zona II es fluido a la zona I. En la Figura 39 inferior derecha, se muestra una estratificación de ambas zonas, ya que el material de la zona II es batido por el pin hacia

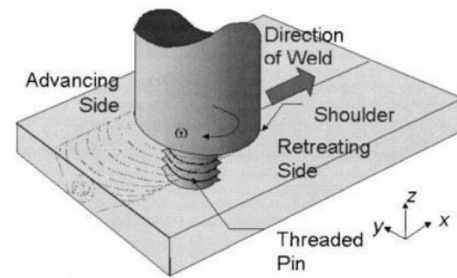


Figura 38. Esquema del proceso [66].

la zona de avance a la vez que es arrastrado hacia abajo [63]. Además, se origina un flujo debajo del pin, denotado como zona IV. Si el material que se bate desde la zona II a la I está lo suficientemente cerca de la zona IV, el material se puede introducir en la zona IV y subir nuevamente a la zona I al ser impulsado por el pin [63]. La zona III será originada por el hombro, donde parte del material perteneciente a la zona III será arrastrado a la zona I. El material en frente del pin será batido hacia la parte posterior de este, creando los flujos que se muestran en Figura 40 independientemente de si el pin esta roscado o no [67] [40].

El batido y los flujos serán los que originen una unión con altas propiedades, por lo que un flujo insuficiente no originará una correcta unión. La acumulación de material se producirá en el parte superior de la zona de avance y en la parte inferior, en la zona de retroceso, por lo que, un excesivo flujo podrá originar una excesiva acumulación de material en la zona I y por lo tanto una unión deficiente.

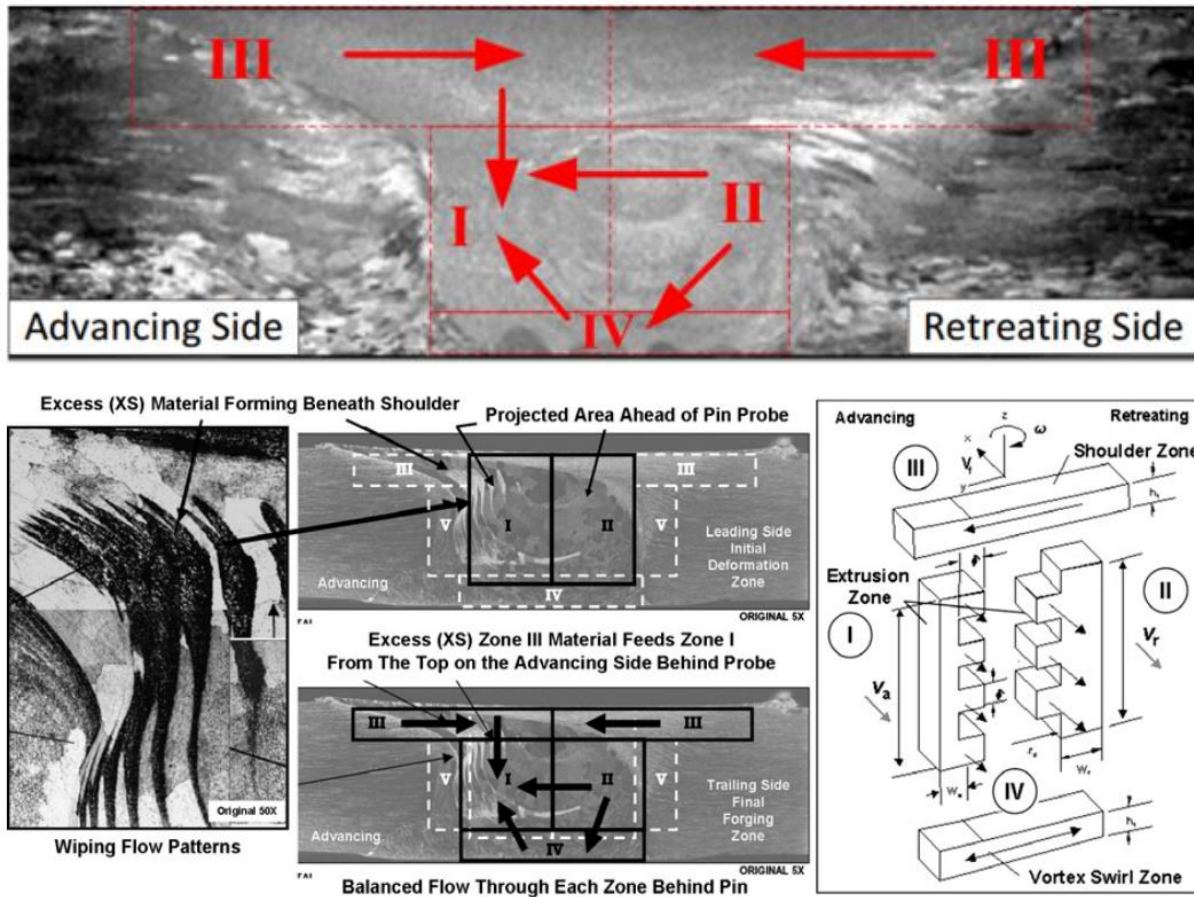


Figura 39. Modelo de Arbogast para materiales metálicos. Se tienen dos partes diferenciadas: el lado de avance AS (izquierda) y retroceso RS de material (derecha). Además, se disciernen 4 zonas de deformación [46]. En la imagen inferior derecha se muestran las variables para aplicar las ecuaciones de conservación de masa desarrolladas en [63]. En todas ellas se muestran secciones transversales en la parte trasera del pin.

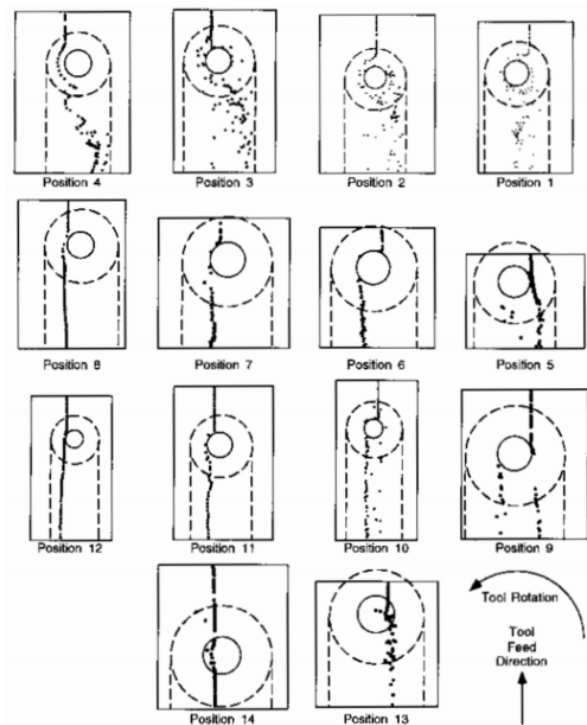


Figura 40. Radiografía del flujo de soldadura en aluminio 6061 visto en planta para diferentes posiciones. Se muestra como las partículas situadas en el lado de avance son batidas en frente del pin hasta situarse en la parte posterior de este en la parte de retracción. Se tiene el mismo resultado se tiene para aluminio 7075 [40]

Si comparamos lo anterior con los estudios encontrados en [46] para el PMMA se tiene solo la zona I y zona II. Es decir, el flujo en polímeros es diferente comparado con el modelo de Arbogast, ya que no existe flujo en la parte superior ni inferior de la herramienta (zona III) [67].

Ello se aprecia en la Figura 41, en la que se discierne una interfase recta entre la herramienta y el material [46], es decir, en polímeros la zona HAT no está siempre presente [41]. Similares resultados se encuentran en [67] para el nylon-6.

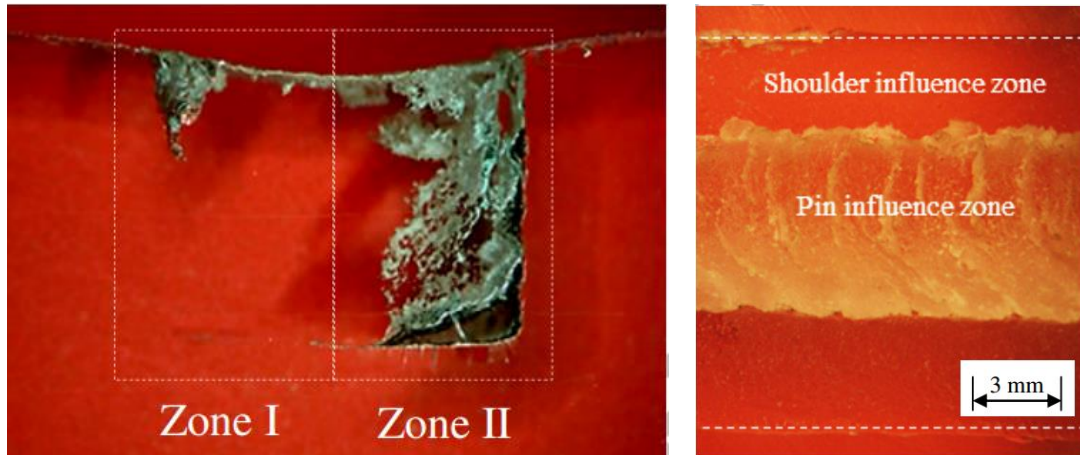


Figura 41. Flujo creado en la soldadura FSW de PMMA. La interfaz del material agitado y el material base permanece recta, no mostrando flujo de material desde el material base a la zona de batido [46].

Efecto de la cristalinidad en las propiedades de los polímeros

El grado de cristalinidad tiene una influencia importante en las propiedades del material, teniendo en cuenta que cuanto mayor sea, tendrá mayor tensión de rotura y dureza con una disminución de tenacidad [68][69][70]

Gao et al. en [71] mide el porcentaje de cristalinidad en la soldadura de HDPE (alta cristalinidad, 80% [72]) apreciándose que la cristalinidad disminuye en el cordón de soldadura. La justificación de la reducida cristalinidad es un rápido enfriamiento de la zona soldada [73].

Conclusión FSW en polímeros

Polímeros con alto punto de fusión y alta viscosidad requieren una mayor velocidad de rotación y menor velocidad de avance, con objetivo de conseguir un mayor calor y un correcto batido. Además, para dichos materiales es recomendable el uso de un hombro estacionario que pueda ser calentado mediante inducción [41].

En cuanto a la geometría del pin, dependerá del polímero soldar siendo para el ABS y HDPE el más adecuado un pin cónico [41].

Por lo que, actualmente se muestra un gran potencial para el uso de FSW en la industria pero que requieren investigación asociada, ya que no se tiene suficiente conocimiento de la mayor parte de parámetros y su relación entre ellos [41].

Desarrollo herramienta de soldeo

10. Fase de selección de componentes

La selección de componentes tendrá influencia directa sobre el diseño del prototipo, ya que se la mayor parte de componentes forman parte de repuestos de otras herramientas o dispositivos.

Las partes de las que se compone el prototipo se muestran en las siguientes vistas explosionadas:

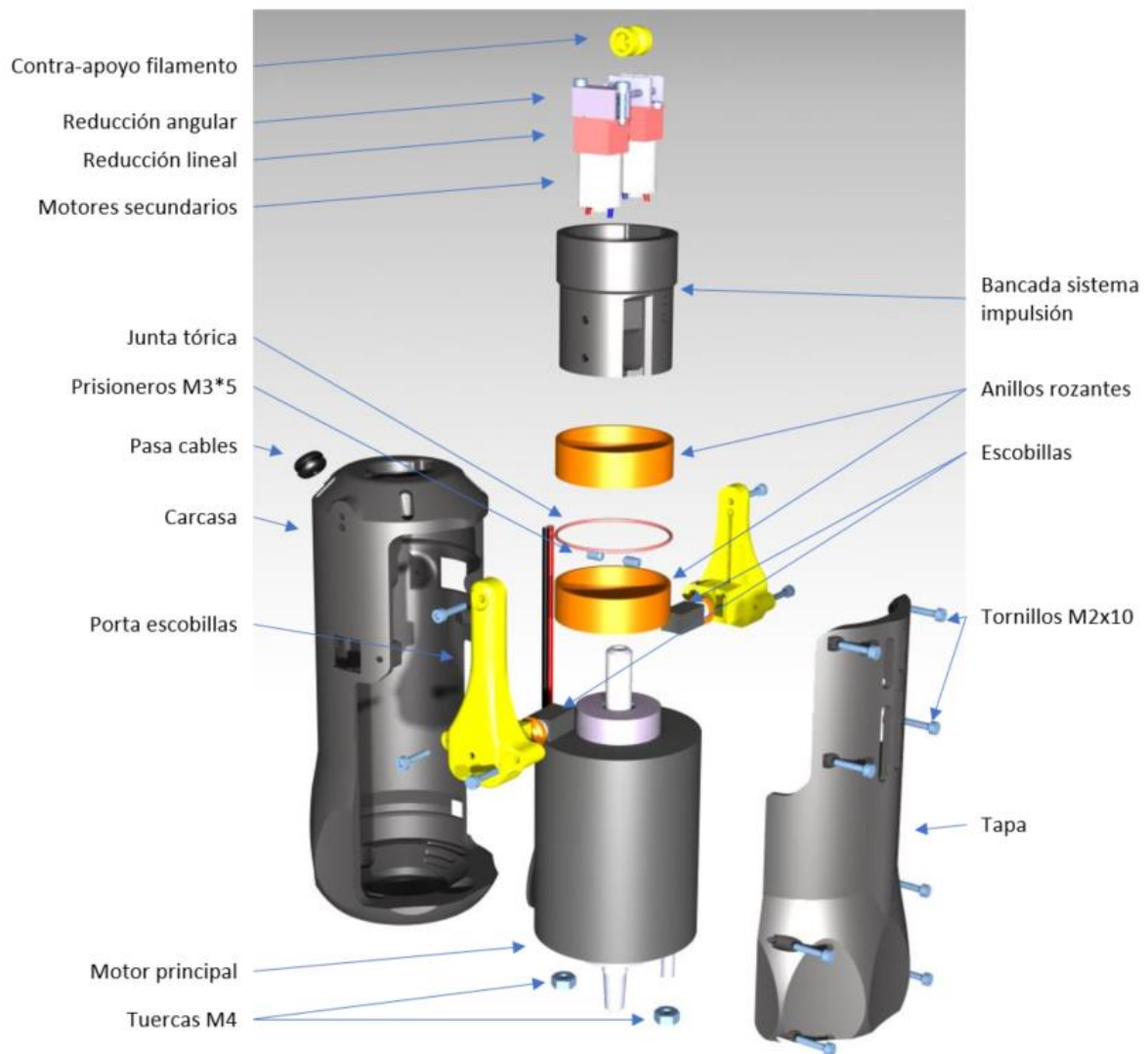


Figura 42. componentes herramienta principal. **Por tamaño de la imagen se ha omitido el tubo PTFE de 3*4*120mm situado en el eje de rotación principal.*

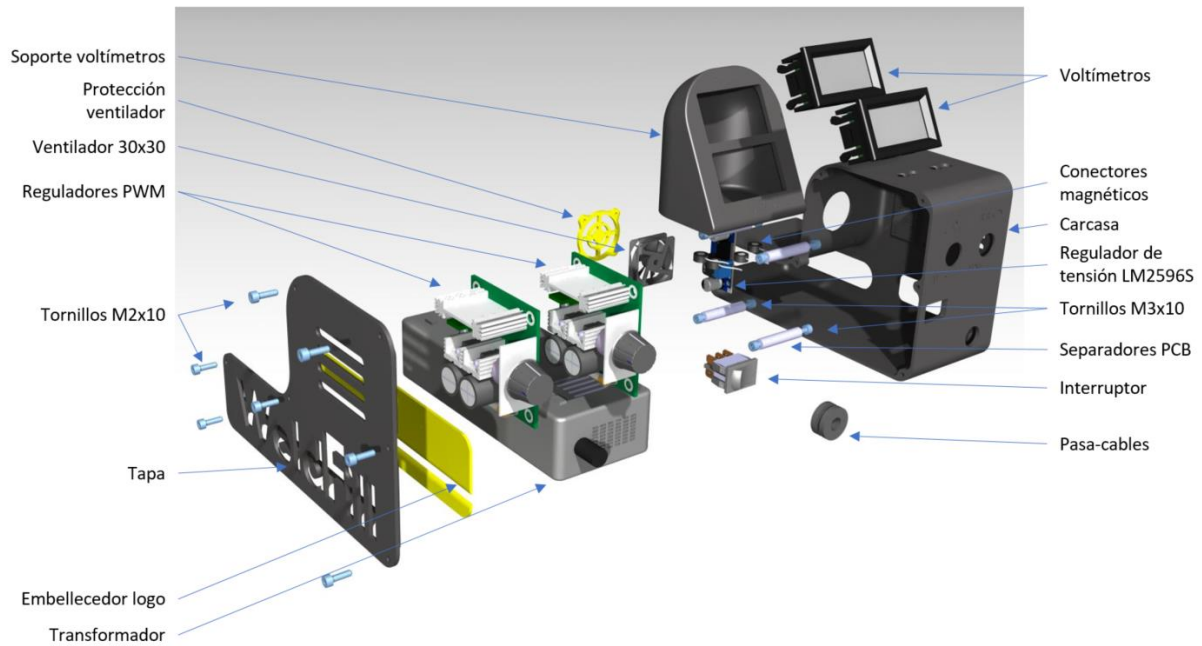


Figura 43. Componentes caja reguladora.

A continuación, se desglosan los elementos asociados al giro principal de la herramienta y al giro secundario. Por último, se nombrarán elementos comunes a ambos que implementará el prototipo.

a. Giro principal

❖ Motor

El movimiento principal de la herramienta es de giro, el cual se realizará con un motor de corriente continua que irá acoplado a un regulador de velocidad PWM. Es decir, deberá de cumplir las siguientes especificaciones:

- Regulación de velocidad, rango 250-3000 rpm en carga (Figura 36).
- Reducido tamaño.
- Eje hueco (diámetro $\geq 4\text{mm}$), de forma que el filamento pase por el interior del motor.
- Acceso al eje por ambos extremos. El extremo inferior para acercarse a la soldadura y el extremo superior para acoplar el sistema de impulsión.
- Posibilidad de inversión de giro.

El motor que mejor se ha adecuado a las especificaciones anteriores es el mostrado en la Figura 44, el cual se trata de un motor de corriente continua de imanes permanentes, con una potencia de 30 W (referencia XD-3420 DC).

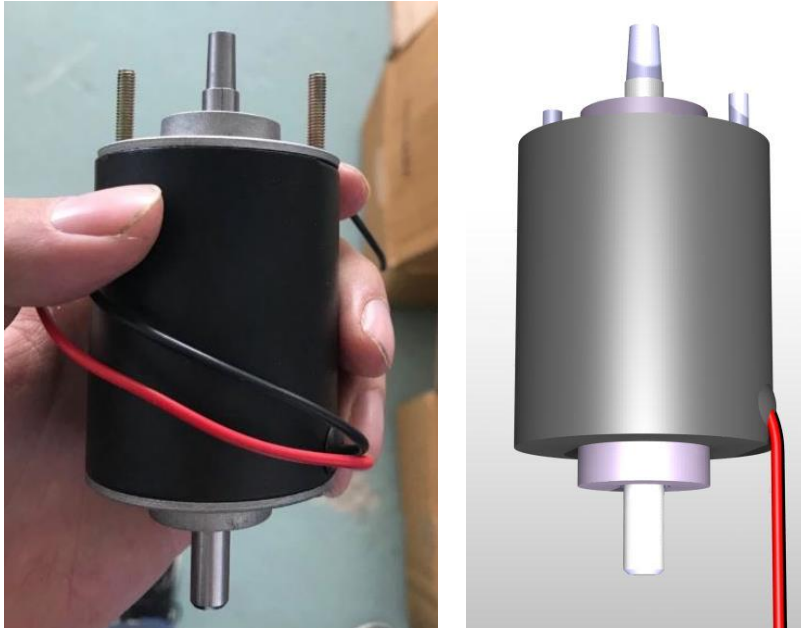


Figura 44. Motor XD-3420 con doble salida y eje hueco.

Las dimensiones suministradas por el fabricante son las mostradas en Figura 45:

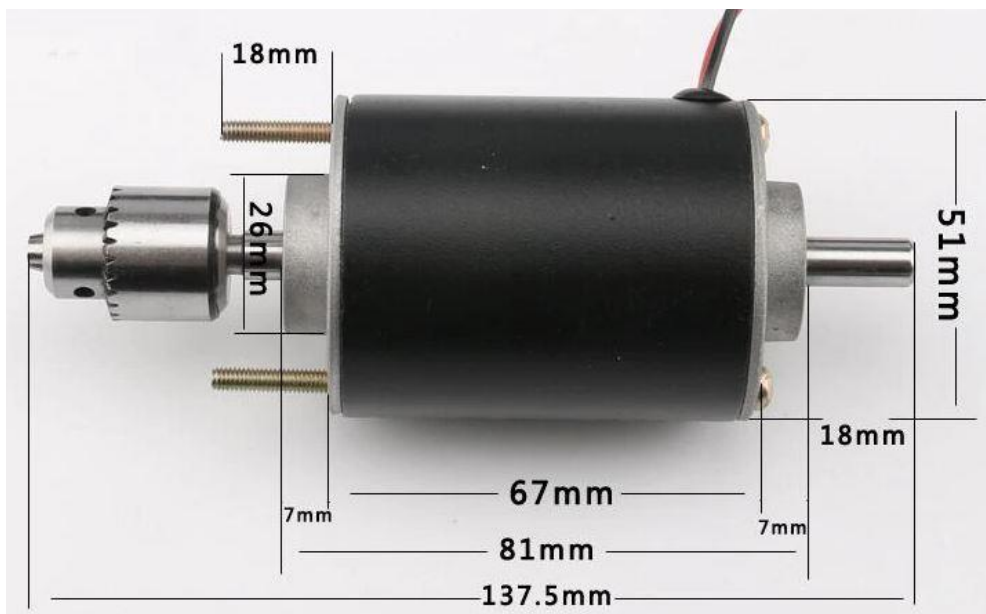


Figura 45. Dimensiones principales.

El proveedor aporta la siguiente tabla de especificaciones:

Voltage	No-load Speed	No-load Current	Rated Speed	Rated Current	Stall Current
12V	3000	0.31	2400	2.42	3.1
24V	6000	0.35	5100	2.76	3.37

Figura 46. Especificaciones técnicas motor XD-3420.

Además, el par máximo es de 1kgf.cm para 12V y 2 kgf.cm para 24V.

❖ Transformador

Con las características anteriores, se usará un transformador que sea capaz de suministrar los 24 V que soporta el motor y al menos 4 A. Se usarán los transformadores comercializados para ordenadores portátiles como el que se muestra en la Figura 47.



Figura 47. Transformador con salida 5 A, 24 V y placa de características.

❖ Regulador de velocidad

La velocidad de rotación de la herramienta es un parámetro que debe ser controlable por el usuario, es por ello que se debe usar un regulador de velocidad. Atendiendo a las especificaciones anteriores, se selecciona el mostrado en la Figura 48 ya que el

dicho soporta hasta 10 A. En cuanto a amperaje se trata, el regulador anterior está sobredimensionado, pero está justificado su uso ya que tiene un reducido coste (<4€).

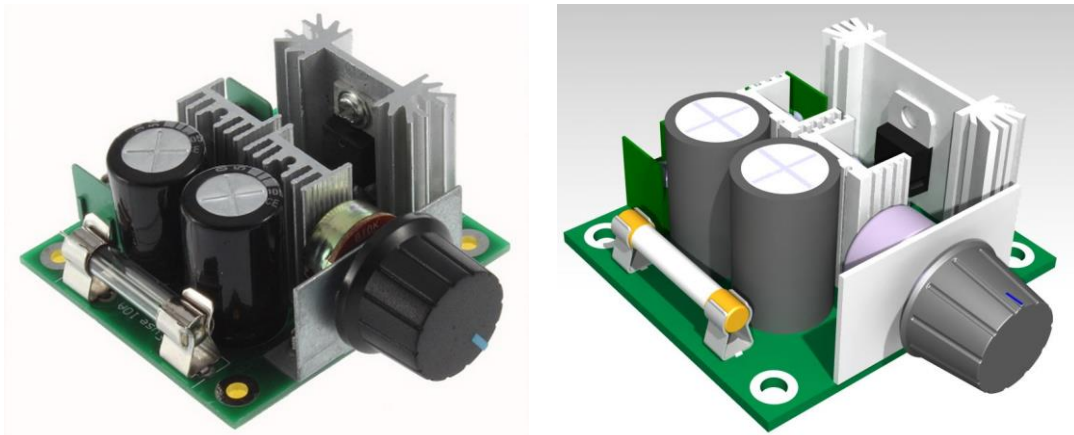


Figura 48. Regulador de velocidad PWM 40V PWM. Modelo real y modelado CAD.

b. Alimentación de material

Se dota a la herramienta de un sistema de alimentación de filamento, en el cual el operario tiene un control proporcional en el suministro de este. Es decir, se necesitará de un regulador de velocidad, una fuente de alimentación, así como el propio motor con la reducción necesaria.

❖ Motor-reductor

Tras realizar una revisión de los motores de reducidas dimensiones y potencia seleccionamos el que se muestra en las siguientes figuras, denominado como N20, al cual se le acoplan dos cajas reductoras. La primera reducción será la encargada de reducir los 38000 rpm del motor a 60 rpm, mientras que el segundo juego de engranajes (tornillo sin fin - corona) además de reducir, el motivo por el que se implementa es que la salida sea angular (Figura 50). El motivo de necesitar una salida angular es que no puede causar interferencia con el material de aporte a la vez que esté lo más cercano a él en cuanto a que todo el conjunto rotará.

La caja angular se suministrada como repuesto para los lápices 3D, en los cuales, con el conjunto anterior impulsará el filamento generalmente de 1.75mm, es por ello que es necesario realizarle modificaciones al motor (cambio del diámetro exterior del rodamiento de apoyo) para acoplarlo a filamentos de 3 mm. Además, mediante métodos manuales es necesario extraer 1.5 mm la rueda dentada de impulsión para con los dos motores cubrir el ancho del filamento.

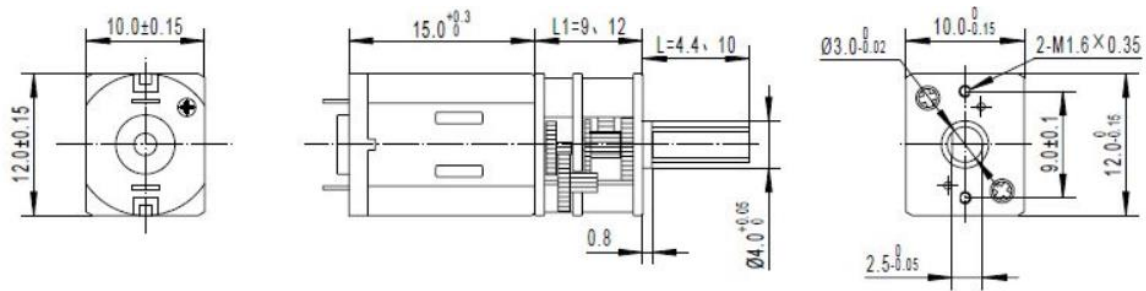


Figura 49. Dimensiones (mm) del motor N20 con caja reductora lineal.



Figura 50. Motor N20 con caja reductora angular acoplada a la lineal.

Dado que el fabricante apenas aporta información acerca del motor, es necesario ensayarlo para estudiar su corriente máxima y así poder dimensionar el aparellaje necesario. Tras conectar el motor y la caja reductora a una fuente de alimentación regulable, se somete el motor a una resistencia mecánica regulable, observando que el amperaje alcanza un valor de 0.54 A en la situación de rotor parado.

Dicho sistema de alimentación se acoplará a la parte superior de la herramienta, ya que desde el punto de vista ergonómico será más cómodo si la mayor masa de la herramienta está distribuida en su parte inferior. En nuestro caso, la mayor masa del sistema será la del motor principal. En la parte superior se implementarán dos motores de forma que el conjunto sea simétrico.

En cuanto al rechazo de material se podría pensar que es mayor si el sistema de alimentación se sitúa en la parte superior de la herramienta, pero se tiene en cuenta que, tras consumir el material de alimentación, el siguiente empujará al previo.

❖ Regulador de voltaje

Para evitar duplicado de fuentes de tensión, se reducirá la tensión de la fuente principal (24 V) a los 6V que requiere el motor de alimentación.

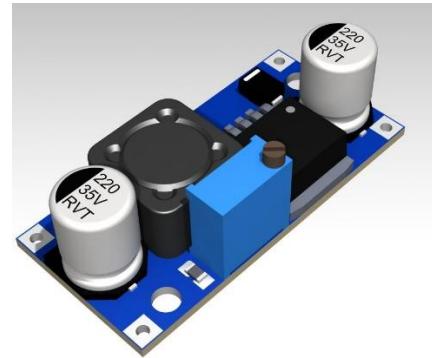


Figura 51. Modelo 3D regulador LM2596S.

Se usará un regulador de tensión basado en el LM2596S que se muestra en la Figura 52 que es capaz de suministrar hasta 3 A, como se muestra en el datasheet, Figura 53.

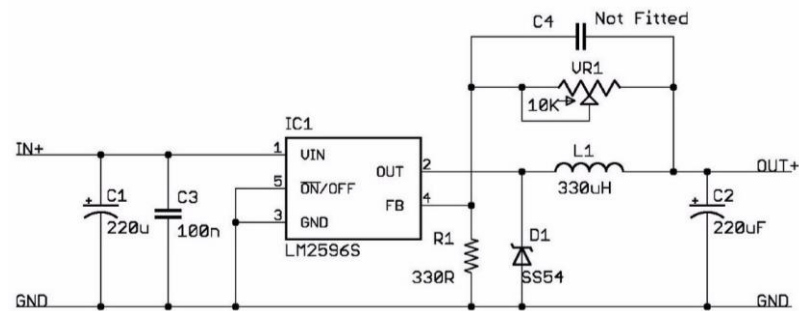
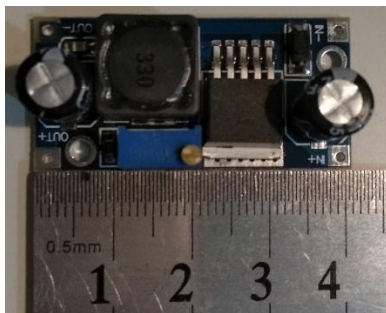


Figura 52. Regulador de tensión basado en el LM2596S. Como se muestra posee dos entradas y dos salidas, además de un potenciómetro para la regulación de la tensión.

Model / Name	LM2596S DC-DC step-down module
Input voltage	3.2V to 40V
Output voltage	1.25V to 35V
Output current	3A (max)
Conversion efficiency	92% (the highest)
Output ripple	<30mV
Switching frequency	65KHz
Operating Temperature	-45 to +85
Size size	43mm * 21mm * 14mm (L * W * H)

Figura 53. Especificaciones regulador de tensión LM596S.

❖ Regulador de velocidad

Como se ha mencionado anteriormente el usuario debe de ser capaz de controlar la velocidad de impulsión de material, es por ello que se implementa un regulador de velocidad de iguales características al usado para el motor principal ya que simplificará

el prototipo y cumplirá la función. Además, como se verá en los apartados Fase de diseño y Fabricación de Componentes, ambos reguladores irán fuera de la herramienta manual, por lo que el tamaño no es un parámetro relevante.

c. Escobillas

Dado que todo el conjunto debe rotar, la alimentación del motor de impulsión se realizará mediante escobillas.

Para seleccionar las escobillas se hará dimensionado del tamaño mínimo de estas, teniendo en cuenta que el material que se emplean para la fabricación de estas son grafitos de distintos grados [74].

Para el cálculo de la sección de las escobillas se tiene en cuenta la siguientes expresiones suministradas por el fabricante Morgan AM&T [74]:

$$D = I / (\frac{1}{2} N \times W \times T) \text{ * for commutator machines}$$

$$D = I / (N \times W \times T) \text{ * for slip rings}$$

D = brush current density in amps/in²
(amps/cm²)

I = total current in amps*
*Armature amps for commutator machines
*Rotor or secondary amps for slip ring machines

N = total number of brushes on a commutator
or the number of brushes on an individual ring

W = width of the brush in inches (cm)

T = thickness of the brush in inches (cm)

Figura 54. Expresión dimensionado escobillas [74].

En la tabla suministrada [74] de guía de los materiales más comunes con los que están fabricadas las escobillas, se ve que para un uso misceláneo, en pequeños motores de rotor bobinado, se puede usar electrografito, grafito o grafito-metal. En el caso más desfavorable se considera una densidad de corriente de 10 A/cm².

Teniendo en cuenta que se tiene una escobilla por polo, y el consumo de cada motor es de 0.54 A se puede calcular el área de contacto de la escobilla W*T, es decir,

$$D = \frac{I}{N \cdot W \cdot T} \rightarrow 10 \frac{A}{cm^2} = \frac{2 \cdot 0.54 A}{1 \cdot W \cdot T} \rightarrow W \cdot T = 0.108 cm^2 = 10,8 mm^2$$

Dado que no existen escobillas con dicha superficie, se considerará la inmediatamente superior en superficie.



Figura 55. Escobilla multi-herramienta (Dremel 300®).

Las escobillas que mejor se adecuan a nuestra necesidad son las implementadas en los sistemas multi-herramientas eléctricas. Las dimensiones de estas (Figura 55) son de 6.5x7.5x13.5mm, es decir, el área de contacto proyectada es de 48.75mm², valor muy superior a los 10.8 mm² necesarios.

En cuanto a la distancia que se situará el resorte de la escobilla se tiene en cuenta que el desgaste de la escobilla es causado por contacto mecánico y eléctrico [75]. Dicha cuestión no presentará problema ya que la sollicitación eléctrica de la escobilla está muy por debajo de su capacidad. En cuanto a la mitigación del desgaste mecánico se dispondrá la escobilla a la misma distancia en la que se encuentra en el dispositivo original (Dremel®) además de realizar un pulido a los anillos rozantes con los que estará en contacto.

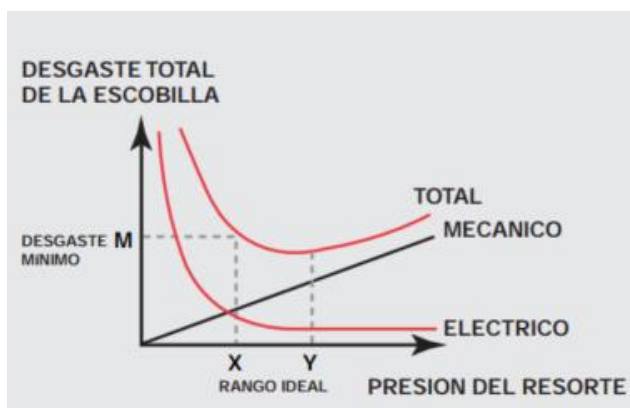


Figura 56. Desgaste escobillas [75].

La presión del resorte, también estará relacionado con la caída de tensión en las escobillas, para el caso de una escobilla de electrografito ($10 A/cm^2$), con una velocidad de 30 m/s y presión entre 15 a 55 kPa puede llegar a un 30% de la tensión de entrada [76]. Ello será necesario tenerlo en cuenta para regular la fuente de tensión que alimenta el motor de impulsión.

d. Anillos rozantes

Para el cálculo de los anillos rozantes se tiene en cuenta el diámetro de este, con objeto de no sobrepasar la velocidad lineal a la que se somete la escobilla.

La velocidad lineal máxima para conmutadores es de 30 m/s pero en la práctica no se debe superar los 15m/s [77]. La velocidad en la periferia vendrá dada por $v_c = \omega \cdot \frac{D}{2}$, donde la velocidad angular será la máxima admisible por el motor de 6000 rpm = 628.319 rad/s, si el diámetro de los anillos es de 35mm se tendrá una velocidad lineal de 11 m/s, que será inferior a los 15 m/s recomendados.

En una primera versión se intentó aprovechar los conectores de delgas de las multi-herramientas para ello se testearon varios de ellos, pero presentaba la problemática del alineamiento, peso y espacio. Por ello finalmente se optó por los anillos extraídos de un tubo de cobre de diámetro interior 33 mm y exterior 35 mm. Es decir, se ha empleado aproximadamente 25 mm de tubo para la fabricación de estas, teniendo en cuenta el rechazo y que la altura de cada anillo es de 11 mm.



Figura 57. (Izquierda) Colectores de delgas de multi-herramientas (opción rechazada). (Derecha) Solución final adoptada, anillos rozantes cortados a partir de tubo de cobre de diámetro interior 33 mm.

e. Rodamientos

Los rodamientos seleccionados, por sus dimensiones son: de 6x9x3 mm para el sistema de guiado, usándose tres unidades en este. Mientras que para la polea de contra apoyo de filamento se han necesitado 4 unidades de 2x4x2 mm.



Figura 58. (Izquierda) rodamientos usados en el contra apoyo.
(Derecha) rodamientos usados en sistema de guiado.

f. Tórica

Para separar los anillos rozantes y prevenir el contacto entre ellos se usa una junta tórica de dimensiones 30x1 mm.



Figura 59. Tórica 30x1 mm

g. Otros

i. Conectores

Los conectores a usar serán para el motor principal y el motor de impulsión de filamento, para el primer caso deberá de soportar un amperaje mayor a 3.5 A y para el segundo caso un amperaje mayor a 0.54 A.

Además, de cara a tener un sistema poka-yoke se seleccionará un conector de 4 pines usado en la industria aeronáutica como el que se muestra en la Figura 60.



Figura 60. Conector GX12 de 4 pines.

i. Tubos

PTFE

Se usarán tubos de teflón (PTFE) para guiar el filamento hasta que este sea expulsado. La selección de este material es causada por su bajo coeficiente de fricción, así como alta dureza y resistencia a la temperatura. Se usará en dos diámetros, internos diferentes, de cara a poder realizar el proceso con filamento de 1.75 mm y 3 mm. Es decir, se necesitará tubo de 2 x 4 mm y 3 x 4 mm con una longitud aproximada de 13 cm



Figura 61. Tubo de teflón (PTFE).

Aluminio

Para la guía del filamento se usará tubo de aluminio de 4*6mm en el cual en el interior se introducirá a presión un tubo de teflón de cara a disminuir la resistencia de impulsión.

h. Cableado

Se usará diverso cableado para realizar el conexionado de los elementos, la sección no es un parámetro determinante ya que no se tienen grandes consumos (sección 0.5 mm²). En el elemento móvil se

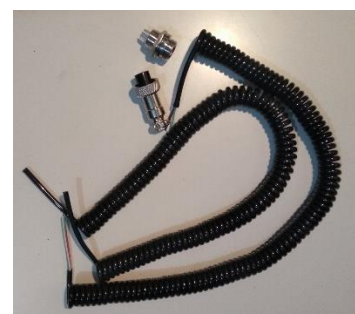


Figura 62. Cable en espiral extraído de dispositivos de conexión a toma de 12V USB en vehículos y conector GX12 de 4 pines.

usará una sección menor (0.25 mm^2) de cara a reducir desequilibrios y ocupar un menor espacio. Para conectar el dispositivo de regulación con la herramienta principal se usará cable en espiral extraído de dispositivos de conexión a toma de 12V de vehículos (Figura 62).

i. Interruptores-pulsadores

Para el funcionamiento de la herramienta se implementará un interruptor fijo de balancín en la caja auxiliar de alimentación de la herramienta (Figura 63a).

Para controlar la velocidad de impulsión del filamento se regulará en los potenciómetros de los reguladores, situados en la caja auxiliar de alimentación (Figura 48).

Para su correcto funcionamiento no se implementará interruptor que controle el giro principal en la

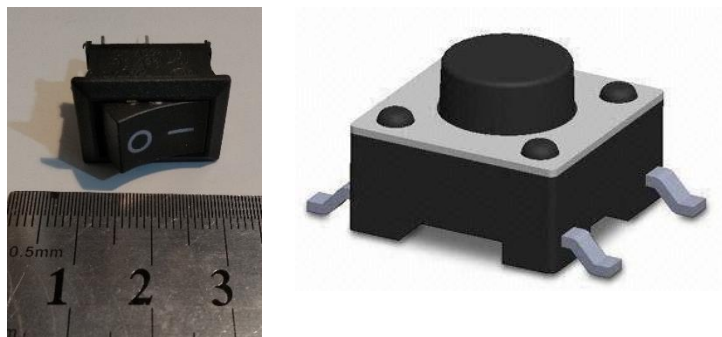


Figura 63. (Izquierda) Interruptor de balancín principal. (Derecha) Pulsador SMD (6x6x2.5mm).

propia herramienta (este irá situado en la caja auxiliar) pero si se implementará dos pulsadores que activen o no la impulsión de filamento. Se usarán dos pulsadores SMD como el mostrado en Figura 63b dado que el espacio para su alojamiento es muy reducido.

De esta forma, la forma de proceder será: el operario activará el giro de la herramienta principal, lo ajustará con el dial correspondiente, regulará el motor de impulsión con su correspondiente dial pero no se activará hasta que no se presione uno de los dos pulsadores situados en la parte inferior de la herramienta.

j. Voltímetros LCD

Para conocer las condiciones de trabajo del prototipo y que se pueda tener un control de la velocidad de soldeo, mejorando su repetitividad, se implementa dos voltímetros digitales. Uno para el giro principal y otro para el giro secundario. Irán conectados a la salida de los reguladores PWM en paralelo pasando previamente por los conectores magnéticos. El rango de los dichos está comprendido entre 4.5 y 30 Voltios. La resolución es de 0.01V por debajo de 10 V y 0.1 V por encima de 10 V.



Figura 64. Voltímetro digital empleado.

k. Conectores magnéticos

En el acople y conexión de la caja superior que implementa los voltímetros, se usan conectores magnéticos, de forma que se produzca la conexión eléctrica por el propio imán. Dado que no se encuentra en el mercado con facilidad se fabricarán (más detalles en Figura 103), para ello se necesitarán imanes de dimensiones 4x2 mm y arandelas de nylon de dimensiones 4x8x1 mm. Para cada realizar cada borna de conexión se apilarán dos imanes y 3 arandelas, quedando el cable en la zona central para posteriormente pegarlos con cinoacrilato. El proceso de unión anterior se realiza de tal forma ya que no es posible realizar soldadura blanda puesto que la temperatura de desmagnetización de los imanes de Neodimio es de 80°C [78].

l. Ventilación

La caja reguladora dispondrá de un ventilador para favorecer la refrigeración del sistema. Se usará un ventilador de dimensiones 30x30mm conectado al regulador LM2596S que suministrará los 12V con los cuales trabaja el dicho.

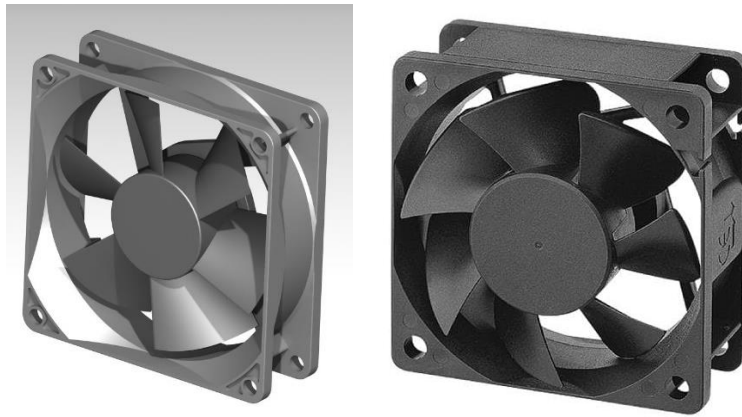


Figura 65. Ventilador 30x30 (Izquierda) modelo CAD. (Derecha) real.

m. Pasa cables

Se usarán como protección de cables. Uno para la caja reguladora, y otro para la herramienta principal. El primero tendrá un diámetro interno de 13 mm mientras que el segundo de 7 mm.

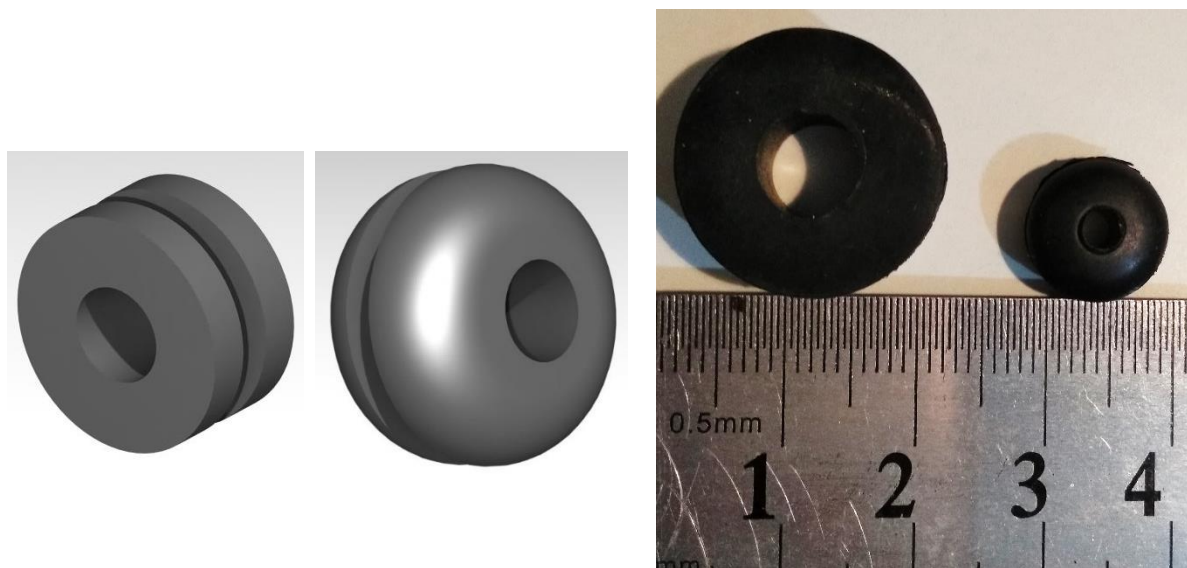


Figura 66. Pasa cables modelados. (Izquierda y centro): en herramienta principal. (Derecha): pasa cables reales.

11. Fase de diseño

En este punto se mencionan diversas consideraciones que se han tenido en cuenta para el diseño de la máquina herramienta. Como se sabe la fase de diseño no se encuentra aislada del resto de etapas, ya que esta intrínsecamente unida a las fases de cálculo, siendo un proceso realimentado durante su desarrollo.

Las especificaciones y requerimientos que se han tenido en cuenta a la hora de diseñar la máquina-herramienta han sido:

- Bajo coste, precio resultante final este adaptado al nicho de mercado Maker (<100€)
- Sencillez de uso, orientado a operario con reducida cualificación.
- Ligereza y compatibilidad con red AC de 220V
- Cabezal adaptado para el acople de un hombro estacionario como accesorio
- Reducido mantenimiento
- Adaptable a filamentos de 1.75 y 3 mm.
- Velocidad de rotación y alimentación controlada por el operario
- Se ha considerado la disposición que se mostrará como consecuencia de establecer las siguientes prioridades.
- Reducción al mínimo el rechazo de material de aporte.
- Optimización del espacio.
- Orientado a la fabricación mediante AM o moldeo

La estética no es un punto menos importante que los anteriores, pero no se ha incluido como prioridad en los anteriores puntos ya que con el primer prototipo no se busca una comercialización masiva del producto, sino el testeado del sistema propuesto y de la unión soldada. Es decir, esa pretensión sería a aplicar en las fases más avanzadas del proyecto, en la que unida a elementos de marketing se pudiera comercializar el producto con la metodología.

A continuación, se muestran por componentes las características del modelo, encontrando además en el Anexo Planos los detalles geométricos.

Componentes

❖ Carcaza principal

Se trata de buscar un diseño funcional, lo más ergonómico posible, así como una mejor estética. Debe alojar el motor, así como los elementos para la impulsión del filamento.

El primer diseño realizado todo el conjunto se introducía por la parte superior, teniendo problemáticas de alineamiento y tolerancias. Por ello se pasó a un diseño con una tapa lateral de forma que el conjunto motor y sistema de impulsión se pueda introducir

por el lateral. De forma que antes de cerrar la tapa, se tienen perfectamente colocadas las escobillas y ajustada la posición del motor en eje vertical.

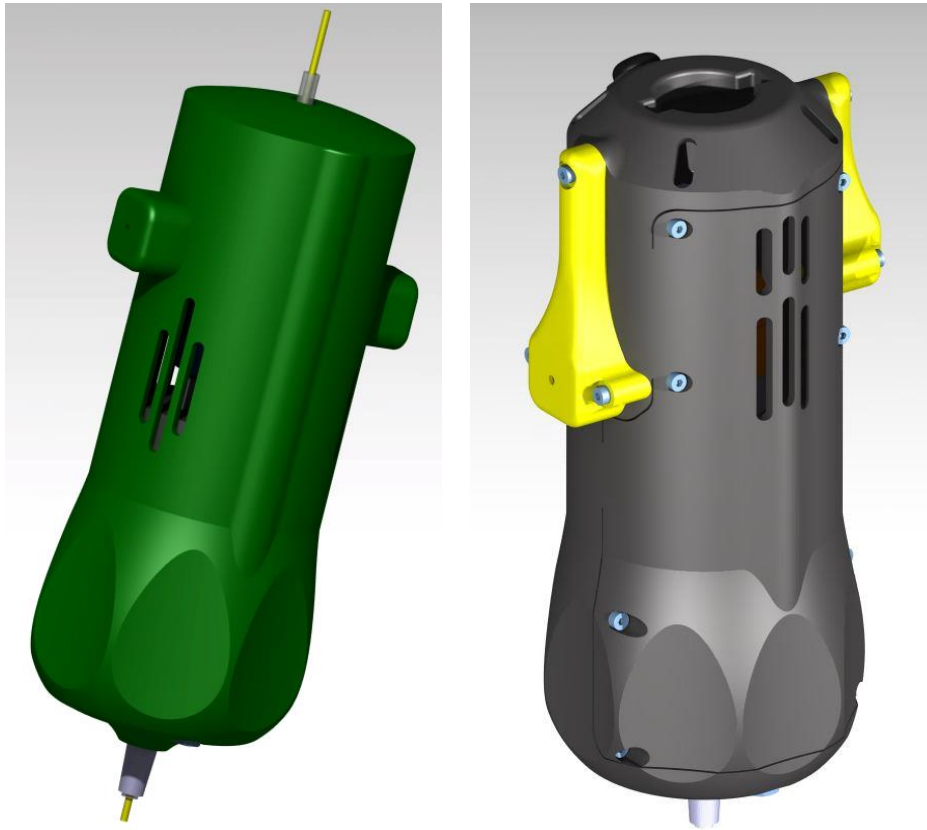


Figura 67. (Izquierda) primera versión realizada. (derecha) última versión.

❖ Tapa

Existía en una primera versión, pero se omitió, ya que hacía excesivamente complejo el alineamiento del conjunto inferior con el sistema de guiado superior. En el diseño propuesto la parte superior de la herramienta forma una sola pieza con el resto de la carcasa principal.

❖ Porta escobillas

Debe servir de alojamiento para las escobillas, por lo que la escobilla debe deslizar en su interior, con una tolerancia que permita el guiado de la escobilla sin demasiados rozamientos. En un primer diseño se ajustó la tolerancia con la carcasa y en la última

versión además de tener una tolerancia ajustada con la carcasa se asegura con tres tornillos M2.

Además, el cable en la primera versión se introducía en la herramienta por el propio alojamiento de la escobilla, mientras que en la última versión el cable se guía hacia la parte superior de la herramienta, mejorando en posibles interferencias con elementos rotatorios.

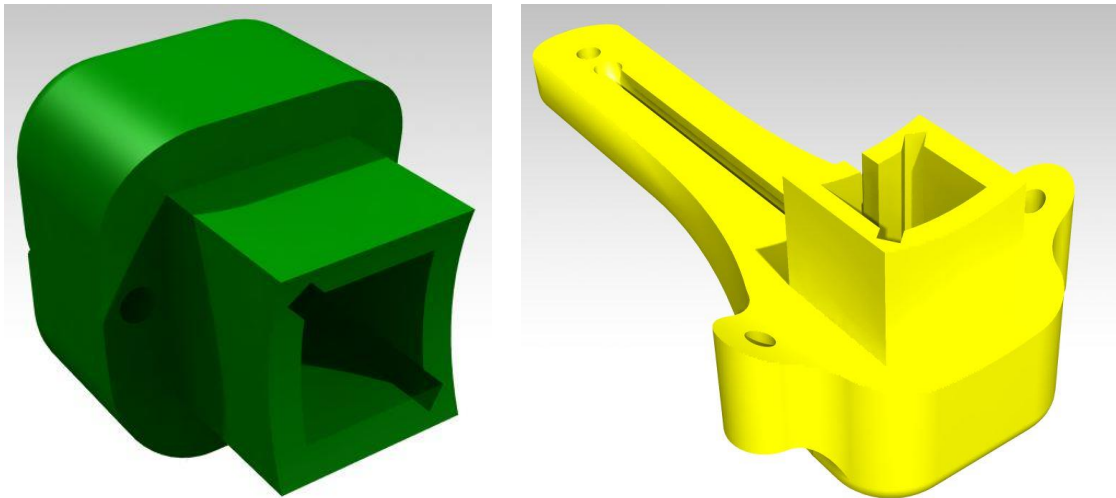


Figura 68. Porta escobillas. (Izquierda) segunda versión. (Derecha) Última versión.

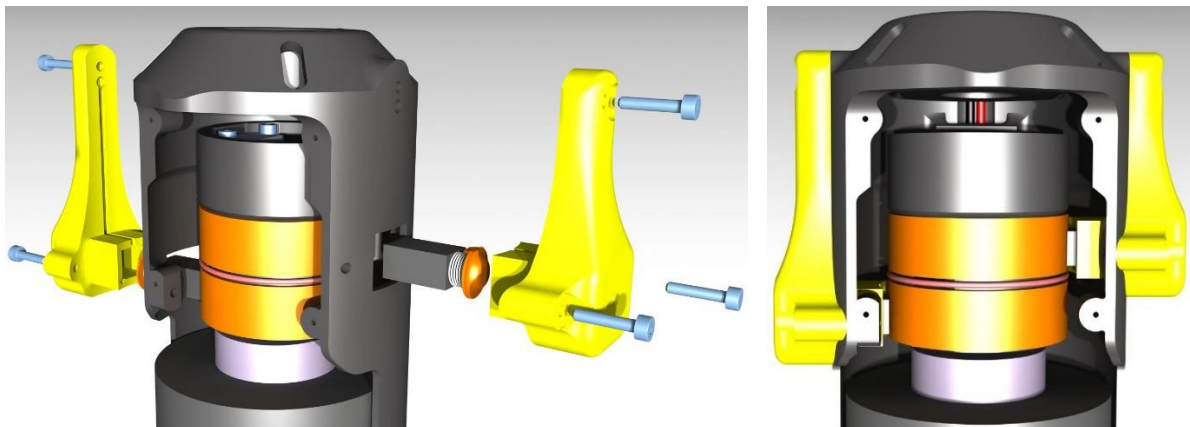


Figura 69. Ensamblaje y posición de porta escobillas.

❖ Rotor de impulsión

En una primera versión debía alojar mecanismo de impulsión, así como los anillos rozantes y las masas para el equilibrado del rotor. Posteriormente se optó por hacerlo

completamente simétrico, reforzando el sistema de alimentación, al implementarle dos motores de impulsión.

El diámetro exterior de 33 mm debe tener la misma cota que el interior de los anillos rozantes, con una muesca para permitir el paso de cable y espesor de la soldadura en el anillo.

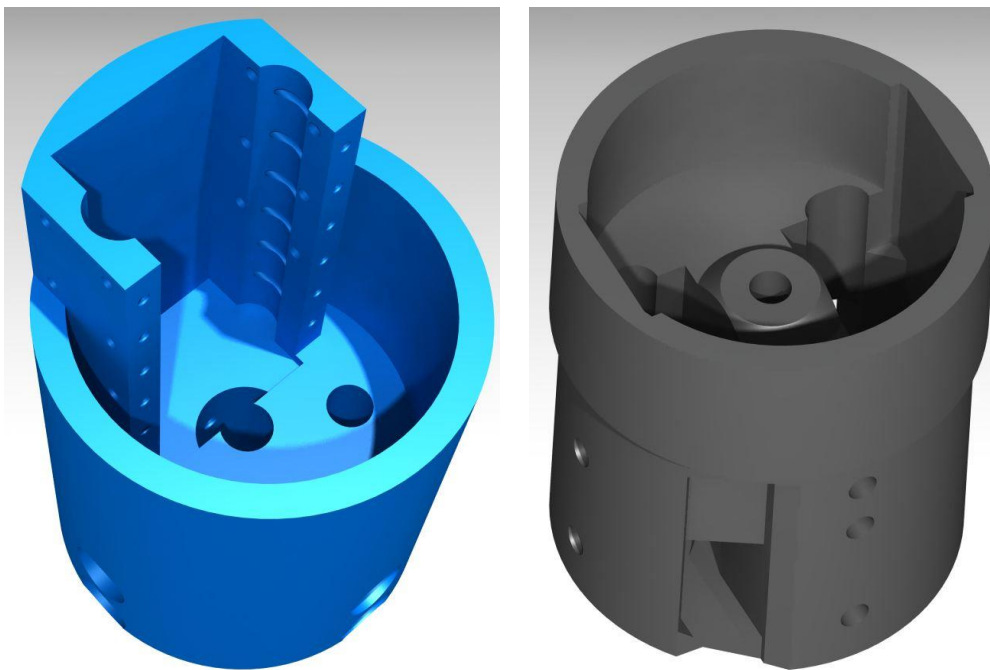


Figura 70. (Izquierda) primera versión del sistema de impulsión con un solo motor y contrapesas regulables para equilibrado basadas en tornillos y arandelas. (derecha) última versión, simétrica, más corta con dos motores para su impulsión.

La vista explosionada del sistema de impulsión se muestra en la Figura 71.

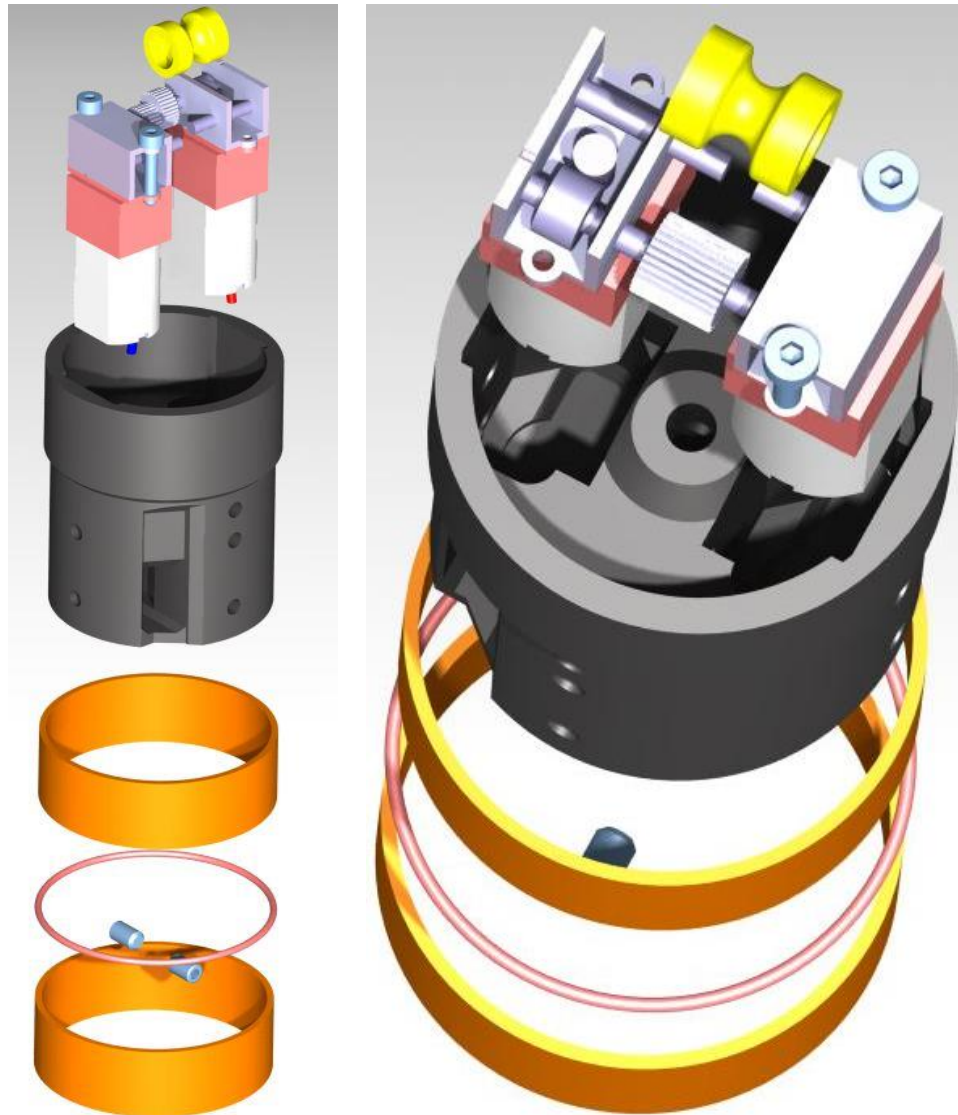


Figura 71. Vista explosionada del conjunto de impulsión final.

❖ Caja reguladora – transformadora

En ella se alojarán los reguladores PWM, así como la fuente de alimentación que pasará de 220 V a los 24 V, un ventilador de 30x30, y un regulador a 12V. De esta manera se tendrá el cable que se conecte a tensión de red y por el otro extremo se conectará a la herramienta.

En una primera versión se realizó con un tamaño más reducido pero que sólo incluía los reguladores PWM quedando fuera el resto de elementos. De cara a la versatilidad, comodidad y transporte todos los elementos anteriores se agruparon.

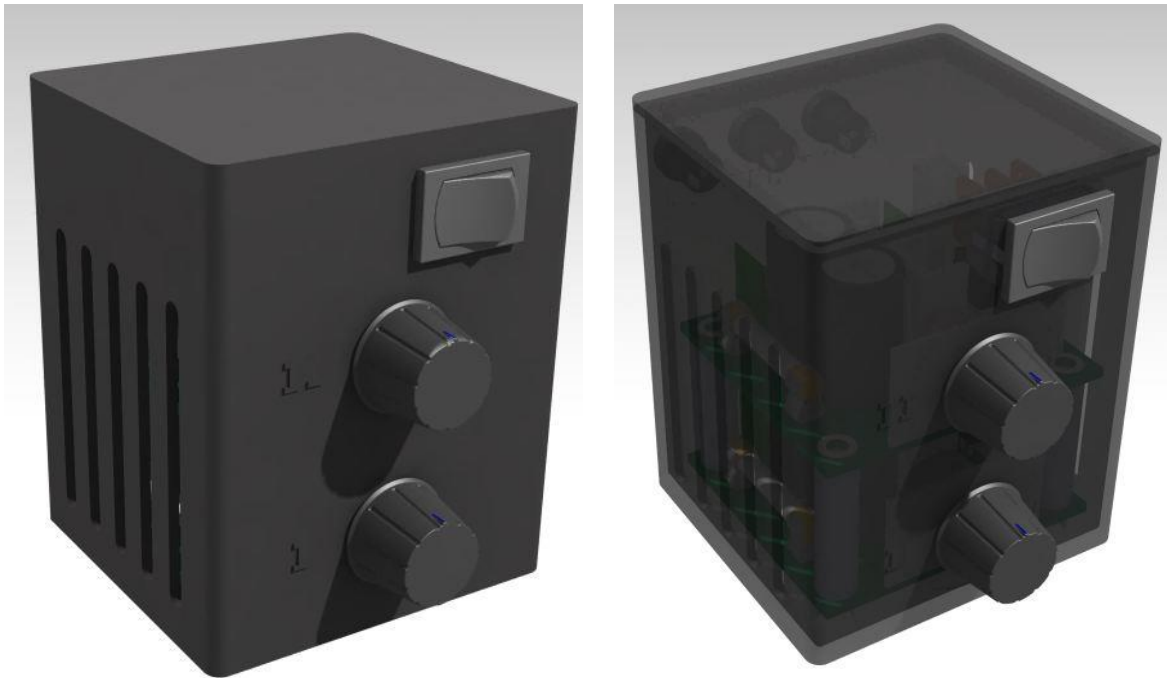


Figura 72. Primera versión de caja reguladora. Tapadera con ajuste a presión, interruptor, dos reguladores PWM y tomas de conexión Jack.



Figura 73. Solución final llevada a cabo para la caja auxiliar. En esta versión además de cumplir la funcionalidad, se ha integrado el transformador para minimizar el número de componentes visibles.

❖ Caja voltímetro

En la parte superior de la caja reguladora principal se implementará la caja que contenga los dos voltímetros y una parte de los conectores magnéticos. El voltímetro

superior se define para el giro (spin) mientras que el inferior para la alimentación (feed).



Figura 74. Alojamiento para los dos voltímetros y 4 conectores magnéticos.

❖ Guía de filamento

Se anclará a la tapa superior, y servirá como guía de filamento para que el giro se realice de forma estable. El sistema de unión implementado será un acople rápido de media vuelta.

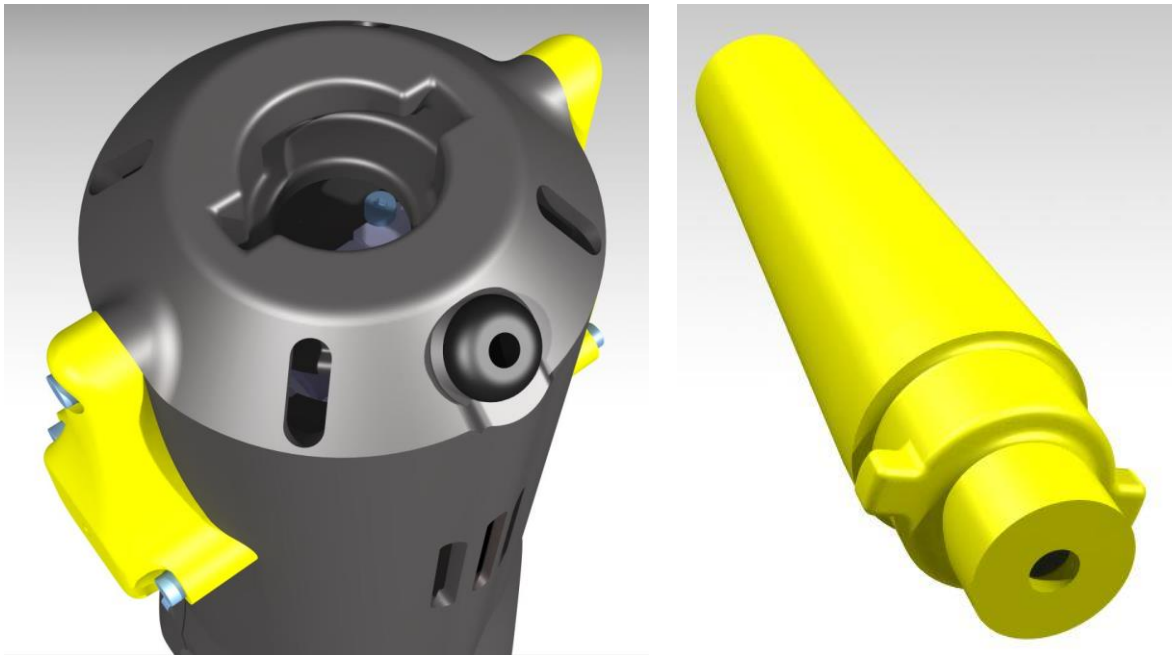


Figura 75. Sistema de acople rápido de media vuelta para el sistema de guiado de filamento.

❖ Contra apoyo filamento

En una primera versión, en la que solo se tenía un motor y un eje, la adaptación a filamento de 1.75 era complicada, ya que la polea debía de tener un diámetro de 4 mm, lo que no daba lugar a usar un rodamiento. Se vio como solución acertada usar un contra apoyo metálico fijo adecuándose a nuestras dimensiones una clavija Jack de auriculares de diámetro 3.75mm. En una segunda versión en la que ya se tenía doble motor se optó por construir un contra apoyo de PTFE que si permitiera el giro. Como versión final mejorando en fiabilidad a las anteriores es la construcción de un contra apoyo que implemente dos rodamientos de 2x5 mm



Figura 76. Versión inicial del contra apoyo de filamento, (izquierda) construcción. (Derecha) testeo en filamento de 3 mm.

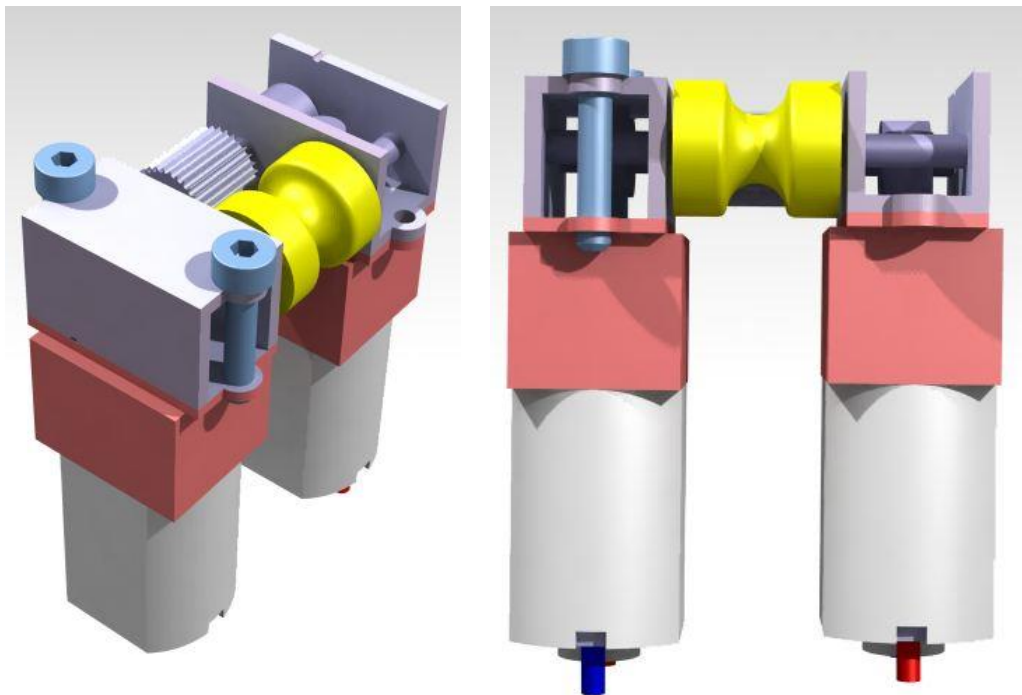


Figura 77. Segunda versión del contra apoyo. Construida con tubo de teflón de 2*4 en el centro y 4*6 en los extremos.

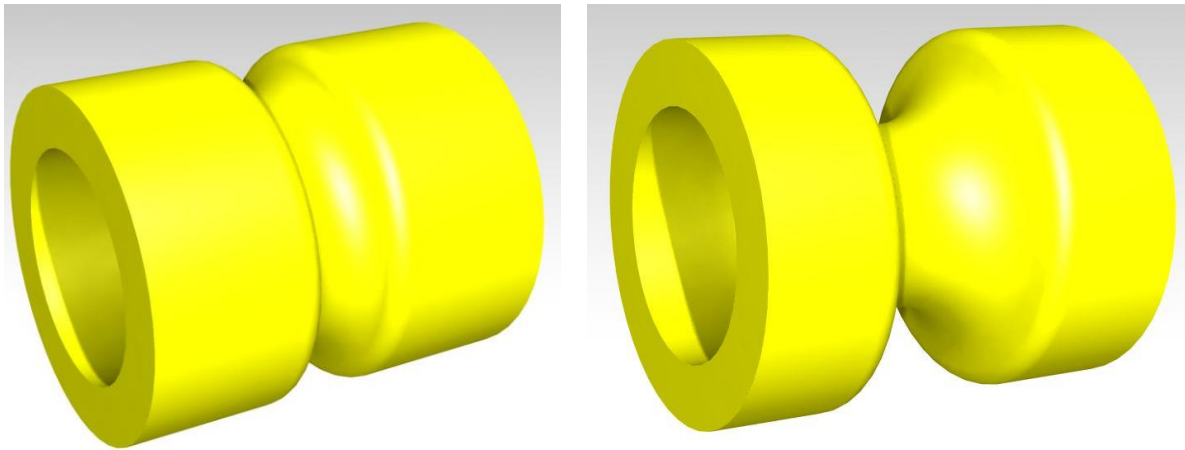


Figura 78. Contra apoyo para filamento de 1.75 (izquierda) y 3mm (derecha) con alojamiento para rodamientos de 2x4x2 en sus extremos.

❖ Maletín transporte

Se diseñará de la misma forma que se hacen los moldes, apoyándonos en operaciones booleanas se hará la huella. Se alojarán los tres elementos principales anteriores, la herramienta, el accesorio de guiado y la caja reguladora. Además, de cara a que el usuario pueda cambiar el diámetro de filamento se incorpora un destornillador y las llaves Allen necesarias. Los elementos necesarios para su construcción es 2 tornillos M3x20 y 2 tuercas M3 además de un cierre con clipaje por resorte regulable en resistencia usado convencionalmente en la industria del mueble.



Figura 79. Llaves Allen usadas en el cambio de diámetro filamento.

Las bisagras también serán fabricadas mediante prototipado rápido, teniendo como pasador un eje de acero de 1mm de diámetro.

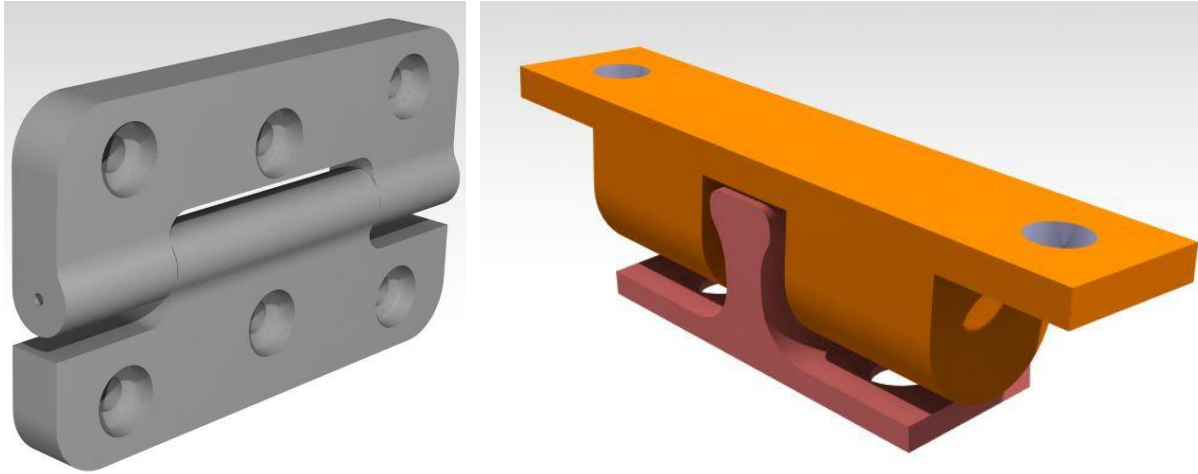


Figura 80. (Izquierda) Modelo Bisagra, pasador de diámetro 1 mm. (Derecha) Modelo del cierre.





Figura 81. Maletín de transporte del conjunto.

12. Fase de fabricación de componentes - prototipo

Una vez realizado el paso anterior de diseño se procede al procesado de los componentes que deben de ser fabricados. La mayor parte de componentes plásticos se fabricarán mediante prototipado rápido mientras que los componentes metálicos o polímeros elásticos, serán fabricados mediante otras técnicas.

En el primer caso se hará uso de la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling). Se considera apropiada dicha tecnología ya que aportará suficiente resistencia mecánica con un reducido costo.

Impresión 3D

De forma resumida los componentes fabricados mediante FDM de izquierda a derecha en sus distintas versiones han sido:

- ❖ Herramienta principal



Figura 82. Carcaza principal.



Figura 83. Rotor de impulsión.



Figura 84. Porta escobillas.



Figura 85. Contra apoyos de filamento.

❖ Accesorios



Figura 86. Caja transformadora-reguladora.





Figura 87. Separadores PCB roscados.



Figura 88. Rejilla.



Figura 89. Soporte voltímetros.



Figura 90. Guiado de filamento.

Corte láser CNC

Tanto el embellecedor para los pulsadores en la herramienta principal como el logo de la caja exterior se ha cortado con láser. El material usado para el dicho por su tacto y facilidad de corte es Etilvinilacetato, conocido como goma EVA o Foamy. El láser de fabricación propia con controlador GRBL de código abierto, con microprocesador integrado en Arduino Micro. En la Figura 91 se muestra la máquina herramienta usada. La potencia del láser es de 500 mW con un avance de 0.5 mm/s y una herramienta que se asimila a una fresa cuyas características aparecen en la Figura 92 izquierda.

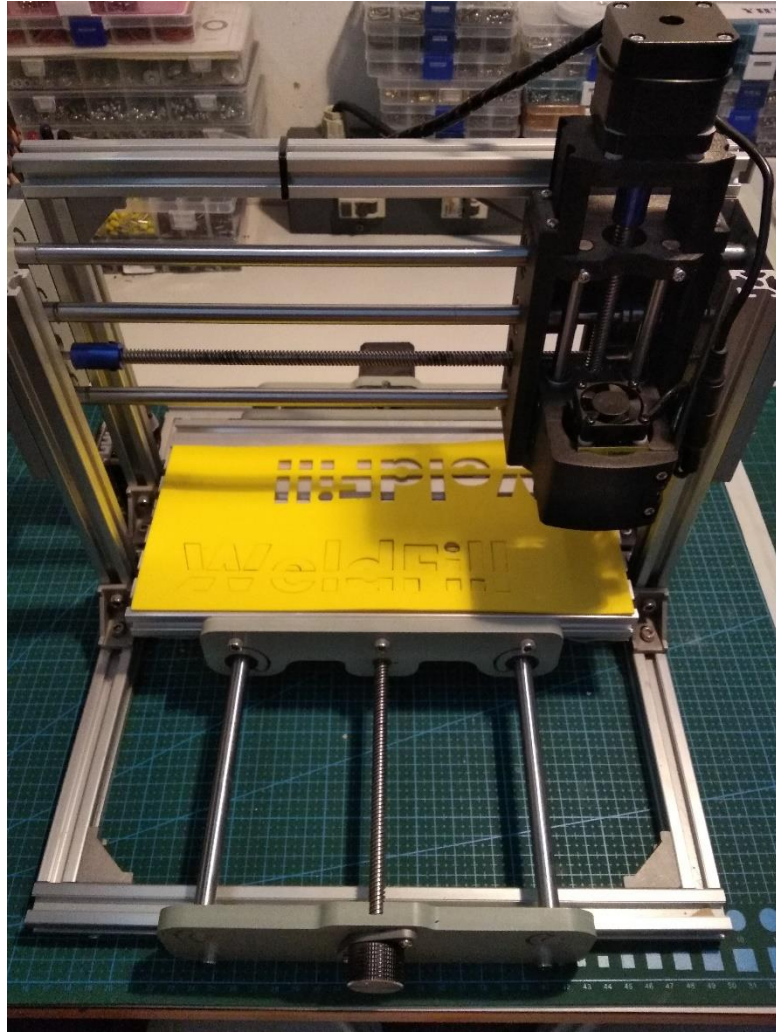


Figura 91. Fresadora – láser CNC usado para corte de goma EVA (etilvinilacetato) para logo y embellecedor.

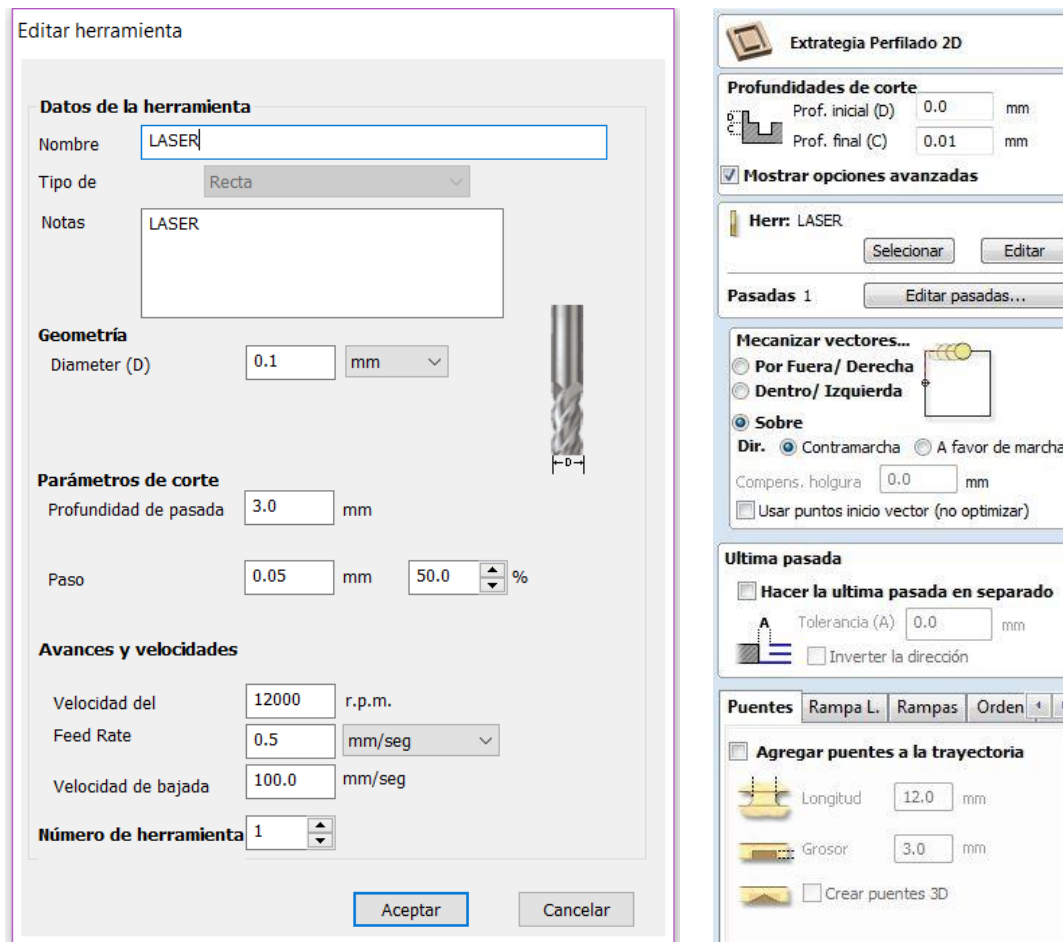


Figura 92. (Izquierda) Configuración de la herramienta láser que se asimila a fresa. (Derecha) Configuración principal perfilado.

Las trayectorias son generadas con el software Aspire® [79] cuya geometría es importada en *.dxf. Una vez generado el Gcode debe de ser editado, para eliminar los movimientos en Z de la herramienta, tanto de aproximación como de penetración. Además de debe tener en cuenta que el código (Figura 94) generado para el fresado activa el movimiento de giro tan pronto como comienza la ejecución del programa, no debiendo de ser así cuando se trata de corte por láser.

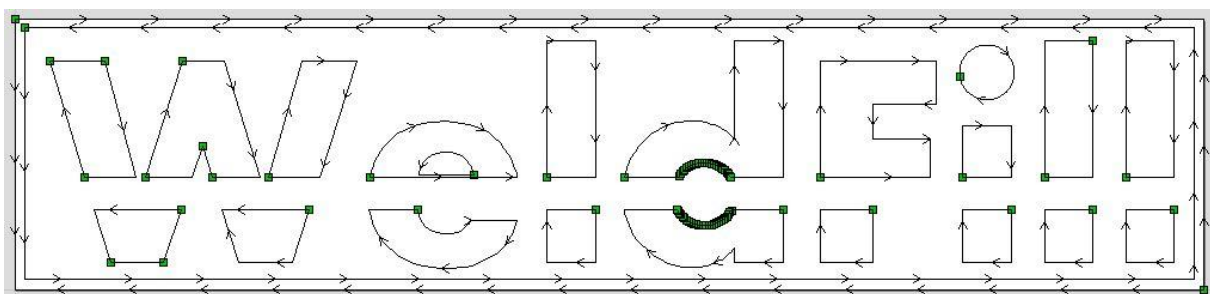


Figura 93. Trayectorias generadas para el corte del logo.

T1 G17 G21 G90 G0Z20.0000 G0X0.0000Y0.0000S1200M3 G0X15.8957Y4.4354Z6.0000 G1Z-0.0100F60000.0 G1X13.2527Y13.2995F30.0 G0Z6.0000 G0X11.6376Y18.7165 G1Z-0.0100F60000.0 G1X20.2007F30.0 G0Z6.0000 G0X11.6376 G1Z-0.0100F60000.0 G1X5.8773Y38.0354F30.0 G0Z6.0000	T1 G17 G21 G90 G0X0.0000Y0.0000 G0X15.8957Y4.4354S1200M5 G1M3F60000.0 G1X13.2527Y13.2995F30.0 G0M5 G0X11.6376Y18.7165 G1M3F60000.0 G1X20.2007F30.0 G0M5 G0X11.6376 G1M3F60000.0 G1X5.8773Y38.0354F30.0 G0M5
Figura 94. (Izquierda) Encabezado código G generado para fresado. (Derecha) Encabezado código G modificado para Láser.	

Técnicas manuales

Todo el proceso de fabricación lleva asociado técnicas manuales de taller pues se trata de un proceso no automatizado, pero se destacarán los puntos más interesantes.

❖ Herramienta principal

Los anillos rozantes han sido fabricados con un tubo de cobre de diámetro 35 mm el cual ha sido cortado con una altura de 11 mm para posteriormente ser lijado, pulido y limpiado. Tras ello, por la parte interior se ha soldado el cable que alimentará el motor de impulsión. El soldador usado ha sido un Velleman VTSS5U [80] con una potencia regulable de hasta 50W.



Figura 95. Proceso de soldeo de anillos rozantes.

Por otro lado, de cara a tener un producto que se asimile en mayor medida el producto que pudiéramos obtener mediante técnicas de moldeo, se usan técnicas manuales de lijado, enmasillado y pintado. A continuación, se muestran algunas imágenes tomadas durante el proceso.



Figura 96. Proceso de lijado con distintos granos.



Figura 97. Proceso de enmasillado. La masilla empleada para polímeros es aplicada mediante espátula [81].



Figura 98. Proceso de pintado.

Otras tareas realizadas teniendo en cuenta el diseño realizado es el ajuste de tolerancias, por ejemplo, el realizado en el ajuste del tubo de teflón en el interior del tubo de aluminio en el sistema de guiado. Teniendo en cuenta que la tolerancia del interior del tubo de aluminio es muy alta resultaba complicado realizar la inserción del tubo de teflón dentro del tubo de aluminio. Por ello se vio la necesidad de reducir el diámetro del tubo de teflón mediante lijado, e insertarlo ejerciendo una fuerza de tracción, ya que de compresión hacía que el diámetro de este aumentase haciendo imposible su inserción.



Figura 99. Proceso de inserción que somete el tubo de teflón a compresión. Basado en varilla roscada M3 y ser apretada por uno de los extremos. Resultó insatisfactorio.



Figura 100. Proceso de inserción final de tubo de teflón en el interior de tubo de aluminio. Se realizó un acople provisional del primero a alambre para ser traccionado e introducido con lubricación.

Otra tolerancia a ajustar es la del exterior del tubo de aluminio, en el caso del tubo de 20 cm no se tuvo problemas para ajustarlo al interior del rodamiento de 6x9x3mm pero en el caso del tubo de 10 cm hubo que recurrir también al lijado como se muestra en la Figura 101. Las herramientas utilizadas han sido lija de grano grueso y un taladro Hitachi FDV 16V2 [82].



Figura 101. Lijado exterior tubo de aluminio [82].

El resultado final obtenido se muestra en Figura 102



Figura 102. Tubos para el guiado de filamento.

Para la caja que implementa los voltímetros se realizó también la fabricación de los conectores magnéticos como se muestra en la Figura 103

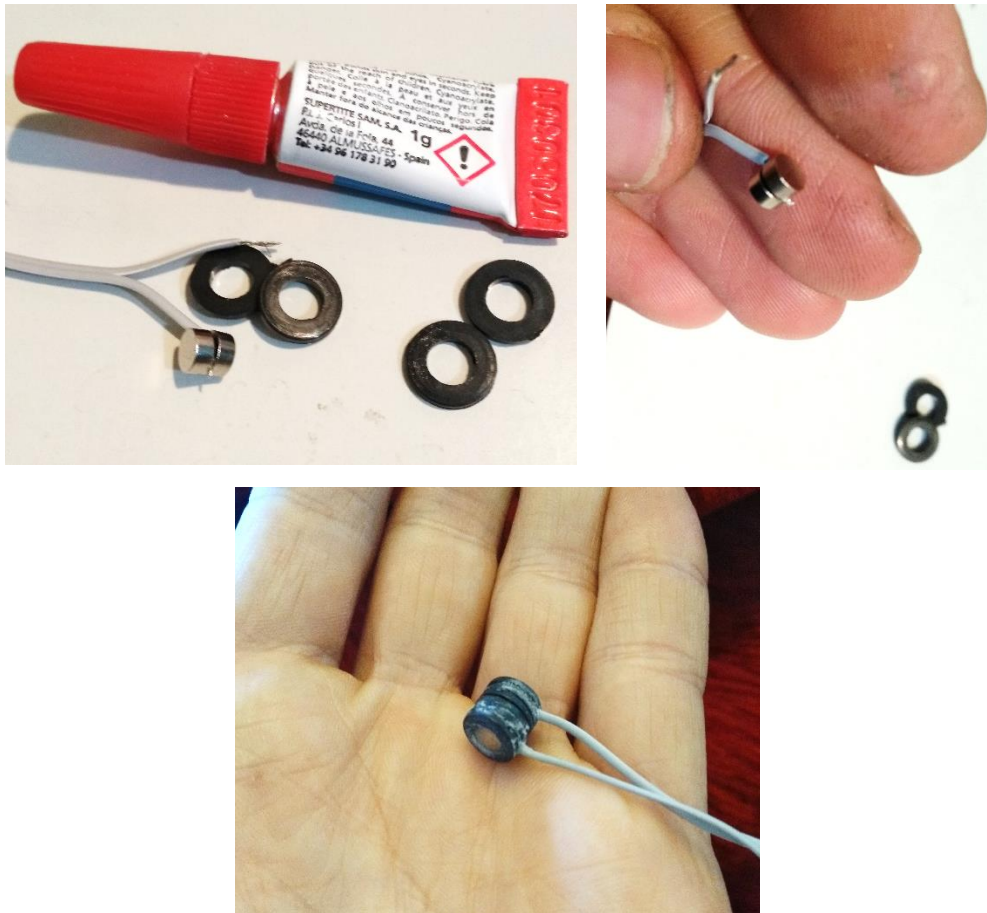


Figura 103. Proceso de construcción de conectores magnéticos y resultado final.

Las varillas roscadas y tubos se han cortado con una amoladora angular, en concreto Bosch profesional GSW 750 [83]



Figura 104. Corte de varilla roscadas en motor [83].

13. Fase de ensamblaje del prototipo

A continuación, se muestran fotografías de mayor interés durante la fase final de construcción del prototipo, la de ensamblaje de todos los componentes. Evidentemente existen un gran número de pasos intermedios, pero se omiten por brevedad.

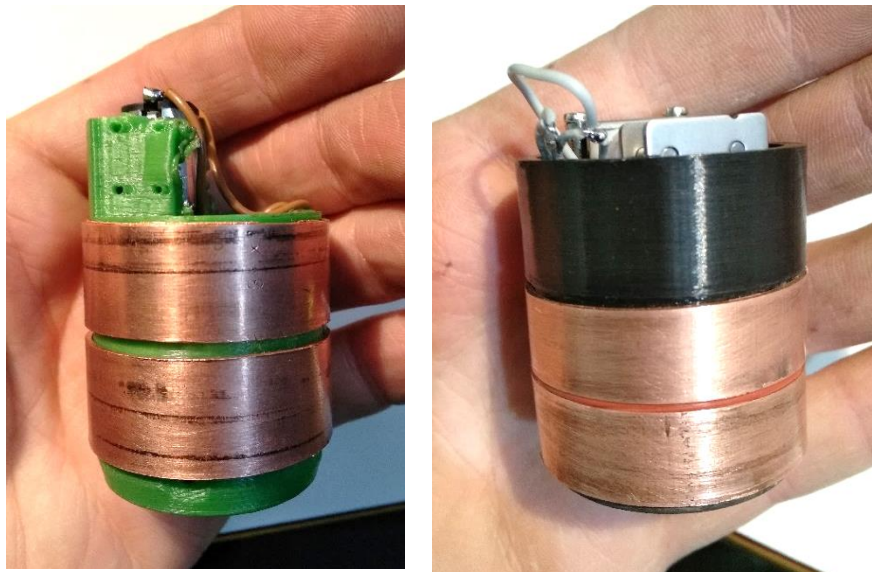


Figura 105. (Izquierda) primera versión del sistema de impulsión con un solo motor y contrapesas regulables para equilibrado basadas en tornillos y arandelas. (Derecha) última versión, rotor simétrico, más corto con dos motores para su impulsión.



Figura 106. Montaje de pulsadores. La función de la cinta americana es solo facilitar el montaje, ya que los pulsadores se apoyarán en el propio motor.



Figura 107. Inserción de cableado para montaje de motor.

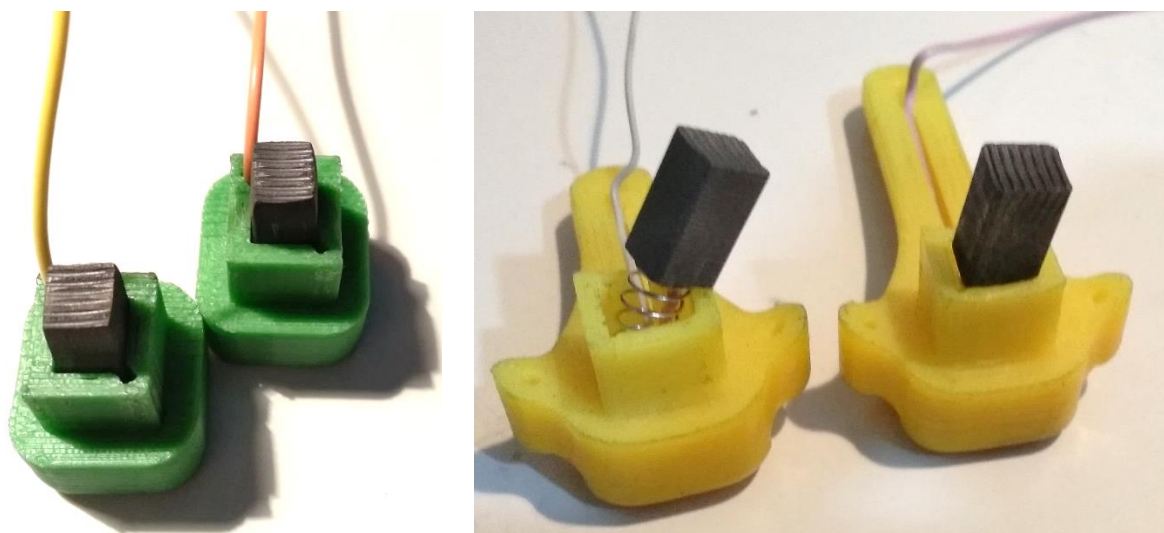


Figura 108. Montaje de escobillas. (Izquierda) primer prototipo. (Derecha) prototipo final.

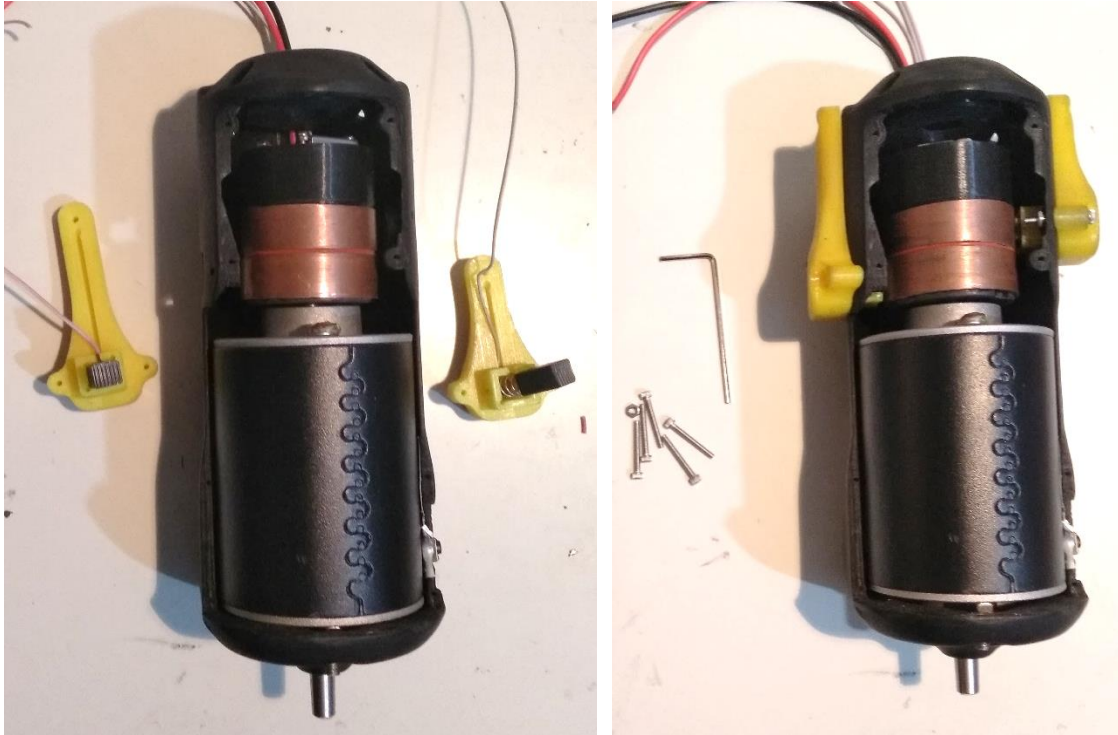


Figura 109. Montaje de escobillas.



Figura 110. Prototipo final.



Figura 111. Prototipo final de maletín de transporte

14. Iteraciones realizadas

Se debe de tener en cuenta las iteraciones realizadas de los puntos anteriores, en las que tras fabricar los componentes se ha corregido u optimizado el diseño. La solución final se considera mucho más robusta que la primera, en cuanto a ajustes y manipulación durante la construcción de la propia herramienta, así como durante su funcionamiento final.

15. Fase de caracterización mecánica

En cuanto a la parte experimental se ensayan probetas normalizadas a tracción, fabricadas mediante FDM, en material PLA [84] negro. La disposición de la soldadura se ensayará cuando esta se sitúa de forma transversal.

Normativa

La normativa a seguir será la correspondiente de la American Welding Society, AWS B4.0:2007 [85] ya que como se justificará, dicha norma está pensada para caracterizar uniones soldadas, en cuanto a que es menos esbelta que la tipo I para materiales poliméricos (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics) detallada en la norma ASTM 638 [86]*. Aunque como se indica en la norma de la American Welding Society B4.0:2007[85] no se especifica propiedades o criterios de aceptación.

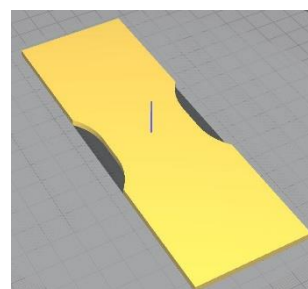


Figura 112. Modelado de probeta B4.0:2007

Es decir, se ha modelado la probeta con las dimensiones indicadas en Figura 114 atendiendo a las consideraciones que se realizan en el pie de foto.

*La elección de esta norma se debe a que no existe normativa específica para materiales fabricados por tecnologías aditivas soldados y que en bibliografía como [87] se recomienda preferentemente el uso de probetas más robustas. En cuanto a que la probeta de la norma ASTM D638 es más robusta, con un radio de acuerdo menor, y un mayor espesor y ancho. Lo cual incrementa la fuerza de rotura, teniendo un abanico de puntos mayor, reduciendo el riesgo de rotura en el radio de acuerdo.

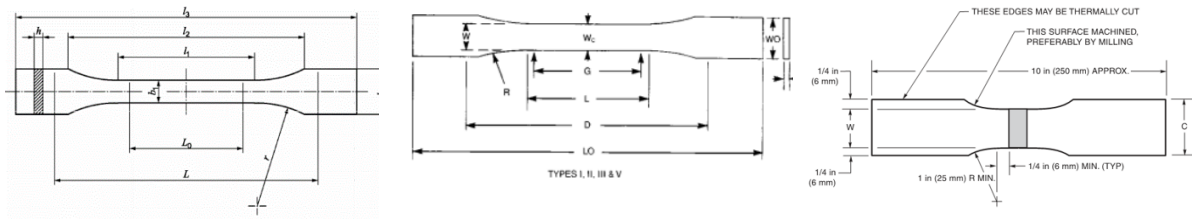
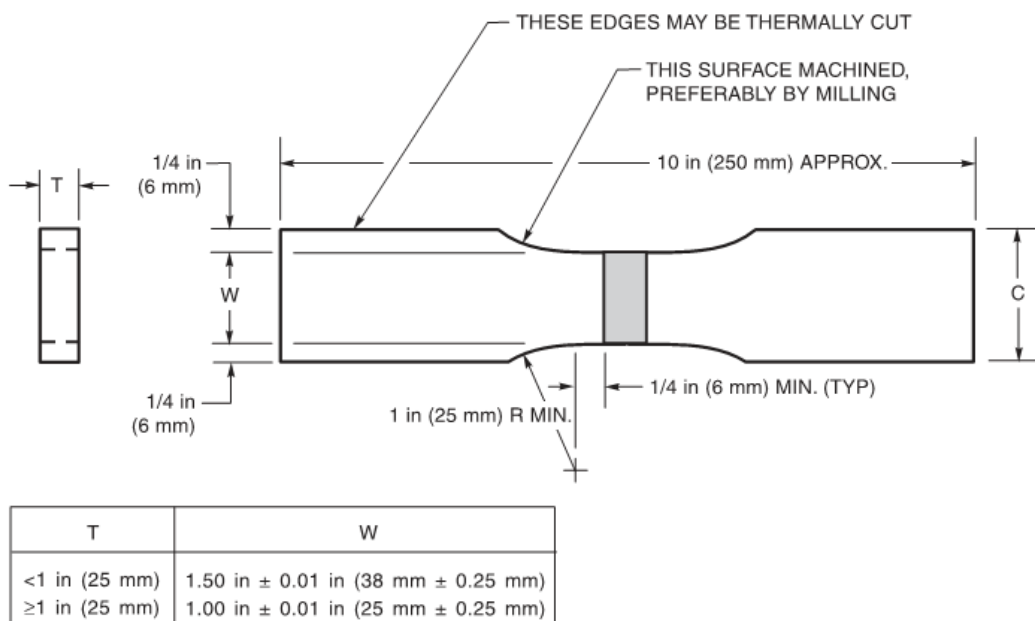


Figura 113. (Izquierda) probeta según norma ISO-527. (Centro) norma ASTM 638. (Derecha) norma AWS B4.0:2007 transversal.

Las geometrías de las probetas que se nos indica en la normativa AWS B4.0:2007 es la que se muestra en [85], Figura 114.



Notes:

1. Thin base metal being tested tends to tear and break near the shoulder. In such cases, dimension C shall be no greater than 1-1/2 times the width of the reduced section.
2. Weld reinforcement and backing strip, if any, shall be removed flush with the surface of the specimen.
3. When the thickness, t, of the test weldment is such that it would not provide a specimen within the capacity limitations of the available test equipment, the specimen shall be parted through its thickness into as many specimens as required.
4. The length of reduced sections shall be equal to the width of the widest portion of weld, plus 1/4 in (6 mm) minimum on each side.
5. All surfaces in the reduced section shall be no rougher than 125 microinches (3 micrometers) R_a .
6. Narrower widths (W and C) may be used when necessary. In such cases, the width of the reduced section should be as large as the width of the material being tested permits. If the width of the material is less than W, the sides may be parallel throughout the length of the specimen.

Figura 114. Geometría de probeta con soldadura transversal según AWS B4.0:2007.

Fase de fabricación de probetas

Como se justificó en el apartado de Normativa en el punto 15. Fase de caracterización mecánica del presente documento, se fabricarán las probetas correspondiente a la norma AWS B4.0:2007 [85].

Los parámetros de impresión son los que se adjuntan detalladamente en el historial de impresión (14.3. Historial impresión), pero como principal característica se ha alineado la fibra en la dirección en la que se somete a esfuerzo, como se muestra en Figura 115.

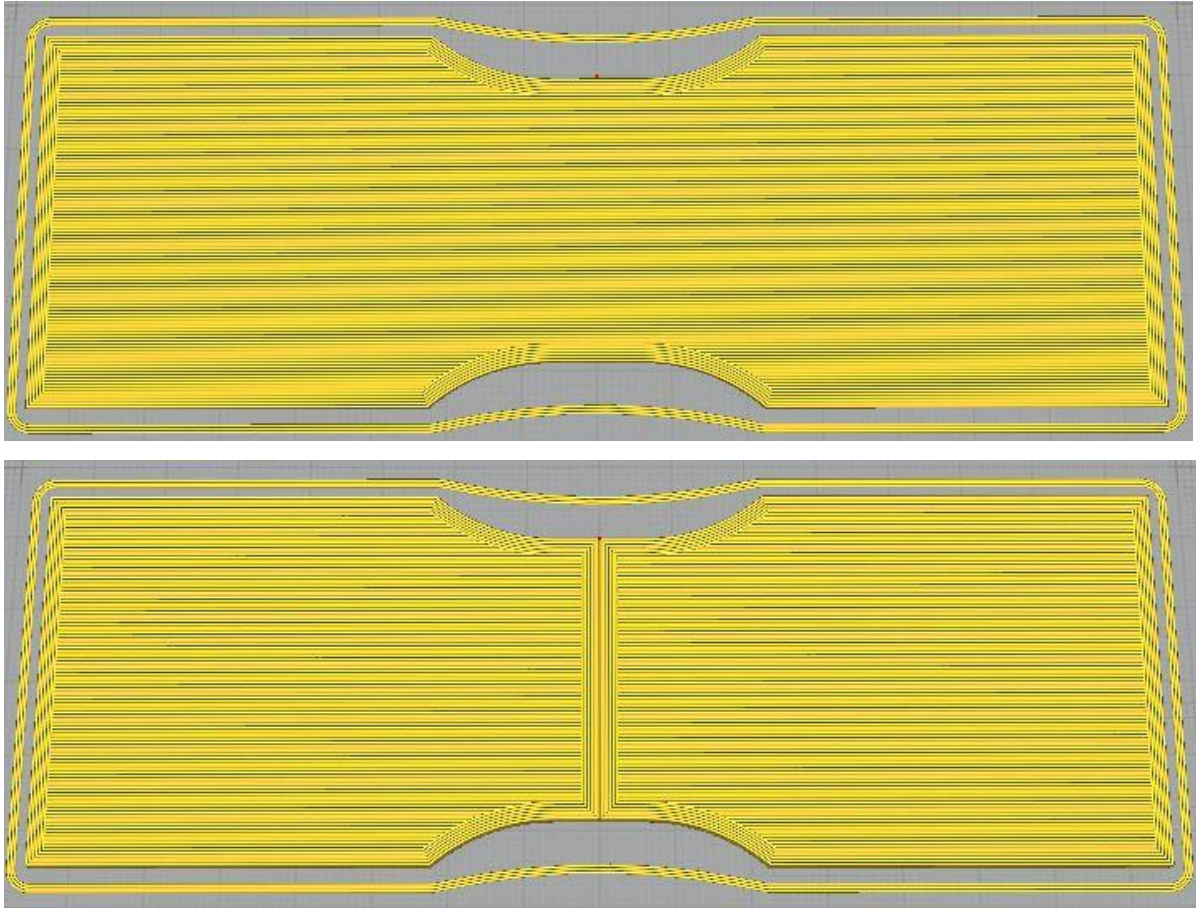


Figura 115. Trayectorias generadas para probeta tipo I.

El espesor de la probeta se ha fijado en 4mm mientras que para la preparación de la soldadura se ha considerado adecuada la cuadrada sencilla, ya que para FSW es posible realizarla sin preparación de las superficies [11].

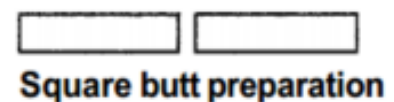


Figura 116. Preparación unión [88].

Fase de soldeo de probetas

Las soldaduras se efectuarán atendiendo a los grupos definidos en la Planificación ensayos de tracción en el punto de Fase de caracterización mecánica.

Preparación de la herramienta.

Para realizar el proceso se debe cargar la herramienta de material. De cara a disminuir los problemas de extrusión de filamento, se recomienda usar el material lo más recto posible. Para enderezarlo y eliminar las tensiones internas que posee el filamento cuando es bobinado, se introduce en el horno a 80°C durante 3 minutos y tras sacarlo se deja en posición vertical para que la propia gravedad lo enderece sin estirarlo, tras ello se corta en tramos de 40 cm (Figura 117).

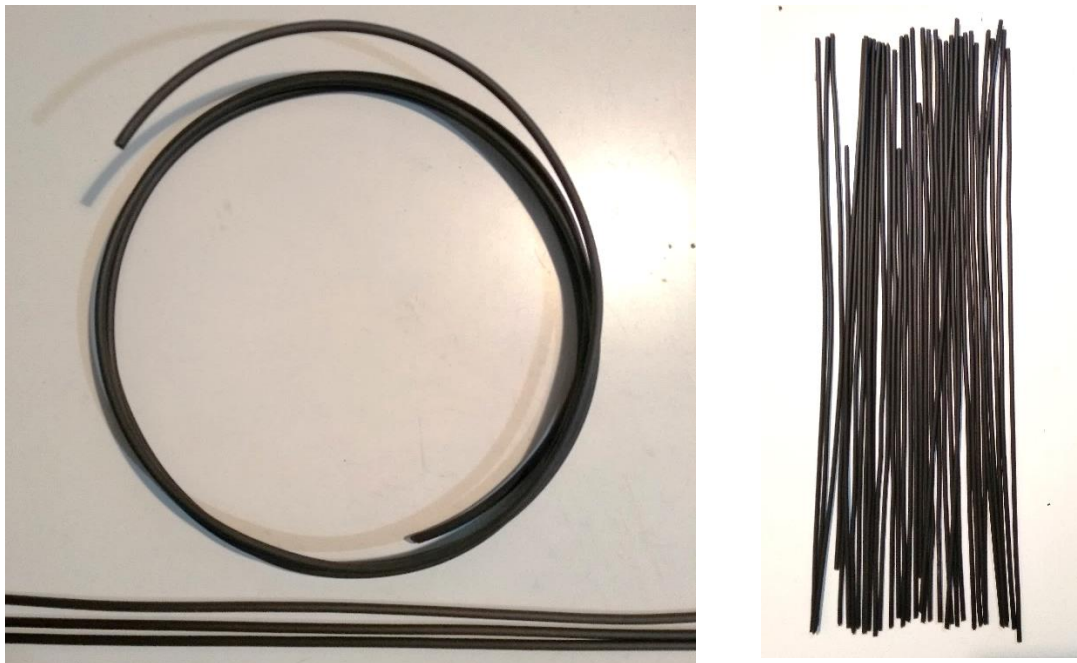


Figura 117. (Izquierda superior) Filamento en forma natural (Izquierda inferior) filamento enderezado (derecha) Filamentos cortados a 40 cm.

Además, para facilitar la inserción de este en la herramienta se afila uno de los extremos, se aconseja usar alicates de corte empleados en trabajos eléctricos.



Figura 118. (Izquierda) afilado extremo de extremo. (Derecha) Filamento insertado en la herramienta.

Con lo anterior y la regulación de velocidad de los motores, la herramienta queda preparada para realizar su uso.

Preparación de soldadura

Las probetas fabricadas se soldarán con el dispositivo desarrollado, en posición 1G (plana en plano horizontal). Como se ha indicado anteriormente, no necesita preparación de las superficies a soldar [23].

Sujeción

La sujeción de la probeta a soldar no es un aspecto relevante, ya que las fuerzas generadas son pequeñas. Para este caso se puede usar una mordaza rápida como se muestra en Figura 119.



Figura 119. Sistema de sujeción, probeta y herramienta.

Proceso de soldeo

Se ha llevado a cabo teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La herramienta se sujetará de forma similar a la posición de escritura, accionando uno de los dos pulsadores disponibles para la impulsión de filamento.
- En la parte inferior, sobre la que apoya la soldadura se usa un mat de corte para evitar dañar el banco de trabajo.
- La soldadura de las probetas ensayadas se ha intentado realizar a igualdad de parámetros. Como se verá de las configuraciones testadas el mejor resultado se ha conseguido para una velocidad de rotación de $2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$ y una velocidad de avance de 30 mm/min

Inicialmente se realizaron pruebas de soldadura con material blanco de ABS. Ello tenía como ventaja el color, que nos puede aportar más información acerca de la soldadura, ya que se muestra el batido y la tonalidad final de la soldadura. Ello puede dar idea de la cantidad de material de aporte, batido, penetración realizando secciones en la unión, etc.

Por otro lado, el ABS añadía un variable más a la soldadura, pudiendo existir dificultades añadidas (compatibilidades entre materiales) en la unión en cuanto a diferentes propiedades. En la Figura 120 se muestran una soldadura realizadas con dicho material, no haciendo especial hincapié, ello se propone indagar más en trabajos futuros.



Figura 120. Probeta de PLA soldada con ABS blanco como material de aporte.

En las soldaduras posteriores se usó filamento PLA negro de iguales características al usado en las probetas

Parámetros de soldeo - Resultados.

Durante la ejecución de la soldadura se ha detectado que para altas velocidades de avance ($\approx 60\text{mm} / \text{min}$), la herramienta presenta inestabilidad, ya que si se tiene falta de fusión no se produce batido de material (Figura 121 izquierda).

Por otro lado, también se ha detectado que para ángulos de inclinación de la herramienta menores a 60° respecto a la horizontal se produce una fusión temprana del filamento y una falta de penetración (Figura 121 derecha).

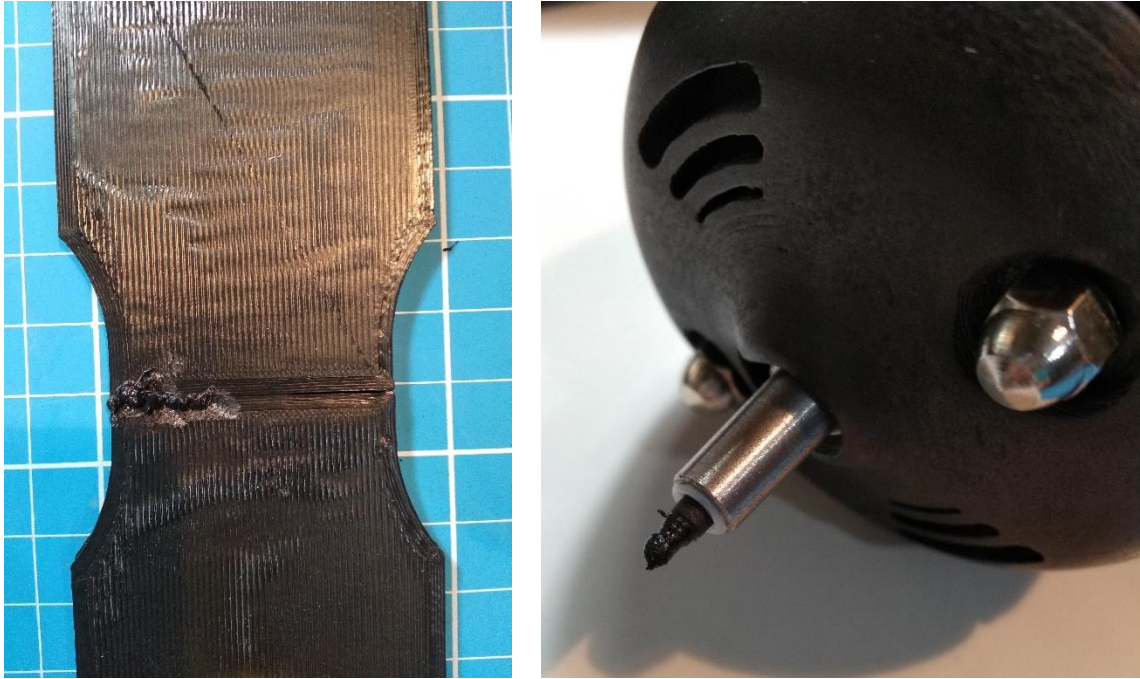


Figura 121. (Izquierda) soldadura con alta velocidad de avance 60 mm/min. (Derecha) Estado de la herramienta cuando el ángulo de inclinación de la herramienta es menor a 60° respecto la horizontal.

Además, se ha visto que el patrón de soldadura en zig-zag, no obtiene buen acabado para altas velocidades (Figura 122) ya que se produce una acumulación de material en un extremo y defecto en otro.



Figura 122. (Izquierda) Soldadura con falta de penetración y exceso de adición de material. (Centro, izquierda) soldadura siguiendo patrón de zig-zag a una alta velocidad (sentido de giro horario).

Atendiendo a la forma que adopta la herramienta durante el proceso de soldeo se determina la calidad de la soldadura. Es decir, las velocidades influirán en la forma que adopta la herramienta y por ende la calidad de la soldadura. En el caso de una velocidad de rotación mayor, $4500 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$ en la punta de la herramienta para el caso del ABS y $3500 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$ en caso de PLA, se forma la estructura de cono (Figura 123 izquierda y Figura 124 izquierda). Esta estructura hará un acabado superficial deficiente, ya que la superficie superior tiene un diámetro excesivo, (velocidad de rotación mayor en la parte superior del cono) no consiguiendo penetrar correctamente al tener una menor fricción en la parte central del filamento (Figura 123 derecha).

Para una velocidad más baja ($2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$) en el caso de PLA, no se aprecia esta formación además de presentar mayor calidad la soldadura (Figura 124 derecha).

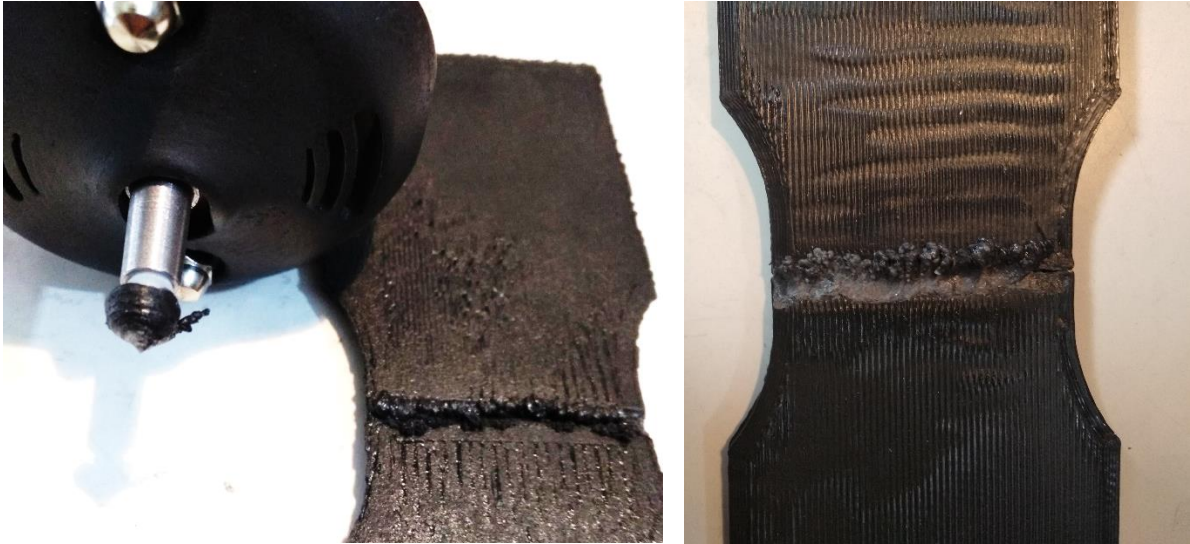


Figura 123. (Izquierda) Unión realizada con falta de penetración y exceso de material de aporte. (Derecha) Aspecto de unión soldada a alta velocidad ($4500 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$, $\approx 60 \text{ mm} / \text{min}$). La alta velocidad de rotación hará defectos de mordedura y mal adhesión del material de aporte. En ambas figuras se ha usado filamento blanco ABS.

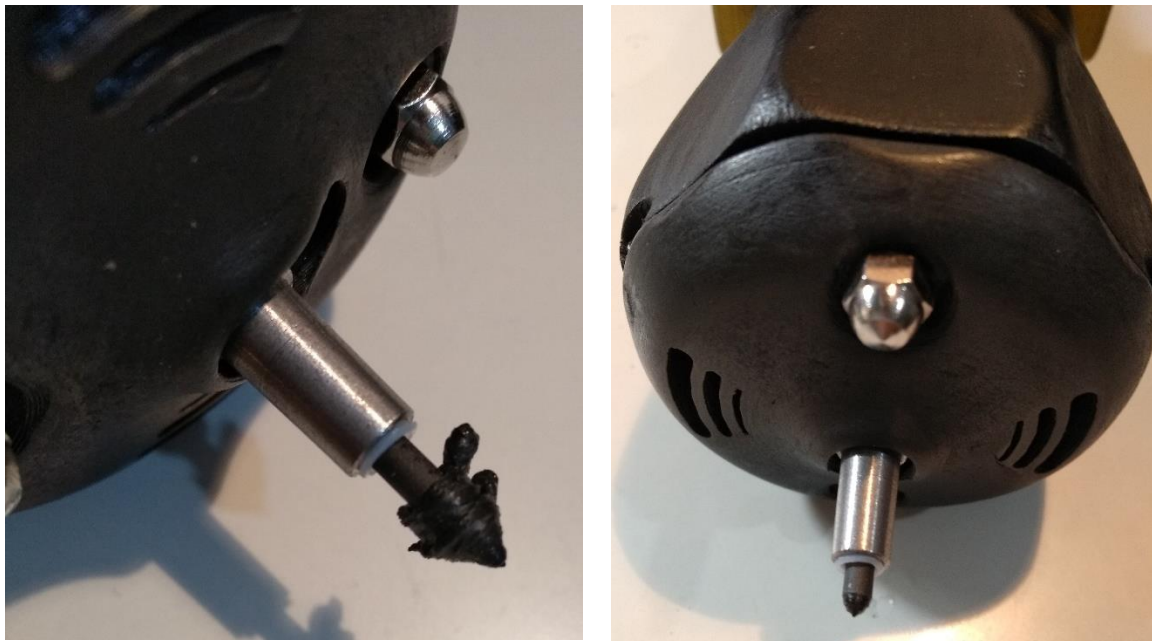


Figura 124. Forma de la herramienta para diferentes parámetros de soldadura. (Izquierda) Velocidad de giro de $4500 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$. (Derecha) $2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$. En ambos casos se usa filamento de PLA.

El mejor resultado en las uniones soldadas se ha conseguido para una velocidad de rotación de $2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$ y una velocidad de avance de 30 mm/min .

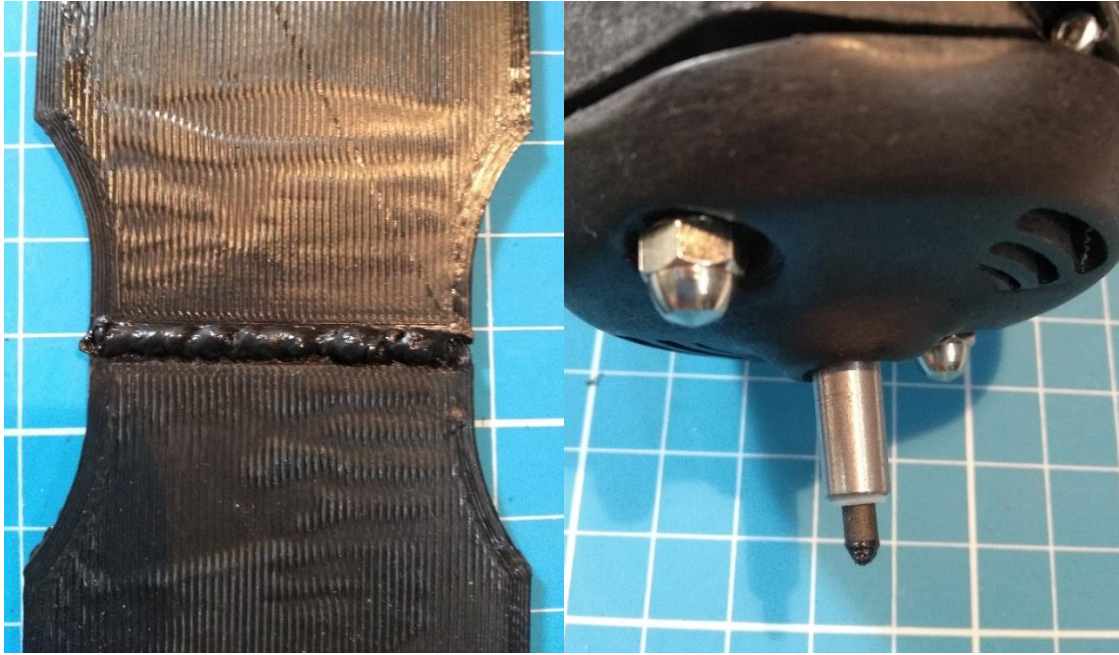


Figura 125. Cordón de soldadura obtenido a $2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$ y 30 mm/min .

Conclusión soldeo de probetas

A la vista de las soldaduras anteriores, se puede afirmar que el uso de ABS como material de aporte no nos proporciona una buena soldadura. Esto es dado a que el ABS tiene mayor punto de fusión que el PLA, por lo que se necesita una mayor velocidad de rotación, pero ello origina una mayor fuerza centrífuga en el filamento que hará que el material de aporte no se adhiera a la superficie a unir. Es más, en ABS siempre se observa la estructura de cono en la punta de la herramienta, lo que origina que la fuerza centrífuga de la parte superior de la punta sea mayor, por lo que el material salga despedido de la zona de soldadura. Además, al tener mayor superficie en la zona parte superior el acabado superficial será deficiente mientras que en la parte inferior al acabar en punta no se originará el calor necesario para producir la penetración. Es decir, para el soldeo de PLA se recomienda usar el mismo material como material de aporte.

Para una velocidad de rotación más baja ($2000 \text{ rpm} \pm 200 \text{ rpm}$) en el caso de PLA, no se aprecia esta formación en la punta de la herramienta. Como se muestra en la Figura 125 la punta de la herramienta adopta una forma de cono romo, donde el máximo diámetro del cono es el del filamento. Es por ello que se produce un mejor batido del

material y un mejor acabado superficial. Esta velocidad es del orden que se encontró en la bibliografía (Figura 34).

En cuanto a la velocidad de avance, se ha comprobado que la velocidad más adecuada es 30 mm/min, ya que se produce una fusión del material. Al igual que la anterior, la velocidad de avance también está en el rango que recomendaban los diversos autores en Figura 34.

Atendiendo a la bibliografía en ningún caso se obtenían mejores casos en el caso de que el patrón seguido en el soldeo sea de zig-zag. En nuestro caso, como se muestra en la Figura 122 derecha, ocurre de igual manera. La mejor trayectoria a emplear en FSW es recta

En cuanto al ángulo de cabeceo de la herramienta, a la vista de Figura 121 se puede afirmar que un ángulo menor a 60° medido respecto a la horizontal produce una fusión prematura del filamento. Desprendiéndose este por la parte superior, no generando el calor necesario para la fusión completa del material de aporte, y por lo tanto no produciendo una unión con buenas características. En la bibliografía (Saeedy and Givi [50]) modifica el ángulo de inclinación entre 1 y 2° , debiendo de ser menor ya que el hombro de la herramienta no puede penetrar en los componentes a soldar. En nuestro caso, no se tiene hombro por lo que el ángulo puede llegar hasta 30° con una buena calidad en la soldadura. Además, la inclinación estaba atrasada respecto al movimiento de avance, en nuestro caso se ha ensayado cuando el ángulo de cabeceo se encuentra adelantado.

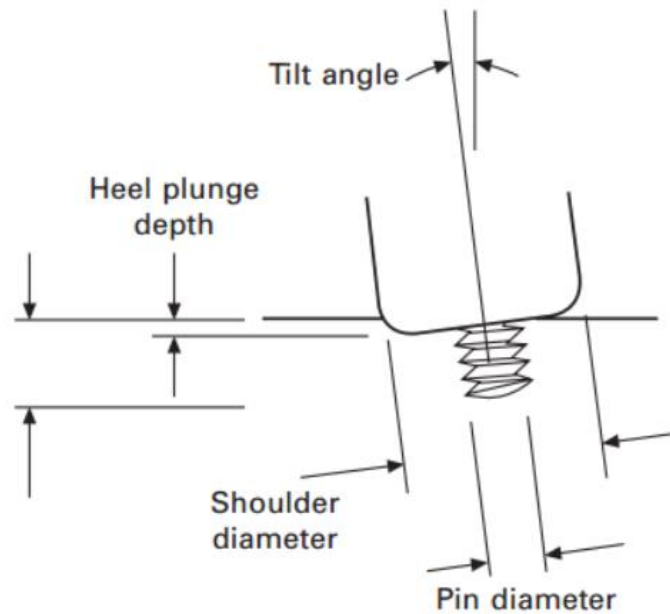


Figura 126. Ángulo de cabeceo en herramienta convencional [11]. La dirección de avance ensaya por los autores [40] es un movimiento de la herramienta hacia la derecha del lector, mientras que en nuestro caso se ha ensayado un movimiento de avance hacia la izquierda del lector.

Planificación ensayos de tracción

Se han ensayado un conjunto de 8 probetas soldadas y 3 sin soldar, es decir, se han considerado 3 grupos:

- Grupo 1. Probetas soldadas con PLA -> Grupo A
- Grupo 2. Probetas soldadas con ABS -> Grupo B
- Grupo 3. Probetas no soldadas -> Grupo C

La siguiente tabla resume los parámetros usados en la soldadura de cada probeta:

Probeta	Grupo	Material aporte	Velocidad soldeo	Anchura soldadura - patrón	Aspecto
1	A	PLA	2000 rpm \pm 200 rpm	5 mm (zig-zag)	
2	A	PLA	2000 rpm \pm 200 rpm	3 mm (recta)	
3	B	ABS	4000 rpm \pm 200 rpm, \approx 60mm / min	5 mm (zig-zag)	






4	A	PLA	2000 rpm \pm 200 rpm	5 mm (zig- zag)	
5	A	PLA	3000 rpm \pm 200 rpm	5 mm (zig- zag)	
6	B	ABS	4500 rpm \pm 200 rpm, ≈ 60 mm / min	5 mm (zig- zag)	
7	B	ABS	4500 rpm \pm 200 rpm, ≈ 60 mm / min	5 mm (circular)	
8	B	ABS	4500 rpm \pm 200 rpm, ≈ 60 mm / min	5 mm (circular)	

Figura 127. Parámetros de probetas soldadas

Las probetas no soldadas servirán para contrastar los datos con la bibliografía, mientras que para probetas soldadas se han considerado las velocidades anteriores con unos patrones de soldeo en zig-zag, circular y recto.

Los ensayos de tracción se han realizado con MTS Criterion Model 43 con unas mordazas de presión uniforme, con apriete manual a una velocidad del puente de 4mm/min.

Preparación de probetas

Los ensayos se han realizado mediante técnica DIC (Digital Imagen Correlation), para ello las probetas fueron pintadas de blanco mate con un speckle negro.



Figura 128. Proceso de pintado base blanca mate (izquierda) y rociado de speckle negro (derecha)

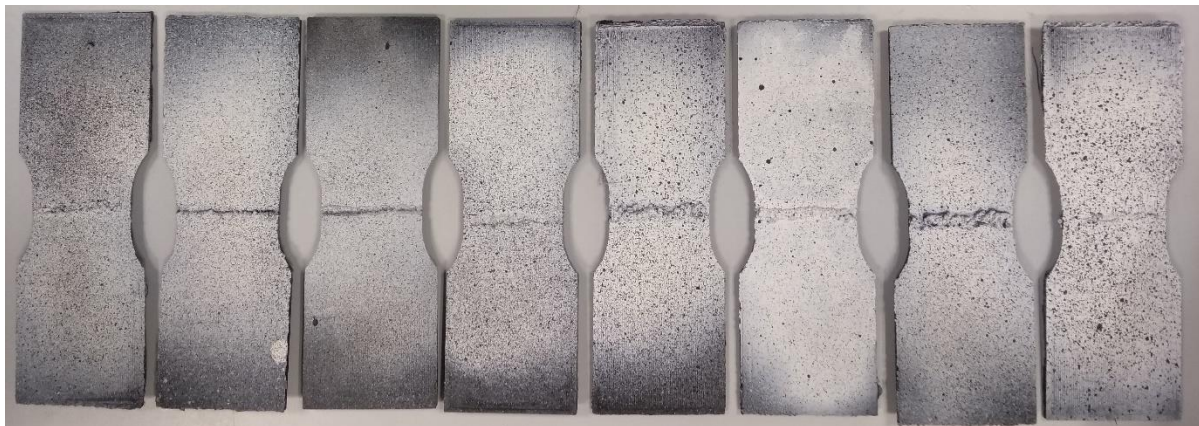


Figura 129. Probetas soldadas preparadas para ser numeradas y ensayadas

Realización de ensayos

El sistema de visión se compone de una cámara CCD Stingray como la que se muestra en la figura.



Figura 130. Montaje de elementos para ensayo

Para el cálculo del diagrama de tensión deformación se tiene en cuenta que la sección transversal de la probeta es de 38*3 mm y la longitud calibrada es de 19 mm.

Para el postprocesado de los ensayos nos ayudamos de las galgas virtuales programadas en el software VIC Gauge [<https://www.correlatedsolutions.com>].

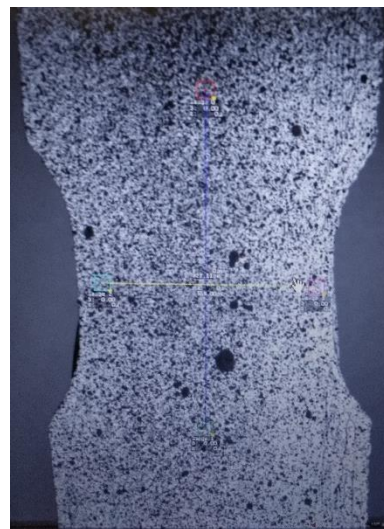


Figura 131. Instalación de galgas virtuales

Las gráficas de tensión deformación son como se muestra:

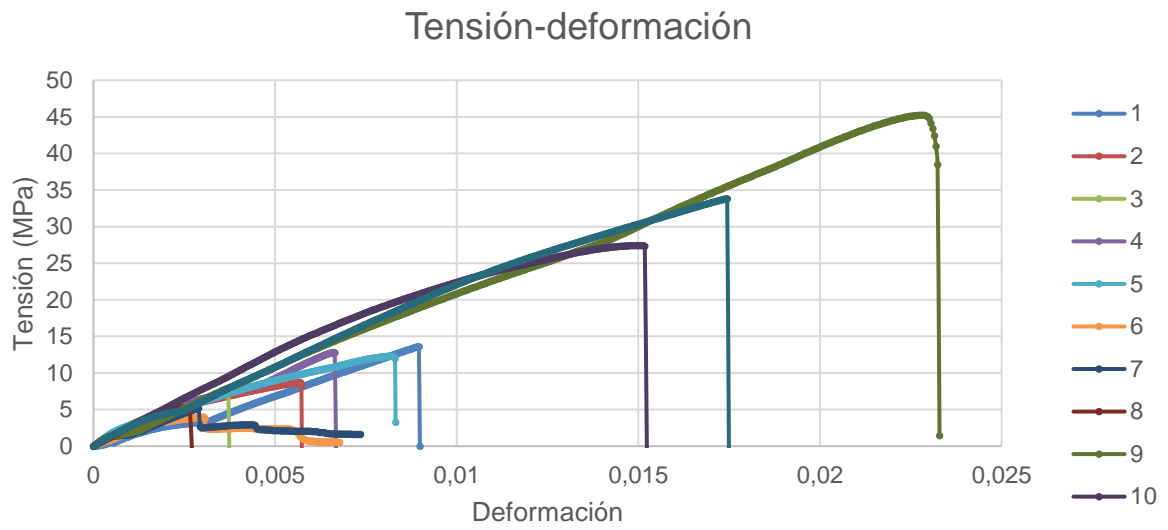


Figura 132. Diagrama tensión deformación para todas las probetas

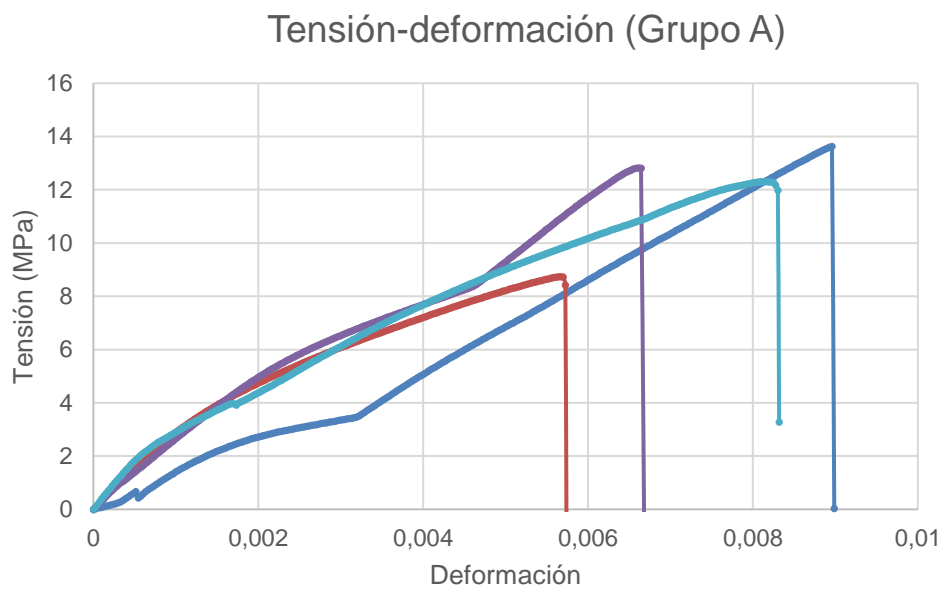


Figura 133. Diagrama tensión deformación para probetas soldadas con PLA

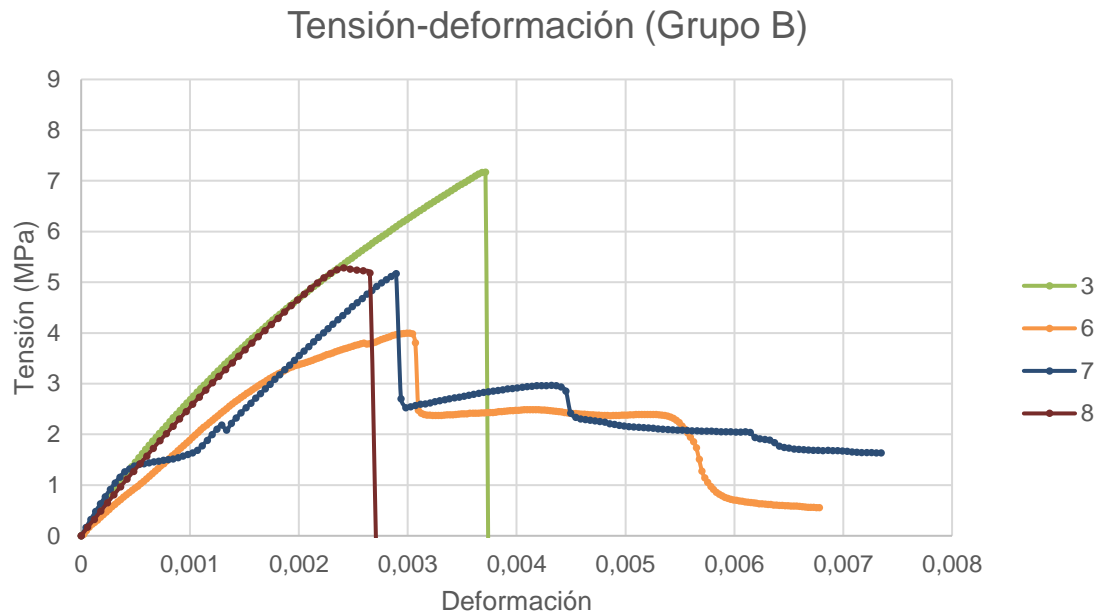


Figura 134. Diagrama de tensión deformación para probetas soldadas con ABS

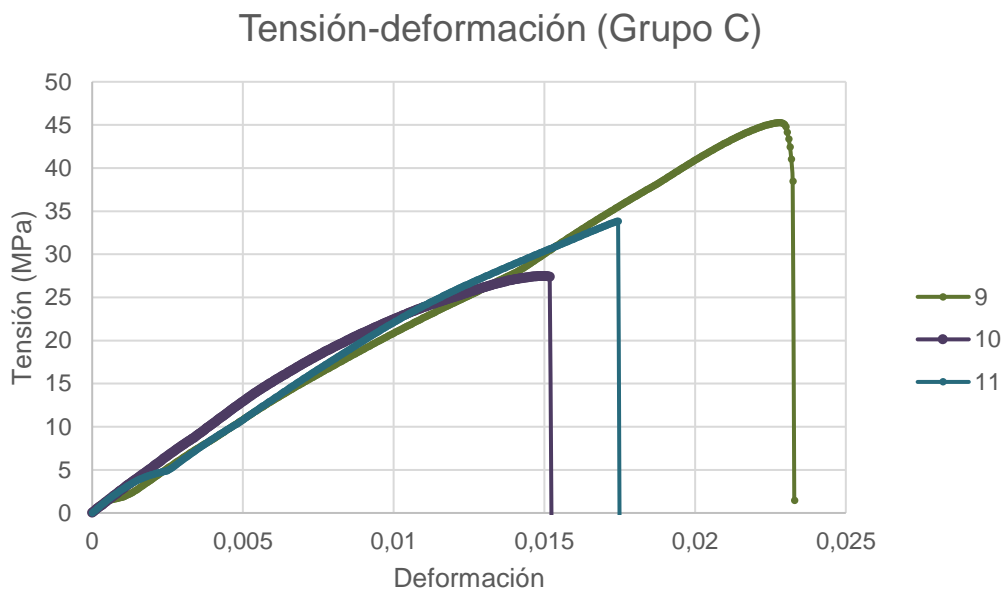


Figura 135. Diagrama tensión deformación para probetas no soldadas

A la vista de los gráficos, se puede obtener parámetros como la tensión de rotura y el módulo de elasticidad. En la siguiente tabla se muestran resumidos estos:

Grupo	Nº Probeta	Tensión de rotura [MPa]	Módulo elástico [MPa]
A	1	13,63	1763,40
A	2	10,54	1721,31
B	3	10,56	1978,70
A	4	13,27	1835,30
A	5	9,25	1862,06
B	6	3,83	2011,56
B	7	5,23	1808,07
B	8	5,31	1850,65
C	9	45,27	2164,20
C	10	27,64	2358,74
C	11	33,74	2225,82

Figura 136. Tensión de rotura y módulo elástico de las probetas ensayadas

Análisis de ensayos

Contrastando los resultados con los hallados en la bibliografía [89], se tienen resultados muy similares, ya que para el Módulo de Young para el PLA impreso Ultimaker en su Datasheet [90] indica que es 2346.5 MPa mientras que en los ensayos realizados se ha obtenido un promedio de 2249.59 MPa (probetas no soldadas).

En cuanto a la tensión de rotura en [90] se encuentra que es 45.6 MPa y en los ensayos se ha obtenido un promedio de 35.55 MPa (probetas no soldadas).

Si realizamos un análisis por grupos de los resultados, se aprecia que el módulo elástico de las probetas no soldadas es ligeramente menor que en el resto de probetas soldadas (20% menor). Es decir, en la siguiente tabla se muestra como el mayor módulo elástico se tiene para probetas no soldadas, y el menor, para probetas soldadas con PLA.

Módulo elástico promedio Grupo A	1795,52 ± 56.01	MPa
Módulo elástico promedio Grupo B	1912,25 ± 85.04	MPa
Módulo elástico promedio Grupo C	2249,59 ± 81.18	MPa

Figura 137. Módulo elástico promedio por grupos

Lo mismo ocurre para la tensión de rotura, obviamente para el caso de probetas no soldadas se tiene la mayor, mientras que la menor se obtiene para probetas soldadas con ABS. Dichos datos se muestran en la siguiente tabla:

Tensión rotura promedio Grupo A	11,67 ± 1.84	MPa
Tensión rotura promedio Grupo B	6,23 ± 2.57	MPa
Tensión rotura promedio Grupo C	35,55 ± 7.31	MPa

Figura 138. Tensión de rotura promedio por grupos

A la vista de los resultados es coherente lo ocurrido, ya que las imperfecciones en la soldadura originarán una disminución tanto de la tensión de rotura, como del módulo elástico.

Conclusión de ensayos

Como se ha visto, las probetas soldadas con PLA tienen una mayor resistencia que las de ABS. Este hecho se podía predecir previo al ensayo, ya que mediante la inspección visual no se mostraba un correcto batido del material base.

Analizando las uniones soldadas que mayor resistencia aportan (1 y 4) se aprecia que de aspecto superficial no es excelente, pero que usando como material de aporte PLA con patrón en zig-zag junto con una velocidad de 2000 rpm ± 200 rpm se pueden llegar a conseguir resistencias de un 38% respecto al material base.



Figura 139. Aspecto soldadura probetas número 1 (izquierda) y 4 (derecha)

Para reducir la desviación típica estándar se debería aumentar el número de ensayos y refinar la técnica de soldeo, de forma que se aumente la repetitividad. Es decir, se trata de un proceso manual, equiparable al soldeo por electrodo, que requiere de aprendizaje y práctica para conseguir resultados óptimos.

En el presente trabajo no se ha abordado un exhaustivo análisis mecánico de las uniones soldadas, ya que el objetivo de la caracterización mecánica realizada en el presente documento es tener un orden de magnitud de las propiedades de las uniones soldadas.

16. Conclusión y aportaciones

El origen de este trabajo ha sido desarrollar un sistema de unión que pueda ser usado en componentes complejos. Válido para ser empleado en termoplásticos provenientes de fabricación aditiva, pudiendo ser extensible a componentes cuyo origen sea otra técnica.

El trabajo ha servido para conocer el estado del arte de la soldadura FSW, detectándose que existe una gran carencia de conocimiento al tratarse de una técnica compleja.

Se ha propuesto, desarrollado y fabricado una herramienta totalmente novedosa, ya que las existentes hasta la fecha se ceñían al uso de una fresadora. Lo que lo hacía impracticable aplicar la soldadura a complejos componentes los cuales el simple hecho de sujetarlos ya supone una tarea tediosa. Con esta metodología la sujeción del componente puede ser manual o una mordaza rápida, lo cual no necesita diseño y preparación de utillajes para efectuar la unión.

El sistema desarrollado es ligero, económico, portátil y fácilmente utilizable por cualquier persona con una mínima experiencia en la técnica. Si bien es verdad, un usuario con un cierto nivel de práctica con la técnica, aumentará considerablemente las propiedades de la unión soldada.

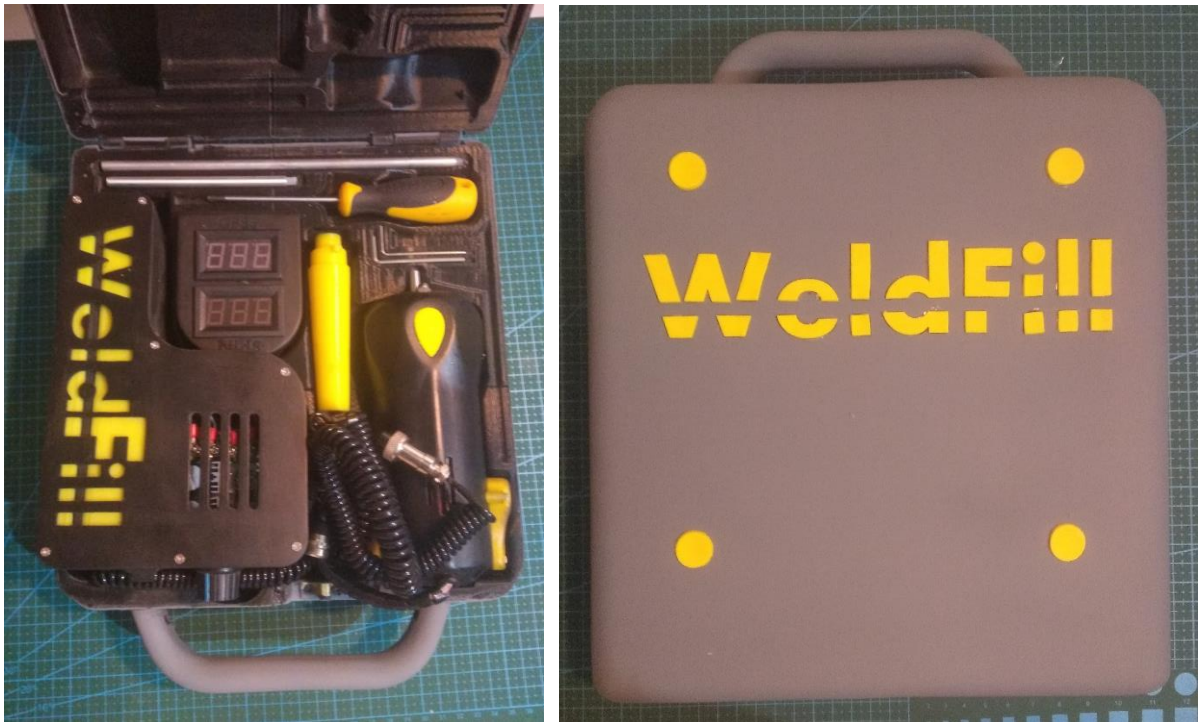


Figura 140. Solución prototipo final de soldeo.

La resistencia mecánica alcanzada en nuestro caso es más reducida que la encontrada en bibliografía, en la que algunos autores aseguran alcanzar una resistencia mecánica de un 95% de la resistencia del material base (Mostafapour and Azarsa [57]) o un 89% en determinadas condiciones (Mustafa Aydin [53]). Esta menor resistencia mecánica alcanzada en nuestro caso está justificada con la mayor flexibilidad que nos aporta el método. Aun así, la resistencia mecánica alcanzada está sujeta de un estudio más extenso acerca de la caracterización de la soldadura, así como aprendizaje del operario.

Además, el método es compatible con el uso de otros métodos de unión como la adhesiva, por lo que se puede usar en combinación si la aplicación lo requiere.

17. Trabajo futuro

Al tratarse de una técnica reciente (1995 [25]) y como se analizó en el punto 8.6 FSW en polímeros termoplásticos existe un gran déficit de conocimiento de la

técnica FSW, aún más si cabe en componentes obtenidos mediante impresión 3D y soldados con el dispositivo desarrollado.

Ensayos

Como se ha visto en Principales parámetros (página 40) de este documento y en los ensayos realizados en la técnica de soldadura tienen influencia una gran cantidad de parámetros. Así mismo, para llegar a una optimización del proceso se debe realizar un mayor número de ensayos.

En el presente trabajo se ha usado la inspección visual y el ensayo de tracción para conocer más el proceso, ya que es la primera experiencia que se tiene con la tecnología en materiales poliméricos.

En cuanto a la inspección, la termografía será útil para la evaluación de la distribución de temperatura durante el proceso de soldeo, ya que como se ha visto la temperatura de los distintos elementos tienen una relación directa con defectos, como discontinuidades, exceso de fusión, burbujas, degradación o fragilidad [17].

Para la evaluación de la soldadura, una observación visual ofrece información importante sobre esta. Ensayos más avanzadas

(no destructivos) como una inspección por ultrasonidos, rayos X, emisión acústica, termografía infrarroja o líquidos penetrantes nos aportaría mayor información pudiendo adquirir mayor información y control sobre el proceso [20] [91].

También es interesante realizar una caracterización mecánica más exhaustiva, no solo ensayos de tracción o flexión sino también ensayos a fatiga o cortante. Se



Figura 141. Soldadura deficiente realizada con ABS blanco.

conoce que la soldadura FSW posee mayor resistencia a fatiga que en el caso de la soldadura por arco en aluminios [36] en materiales poliméricos la resistencia a fatiga se ve ligeramente mermada respecto al material base [62].

Flujo

En el presente documento no se ha indagado en exceso sobre el conocimiento del batido que se produce en el material. En la Figura 123 y Figura 141 se mostró el resultado que se tiene para la soldadura aportando material de un color distinto a los componentes a unir. Esta es una sencilla técnica, pero que realizando secciones y con ayuda del microscopio se puede obtener información acerca del flujo en el material al igual que el modelo de Arbegast para materiales metálicos [46].

Para estudiar el flujo de material se pueden usar otras técnicas, como las empleadas en [40] para el caso del aluminio.

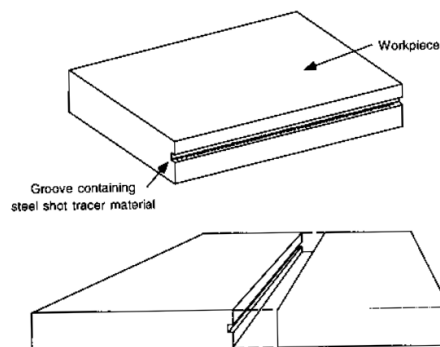


Figura 142. Técnica de partículas trazadoras metálicas usadas en [40].

Monitorización y control

Uno de los aspectos importantes que no se ha indagado en el presente documento es la inspección y el control de calidad. No se han usado métodos de monitorización ni control, más allá de la visual, pero existen técnicas objetivas para determinar la calidad del proceso y soldadura.

Como se ha visto, la selección de la soldadura FSW está relacionada principalmente por su alta calidad, además de en algunos casos su menor coste. Pero como en todo proceso existen defectos (Figura 144) teniendo que tener

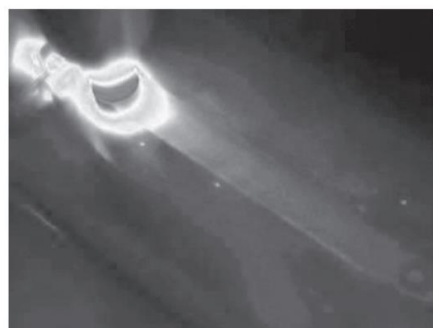


Figura 143. Radiación infrarroja emitida durante el proceso [11].

en consideración parámetros de calidad de la soldadura. Uno de los parámetros más importantes es la medida de la temperatura durante el proceso, ello se puede realizar mediante termopares situados en la propia herramienta, o mediante cámaras termográficas [11].

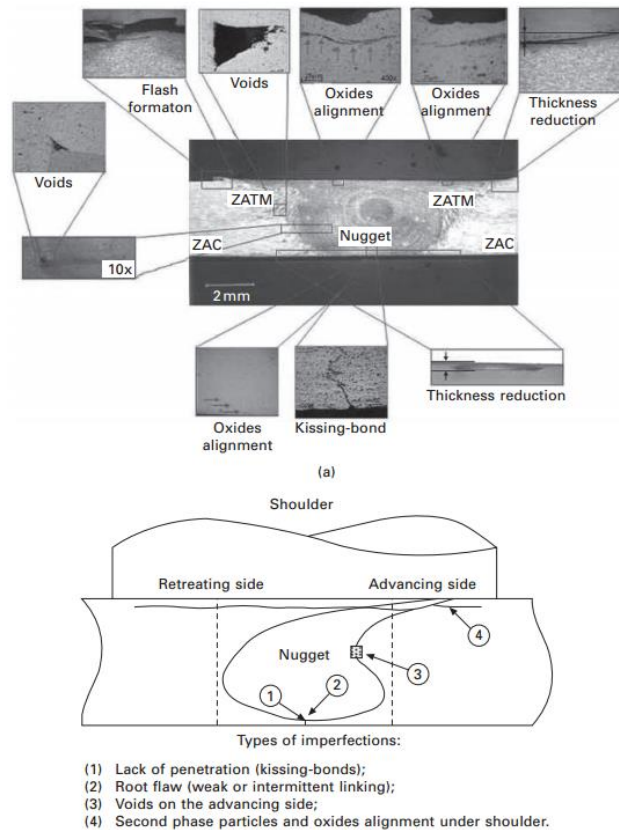


Figura 144. Principales defectos en soldadura FSW realizada en aluminio [92].

Mejoras en el diseño

Como se comentó el diseño y prototipo realizado han buscado principalmente la funcionalidad, por lo que la ergonomía y el diseño estético no han sido parámetros determinantes. Es decir, ello está justificado ya que el objeto de este trabajo es mostrar la viabilidad del método.

Tras realizar este trabajo la viabilidad ha sido demostrada, por lo que un punto a mejorar es tanto la ergonomía como su estética [93].

Posibles mejoras en la herramienta

Enfriamiento soldadura

Existen experiencias de mejora que pueden ser estudiadas e implementadas en la herramienta. Para determinados materiales y condiciones puede ser interesante adaptarle un sistema de enfriamiento superficial de la unión, tal y como muestra la Figura 145 [11].



Figura 145. Sistema de distribución criogénico de CO₂ (Gabzdyl et al., 2001, Richards et al., 2008) [11].

Adicción de calor

Como se vio en el análisis previo teórico en determinadas condiciones, es recomendable realizar una adicción de calor, ello se puede generar con un sistema como el que se muestra en la Figura 146

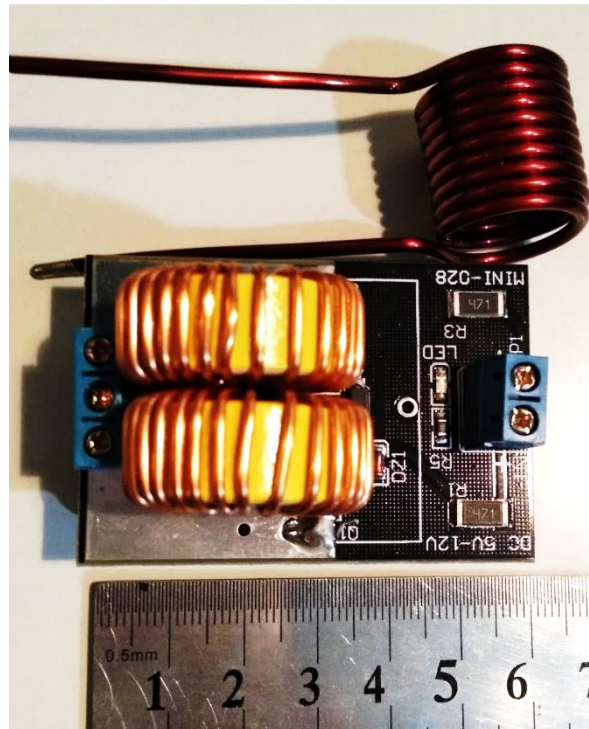


Figura 146. Sistema de calentamiento por inducción.

Con un sistema de bobina como el anterior, el calentamiento se produce por inducción por lo que no se requiere contacto físico con la zona a calentar. Sus dimensiones son reducidas (ancho de bobina de 2.8 cm) teniendo una potencia de hasta 120 W. Se puede aplicar sobre la parte inferior de la herramienta, en el eje del motor con un control de temperatura externo.

Rodillos

Otra mejora, que se ha mencionado en algunas experiencias (US5971247A) es el acoplamiento de un rodillo que mejore el aspecto superficial de la soldadura realizada además de si se le aplica una carga suficiente, aliviar las tensiones residuales [11].



Figura 147. Rodillo aliviador de tensiones residuales (Airbus UK) [11].

Mejora en refrigeración

Por todos es conocido que en las herramientas en las que se produce un movimiento de rotación se genera calor por los propios elementos, dado que su rendimiento mecánico y eléctrico no es unitario. En concreto para el prototipo construido, se ha observado que trabajando a altas revoluciones ($\approx 5000\text{rpm}$) durante un tiempo prolongado ininterrumpido (10 min) se produce calentamiento en los anillos rozantes. Teniendo en cuenta que el material con el que se ha prototipado tiene una temperatura de distorsión térmica a 56°C (ISO 75/2B) [84] no se debe exceder de aproximadamente 8 min de forma ininterrumpidamente a esta velocidad. Como mejora, para evitar esto, se propone acoplarle un sistema de ventilación que pudiera funcionar con el propio movimiento principal de rotación.

Inversión de giros

En la Figura 34 se resumió los principales parámetros de soldadura que se encuentra en la bibliografía, en concreto, Paneerrselvam y Lenin en [56] detectaron que la soldadura en sentido anti-horario mostraba un menor número de defectos que si esta se realizaba en sentido horario (usando una herramienta roscada a izquierdas).

A priori se podría afirmar que en nuestro caso el sentido de giro no es relevante, ya que la herramienta no es roscada ni asimétrica. Aun así, se podría implementar en la herramienta o caja reguladora un inversor de giro para el motor principal, realizando ensayos para cerciorarnos de lo anterior.

La inversión de giro en el motor de impulsión también es una mejora ya que al operario le aporta mayor flexibilidad y rapidez en la carga y descarga del material.

Ambas inversiones de giro se pueden realizar con un conmutador de 6 pines alojado en la caja reguladora como el que se muestra en Figura 148.

Sensores

En cuanto a sensores en la herramienta se pueden instalar los siguientes:

Velocidad de giro

Se deja como trabajo futuro la posible instalación de un sensor óptico vía infrarrojos como el que se muestra en la Figura 149.

Temperatura

En el caso que se emplee un sistema de adicción de calor, se debe emplear un sensor de temperatura. De forma análoga a la anterior se puede usar un sensor de temperatura óptico vía infrarrojos como el mostrado en Figura 150



Figura 148. Conmutador 6 pines 2 posiciones.



Figura 149. Sensor óptico RPM Turnigy TGY CP02 empleado en aerodelismo (rango 0-60000 rpm).



Figura 150. Sensor infrarrojos de temperatura OS-MINI-HA201-D-C4.

Estudios de comercialización

Dada la viabilidad del proyecto es posible realizar un estudio de comercialización del producto.

18. Anexos

14.1. Materiales

El material usado para la construcción del prototipo y probetas ha sido PLA negro, cuyas propiedades mecánicas suministradas por el fabricante se muestran a continuación. Como material de aporte durante el proceso de soldadura se ha empleado ABS blanco [94] en un primer caso y posteriormente PLA negro [90].

<u>Propiedades mecánicas (*)</u>	<u>Moldeo por inyección</u>		<u>Impresión 3D</u>	
	Valor típico	Método de ensayo	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	-	-	2346,5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	-	-	49,5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	-	-	45,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	-	-	3,3 %	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la rotura	-	-	5,2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	-	-	103,0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	-	-	3150,0 MPa	ISO 178
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella (a 23 °C)	-	-	5,1 kJ/m ²	ISO 180
Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	-	-	-	-
Dureza	-	-	83 (Shore D)	Durómetro

Figura 151. Propiedades PLA [90].

<u>Mechanical properties (*)</u>	<u>Injection molding</u>		<u>3D printing</u>	
	Typical value	Test method	Typical value	Test method
Tensile modulus	2030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1681.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Tensile stress at yield	43.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39.0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Tensile stress at break	-	-	33.9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at yield	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)	3.5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Elongation at break	34 %	ISO 527 (50 mm/min)	4.8 %	ISO 527 (50 mm/min)
Flexural strength	-	-	70.5 MPa	ISO 178
Flexural modulus	-	-	2070.0 MPa	ISO 178
Izod impact strength, notched (at 23°C)	-	-	10.5 kJ/m ²	ISO 180
Charpy impact strength (at 23°C)	58 kJ/m ²	ISO 179	-	-
Hardness	97 (Shore A)	-	-	-

Figura 152. Propiedades ABS [94].

14.2. Breve descripción de patentes relacionadas

A continuación, se muestra las patentes más importantes relacionadas con el sistema propuesto. Han servido para conocer el estado del arte en cuanto a proceso y dispositivos adicionales.

CN105397276A. Friction stir welding additive manufacture method of bar material

Orientado al soldeo de barras, buscando minimizar los defectos como grietas, atrapamientos de aire y grandes deformaciones. Uso de un collarín fabricado mediante AM como guía.

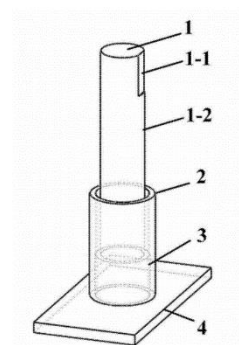


Figura 153. CN105397276A.

CN107160030A. Static shaft shoulder device of static shaft shoulder friction stir welding and additive manufacturing method

Hombro estacionario con rodamiento, mejora de propiedades y aspecto de la soldadura.

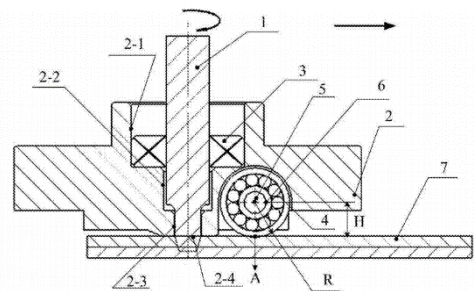


Figura 154. CN107160030A.

EP1738856B1. Tool for friction stir welding with a supplementary friction surface segment independently rotatable with respect to a inner segment of the tool

Diseño de accesorio para facilitar el guiado y unión de los elementos a unir. Sin necesidad de tener que hacer girar un elemento, se fijan ambos elementos y se hace rotar el pin que efectuará la soldadura

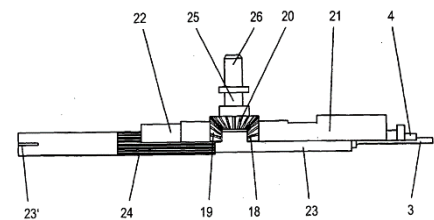


Figura 155. EP1738856B1.

US8534529. Powder metal friction stir welding tool and method of manufacture thereof.

Herramienta porosa fabricada con material férreo como base.

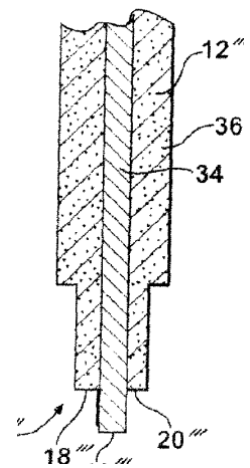


Figura 156. US8534529.

US9987707. 3D print apparatus and method utilizing friction stir welding

Aportación de material externa al FSW en forma de filamento antes de ser soldado.

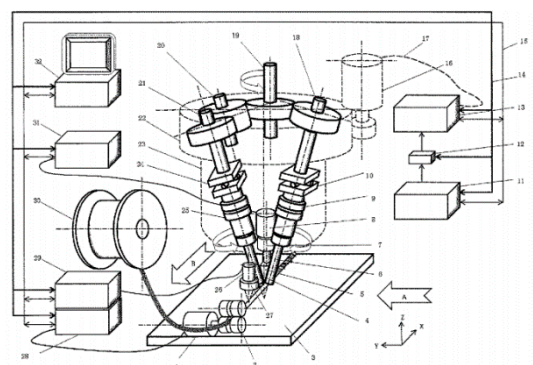
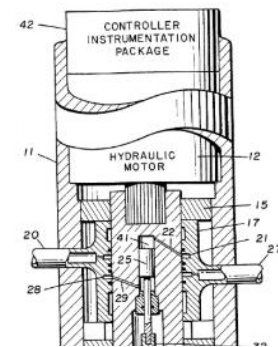


Figura 157. US9987707.

US5893507A. Auto-adjustable pin tool for friction stir welding

Pin regulable en altura para la adaptación a diferentes profundidades.



US5697544A. Adjustable pin for friction stir welding tool

Con el mismo objetivo que la anterior realiza la adaptación con otros mecanismos.

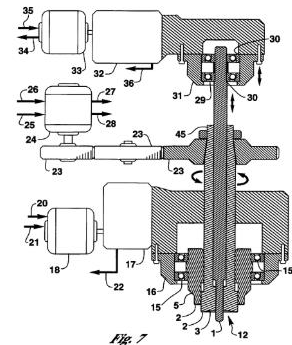


Figura 159. US5697544A.

US5713507A. Programmable friction stir welding process

Regulación de la profundidad del pin de forma computerizada.

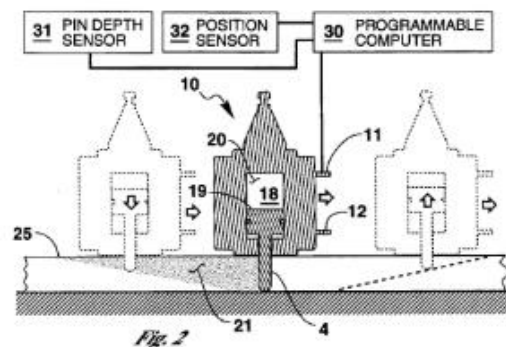


Figura 160. US5713507A.

US5718366A. Friction stir welding tool for welding variable thickness workpieces

Sistema automático de regulación de profundidad del pin.

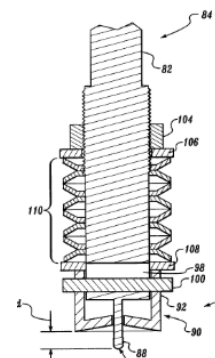


Figura 161. US5718366A.

US5971247A. Friction stir welding with roller stops for controlling weld depth

Sistema de regulación de la profundidad de pasada del pin.

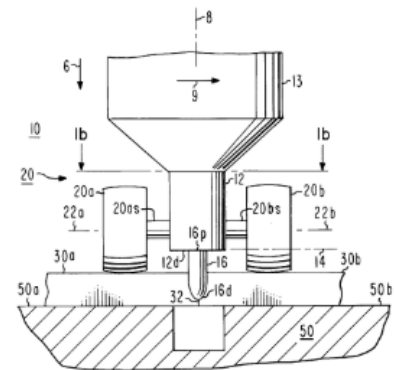


Figura 162. US5971247A.

US5794835A. Friction stir welding

Inserto de elementos de corte en la propia herramienta de FSW.

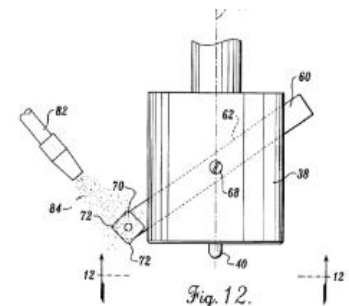


Figura 163. US5794835A.

US6543671B2. Apparatus and method for friction stir welding using filler material

Sistema de adición de material por el centro de la herramienta de FSW.

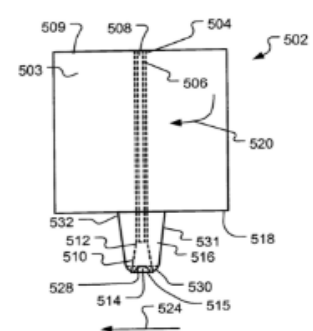


Figura 164. US6543671B2.

CN205927497U. 3D (three -dimensional) printing device

Similar a US9987707.

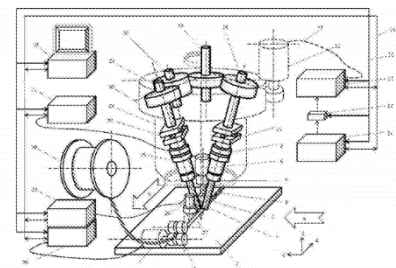


Figura 165. CN205927497U.

US20060163328A1. Apparatus and method for friction stir welding using a consumable pin tool

Sistema de adición de material, basado en un pin consumible fabricado del mismo material que los componentes a unir. Opcionalmente el hombro gira a velocidad programable y puede ser retraído. También el hombro puede ser consumible o no consumible.

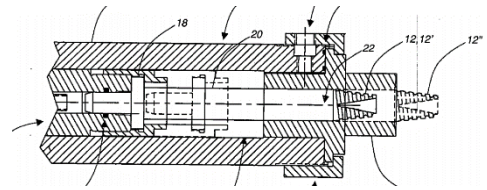


Figura 166. US20060163328A1.

US6206268B1. Friction stir welding pin with internal flow channels

Diseño de la herramienta con canales internos para la adición de material

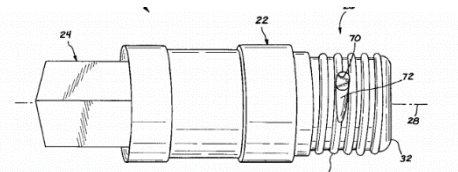


Figura 167. US6206268B1.

14.3. Historial impresión

A continuación, se muestran los parámetros más importantes con los que se ha programado el software Cura® [95] para la fabricación de los componentes.

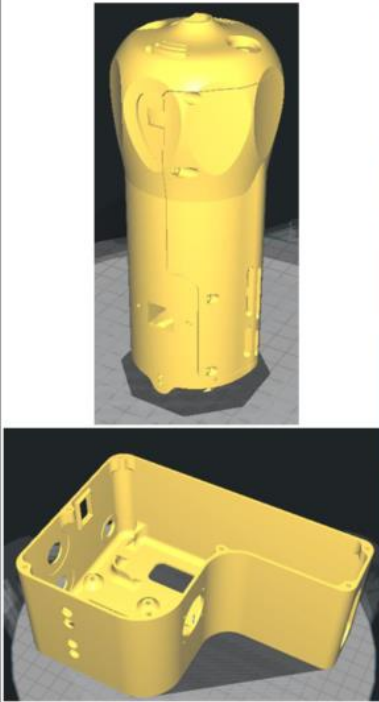
ID	FOTOGRAFÍA	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN																																																																																																																					
Herramienta principal y caja auxiliar		<table border="0"> <tr> <td>QUALITY</td> <td>Layer height (mm)</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>SHELL</td> <td>Wall thickness (mm)</td> <td>1,2</td> </tr> <tr> <td rowspan="10">MATERIAL</td> <td>Retraction</td> <td></td> </tr> <tr> <td> Enable combing</td> <td>ALL</td> </tr> <tr> <td> Minimal extrusion before retracting (mm)</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td> Z hop when retracting (mm)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td> Initial layer thickness (mm)</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td> Initial layer line width (%)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td> Cut off object bottom (mm)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td> Dual extrusion overlap (mm)</td> <td>0,15</td> </tr> <tr> <td colspan="3">FILL</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bottom / top thickness (mm)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fill Density (%)</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td colspan="3">INFILL</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Solid infill top</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Solid infill bottom</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Infill overlap (%)</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Infill Pattern</td> <td>Grid</td> </tr> <tr> <td colspan="3">SPEED (mm/s)</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Print speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Travel speed (mm/s)</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Infill speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Top / bottom speed (mm/s)</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Outer wall speed (mm/s)</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Inner shell speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td colspan="3">COOLING</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Minimal layer time (s)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Enable cooling fan</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fan full on at height (mm)</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fan speed min (%)</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Fan speed max (%)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Cool head lift</td> <td>No</td> </tr> <tr> <td colspan="3">TEMPERATURE</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Bed</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Nozzle</td> <td>205</td> </tr> <tr> <td colspan="3">SUPPORT</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Support type</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Platform adhesion type</td> <td>Brim</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Brim width (mm)</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td colspan="3">MACHINE</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Nozzle size (mm)</td> <td>0,4</td> </tr> </table>	QUALITY	Layer height (mm)	0,2	SHELL	Wall thickness (mm)	1,2	MATERIAL	Retraction		Enable combing	ALL	Minimal extrusion before retracting (mm)	0,02	Z hop when retracting (mm)	0	Initial layer thickness (mm)	0,3	Initial layer line width (%)	100	Cut off object bottom (mm)	0	Dual extrusion overlap (mm)	0,15	FILL				Bottom / top thickness (mm)	1		Fill Density (%)	50	INFILL				Solid infill top	Yes		Solid infill bottom	Yes		Infill overlap (%)	10		Infill Pattern	Grid	SPEED (mm/s)				Print speed (mm/s)	60		Travel speed (mm/s)	120		Infill speed (mm/s)	60		Top / bottom speed (mm/s)	30		Outer wall speed (mm/s)	40		Inner shell speed (mm/s)	60	COOLING				Minimal layer time (s)	5		Enable cooling fan	Yes		Fan full on at height (mm)	0,4		Fan speed min (%)	10		Fan speed max (%)	100		Cool head lift	No	TEMPERATURE				Bed	60		Nozzle	205	SUPPORT				Support type	Yes		Platform adhesion type	Brim			Brim width (mm)	20	MACHINE				Nozzle size (mm)	0,4
		QUALITY	Layer height (mm)	0,2																																																																																																																			
		SHELL	Wall thickness (mm)	1,2																																																																																																																			
		MATERIAL	Retraction																																																																																																																				
			Enable combing	ALL																																																																																																																			
			Minimal extrusion before retracting (mm)	0,02																																																																																																																			
			Z hop when retracting (mm)	0																																																																																																																			
			Initial layer thickness (mm)	0,3																																																																																																																			
			Initial layer line width (%)	100																																																																																																																			
			Cut off object bottom (mm)	0																																																																																																																			
			Dual extrusion overlap (mm)	0,15																																																																																																																			
			FILL																																																																																																																				
				Bottom / top thickness (mm)	1																																																																																																																		
			Fill Density (%)	50																																																																																																																			
		INFILL																																																																																																																					
			Solid infill top	Yes																																																																																																																			
			Solid infill bottom	Yes																																																																																																																			
			Infill overlap (%)	10																																																																																																																			
			Infill Pattern	Grid																																																																																																																			
		SPEED (mm/s)																																																																																																																					
	Print speed (mm/s)	60																																																																																																																					
	Travel speed (mm/s)	120																																																																																																																					
	Infill speed (mm/s)	60																																																																																																																					
	Top / bottom speed (mm/s)	30																																																																																																																					
	Outer wall speed (mm/s)	40																																																																																																																					
	Inner shell speed (mm/s)	60																																																																																																																					
COOLING																																																																																																																							
	Minimal layer time (s)	5																																																																																																																					
	Enable cooling fan	Yes																																																																																																																					
	Fan full on at height (mm)	0,4																																																																																																																					
	Fan speed min (%)	10																																																																																																																					
	Fan speed max (%)	100																																																																																																																					
	Cool head lift	No																																																																																																																					
TEMPERATURE																																																																																																																							
	Bed	60																																																																																																																					
	Nozzle	205																																																																																																																					
SUPPORT																																																																																																																							
	Support type	Yes																																																																																																																					
	Platform adhesion type	Brim																																																																																																																					
		Brim width (mm)	20																																																																																																																				
MACHINE																																																																																																																							
	Nozzle size (mm)	0,4																																																																																																																					

Figura 168. Parámetros para herramienta principal y caja reguladora.

En el procesado de la herramienta principal (Figura 168) se destaca que esta y la tapa, se realiza de forma conjunta, para ello se ha dotado de 6 pestañas que hacen una unión rígida para que pueda ser procesado y cortado tras este. La ventaja se tiene en que todo el conjunto sufrirá las mismas variaciones de temperatura por lo que la tolerancia entre ambos elementos será más ajustada a la diseñada.

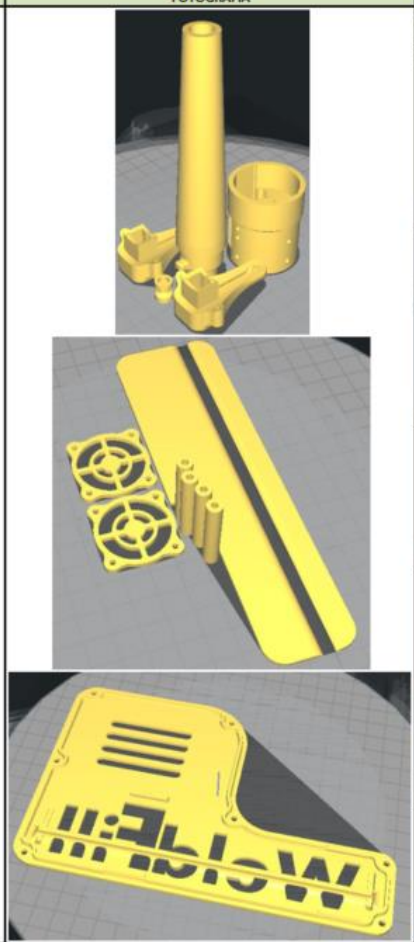
ID	FOTOGRAFÍA	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	
Accesorios y tapa celda principal		QUALITY	Layer height (mm) 0,12
		SHELL	Wall thickness (mm) 1,2
		MATERIAL	Retraction
			Enable combing ALL
			Minimal extrusion before retracting (mm) 0,02
			Z hop when retracting (mm) 0
			Initial layer thickness (mm) 0,3
			Initial layer line width (%) 100
			Cut off object bottom (mm) 0
			Dual extrusion overlap (mm) 0,15
		FILL	Bottom / top thickness (mm) 1
			Fill Density (%) 50
		INFILL	Solid infill top Yes
			Solid infill bottom Yes
			Infill overlap (%) 10
	Infill Pattern Concentric		
SPEED (mm/s)	Print speed (mm/s) 60		
	Travel speed (mm/s) 120		
	Infill speed (mm/s) 60		
	Top / bottom speed (mm/s) 30		
	Outer wall speed (mm/s) 40		
	Inner shell speed (mm/s) 60		
COOLING	Minimal layer time (s) 5		
	Enable cooling fan Yes		
	Fan full on at height (mm) 0,4		
	Fan speed min (%) 10		
	Fan speed max (%) 100		
	Cool head lift No		
TEMPERATURE	Bed 60		
	Nozzle 205		
SUPPORT	Support type Yes		
	Platform adhesion type		
	Brim		
	Brim width (mm) 102		
	2		
MACHINE	Nozzle size (mm) 0,4		

Figura 169. Parámetros de los restantes elementos del prototipo.

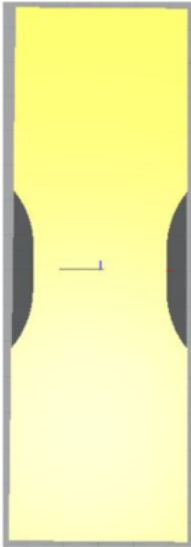
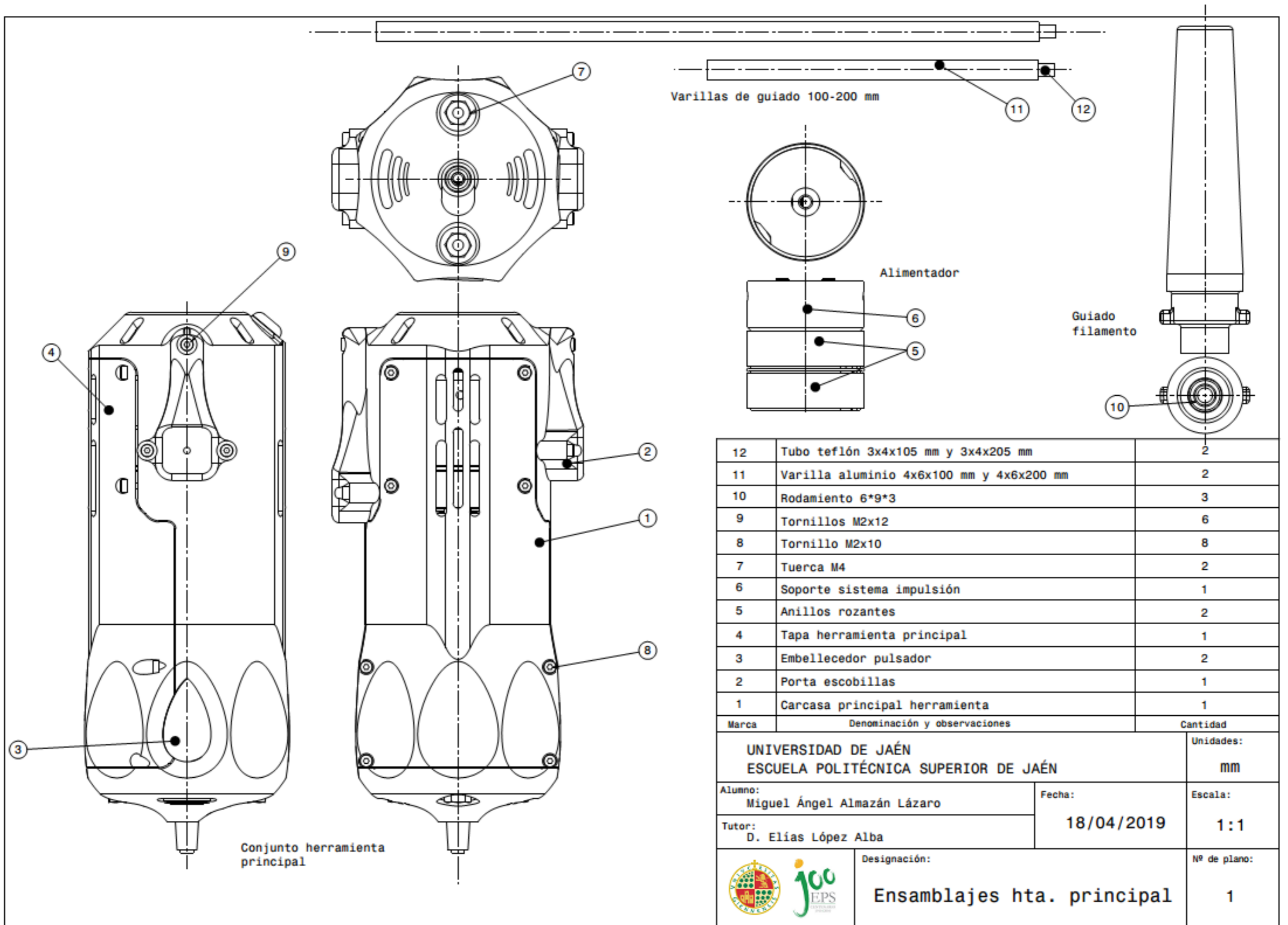
ID	FOTOGRAFÍA	PARÁMETROS DE IMPRESIÓN																							
Probeta a tracción		<table border="0"> <tr> <td>QUALITY</td> <td>Layer height (mm)</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>SHELL</td> <td>Wall thickness (mm)</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td rowspan="7">MATERIAL</td> <td>Retraction</td> <td></td> </tr> <tr> <td> Enable combing</td> <td>ALL</td> </tr> <tr> <td> Minimal extrusion before retracting (mm)</td> <td>0,02</td> </tr> <tr> <td> Z hop when retracting (mm)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td> Initial layer thickness (mm)</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td> Initial layer line width (%)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td> Cut off object bottom (mm)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td> Dual extrusion overlap (mm)</td> <td>0,15</td> </tr> </table>	QUALITY	Layer height (mm)	0,2	SHELL	Wall thickness (mm)	2	MATERIAL	Retraction		Enable combing	ALL	Minimal extrusion before retracting (mm)	0,02	Z hop when retracting (mm)	0	Initial layer thickness (mm)	0,3	Initial layer line width (%)	100	Cut off object bottom (mm)	0	Dual extrusion overlap (mm)	0,15
		QUALITY	Layer height (mm)	0,2																					
		SHELL	Wall thickness (mm)	2																					
		MATERIAL	Retraction																						
			Enable combing	ALL																					
			Minimal extrusion before retracting (mm)	0,02																					
			Z hop when retracting (mm)	0																					
			Initial layer thickness (mm)	0,3																					
			Initial layer line width (%)	100																					
			Cut off object bottom (mm)	0																					
		Dual extrusion overlap (mm)	0,15																						
		<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">FILL</td> <td>Bottom / top thickness (mm)</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Fill Density (%)</td> <td>100</td> </tr> </table>	FILL	Bottom / top thickness (mm)	1	Fill Density (%)	100																		
		FILL		Bottom / top thickness (mm)	1																				
			Fill Density (%)	100																					
		<table border="0"> <tr> <td rowspan="4">INFILL</td> <td>Solid infill top</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td>Solid infill bottom</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td>Infill overlap (%)</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Infill Pattern</td> <td>Lines</td> </tr> </table>	INFILL	Solid infill top	Yes	Solid infill bottom	Yes	Infill overlap (%)	0	Infill Pattern	Lines														
INFILL	Solid infill top	Yes																							
	Solid infill bottom	Yes																							
	Infill overlap (%)	0																							
	Infill Pattern	Lines																							
<table border="0"> <tr> <td rowspan="6">SPEED (mm/s)</td> <td>Print speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Travel speed (mm/s)</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Infill speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Top / bottom speed (mm/s)</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Outer wall speed (mm/s)</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>Inner shell speed (mm/s)</td> <td>60</td> </tr> </table>	SPEED (mm/s)	Print speed (mm/s)	60	Travel speed (mm/s)	120	Infill speed (mm/s)	60	Top / bottom speed (mm/s)	30	Outer wall speed (mm/s)	40	Inner shell speed (mm/s)	60												
SPEED (mm/s)		Print speed (mm/s)	60																						
		Travel speed (mm/s)	120																						
		Infill speed (mm/s)	60																						
		Top / bottom speed (mm/s)	30																						
		Outer wall speed (mm/s)	40																						
	Inner shell speed (mm/s)	60																							
<table border="0"> <tr> <td rowspan="5">COOLING</td> <td>Minimal layer time (s)</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Enable cooling fan</td> <td>Yes</td> </tr> <tr> <td>Fan full on at height (mm)</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>Fan speed min (%)</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Fan speed max (%)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Cool head lift</td> <td>No</td> <td></td> </tr> </table>	COOLING	Minimal layer time (s)	5	Enable cooling fan	Yes	Fan full on at height (mm)	0,4	Fan speed min (%)	10	Fan speed max (%)	100	Cool head lift	No												
COOLING		Minimal layer time (s)	5																						
		Enable cooling fan	Yes																						
		Fan full on at height (mm)	0,4																						
		Fan speed min (%)	10																						
	Fan speed max (%)	100																							
Cool head lift	No																								
<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">TEMPERATURE</td> <td>Bed</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>Nozzle</td> <td>205</td> </tr> </table>	TEMPERATURE	Bed	60	Nozzle	205																				
TEMPERATURE		Bed	60																						
	Nozzle	205																							
<table border="0"> <tr> <td rowspan="3">SUPPORT</td> <td>Support type</td> <td>None</td> </tr> <tr> <td>Platform adhesion type</td> <td>Skirt</td> </tr> <tr> <td>Skirt width (mm)</td> <td>2</td> </tr> </table>	SUPPORT	Support type	None	Platform adhesion type	Skirt	Skirt width (mm)	2																		
SUPPORT		Support type	None																						
		Platform adhesion type	Skirt																						
	Skirt width (mm)	2																							
<table border="0"> <tr> <td>MACHINE</td> <td>Nozzle size (mm)</td> <td>0,4</td> </tr> </table>	MACHINE	Nozzle size (mm)	0,4																						
MACHINE	Nozzle size (mm)	0,4																							

Figura 170. Parámetros de impresión de probetas.

19. Planos

A continuación, se muestran la geometría de todos los componentes que forman el prototipo propuesto. Los planos adjuntos no aportarán toda la información necesaria para realizar un diseño exhaustivo y unívoco de los componentes. Es decir, el objetivo de los planos no es poder fabricar de forma unívoca el prototipo, ya que esa información se encuentra en los modelos 3D, sino servir como apoyo para entender el funcionamiento de la herramienta. Dicha consideración está lo suficientemente justificada en cuanto a que el procedimiento de fabricación requiere la información en *.stl y es procesada mediante técnicas aditivas.

*Se adjuntan los *.stl de todos los archivos necesarios para su fabricación*




12	Tubo teflón 3x4x105 mm y 3x4x205 mm	2
11	Varilla aluminio 4x6x100 mm y 4x6x200 mm	2
10	Rodamiento 6*9*3	3
9	Tornillos M2x12	6
8	Tornillo M2x10	8
7	Tuerca M4	2
6	Soporte sistema impulsión	1
5	Anillos rozantes	2
4	Tapa herramienta principal	1
3	Embellecedor pulsador	2
2	Porta escobillas	1
1	Carcasa principal herramienta	1

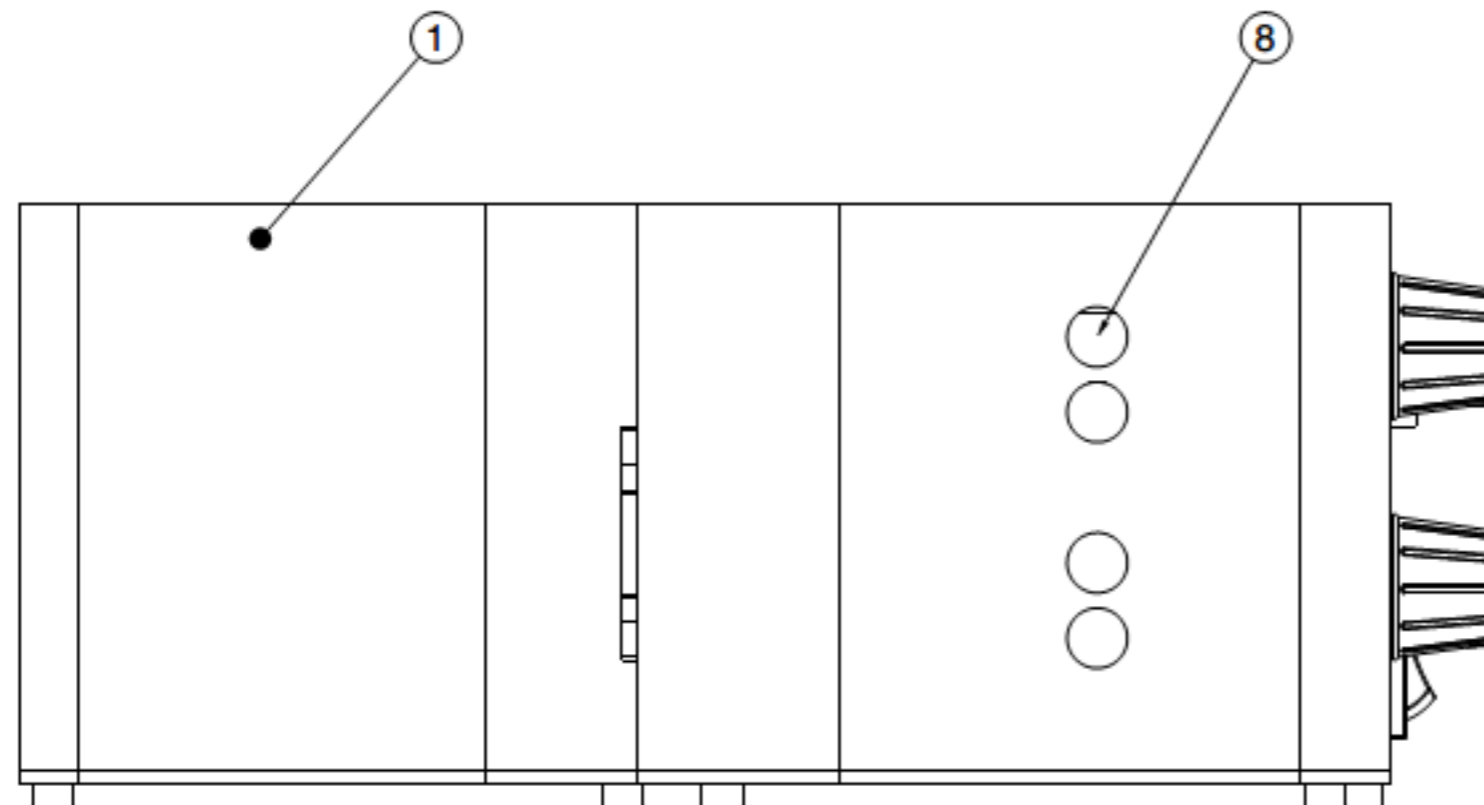
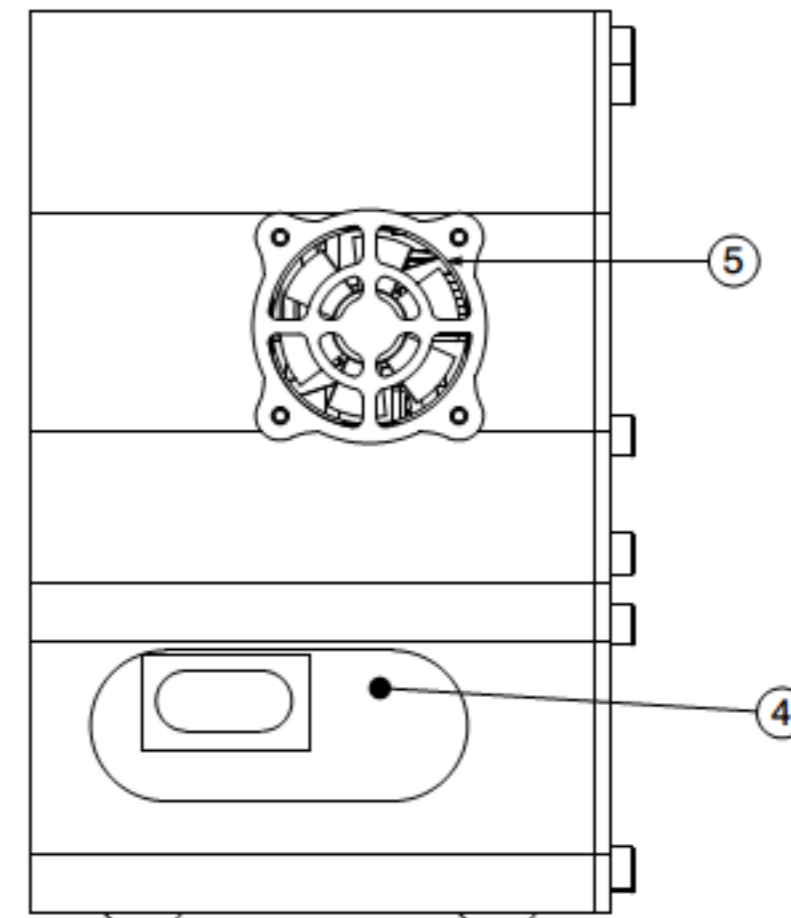
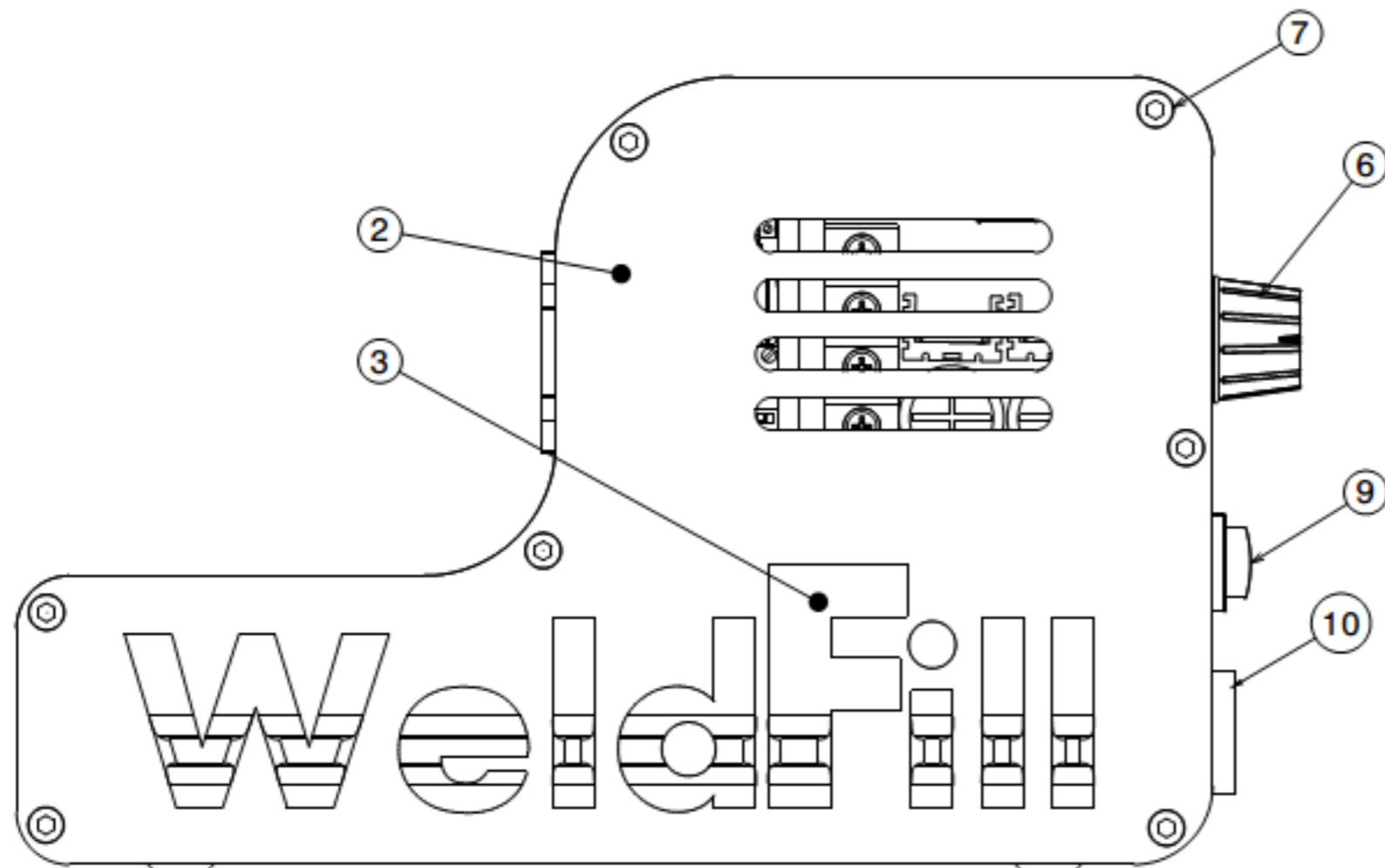
Marca	Denominación y observaciones	Cantidad
-------	------------------------------	----------

UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
-------------------------------------------------------------	--	-----------------

Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:1
----------------------------------------	----------------------	----------------

Tutor: D. Elías López Alba		
-------------------------------	--	--

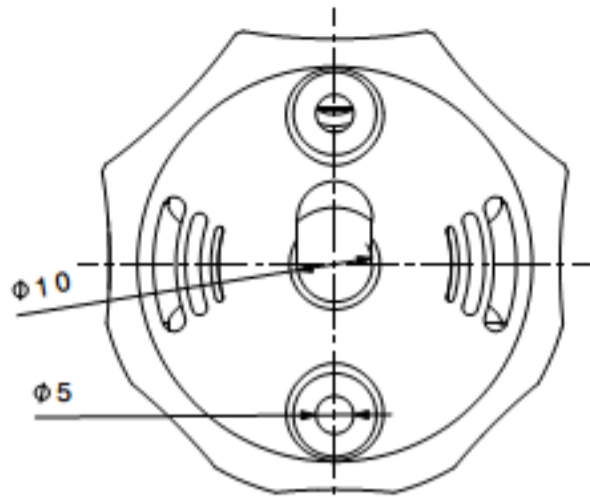
	Designación: Ensamblajes hta. principal	Nº de plano: 1
---------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------	-------------------



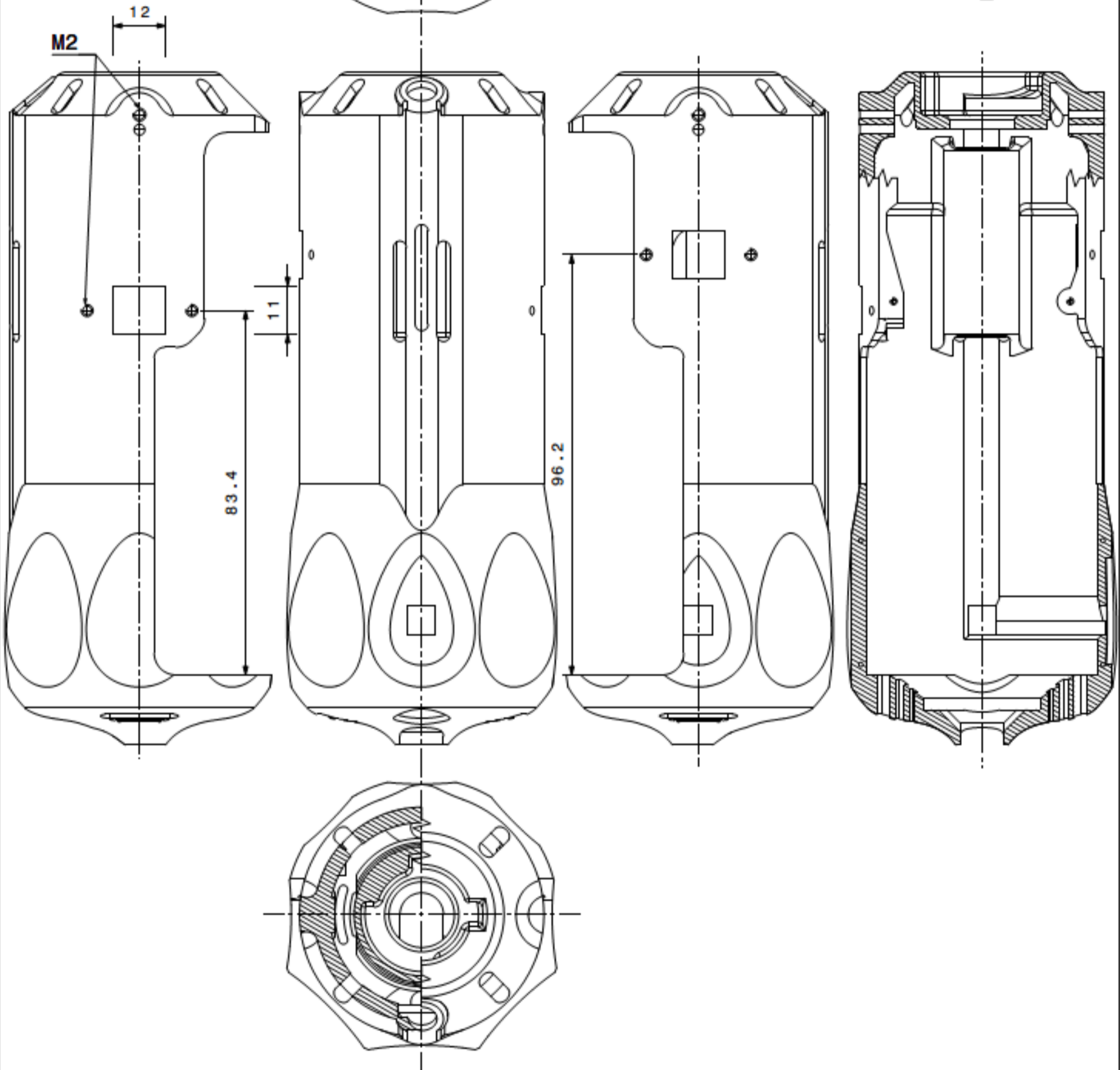
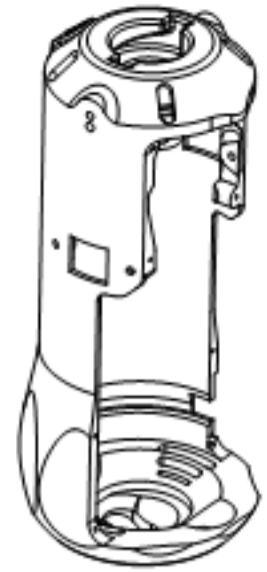
10	Pasa cables	1
9	Interruptor general sistema	1
8	Alojamiento conector magnético	4
7	Tornillo M3x12	7
6	Reguladores PWM	2
5	Rejilla ventilador	1
4	Fuente de alimentación	1
3	Embellecedor logo	1
2	Tapa	1
1	Carcasa principal	1

Marca	Denominación y observaciones	Cantidad
UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:1
Tutor: D. Elías López Alba	Designación: Ensamblaje Caja reguladora	Nº de plano: 2



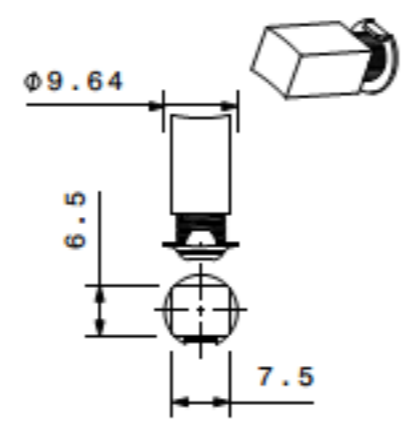
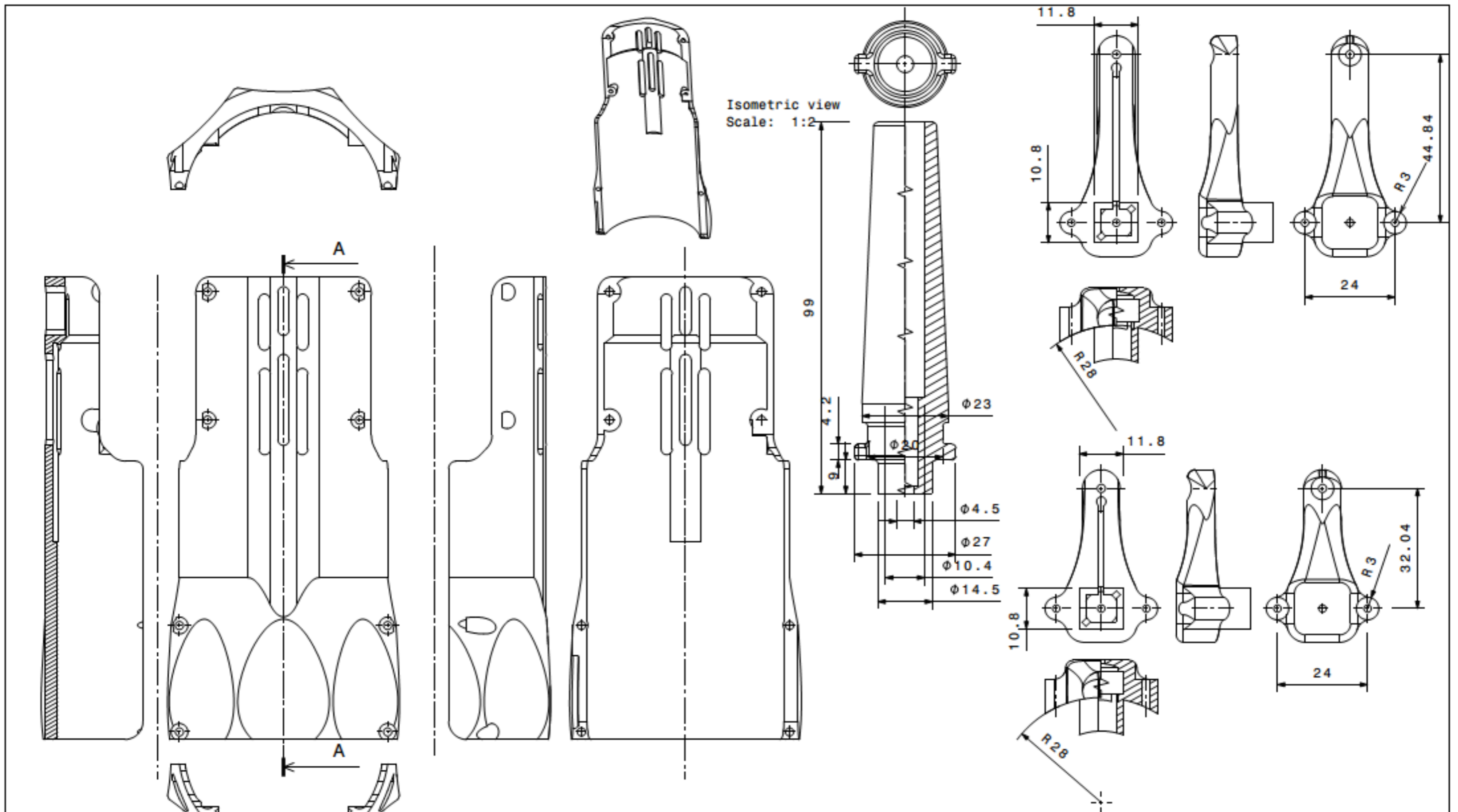



Isometric view
Scale: 1:2

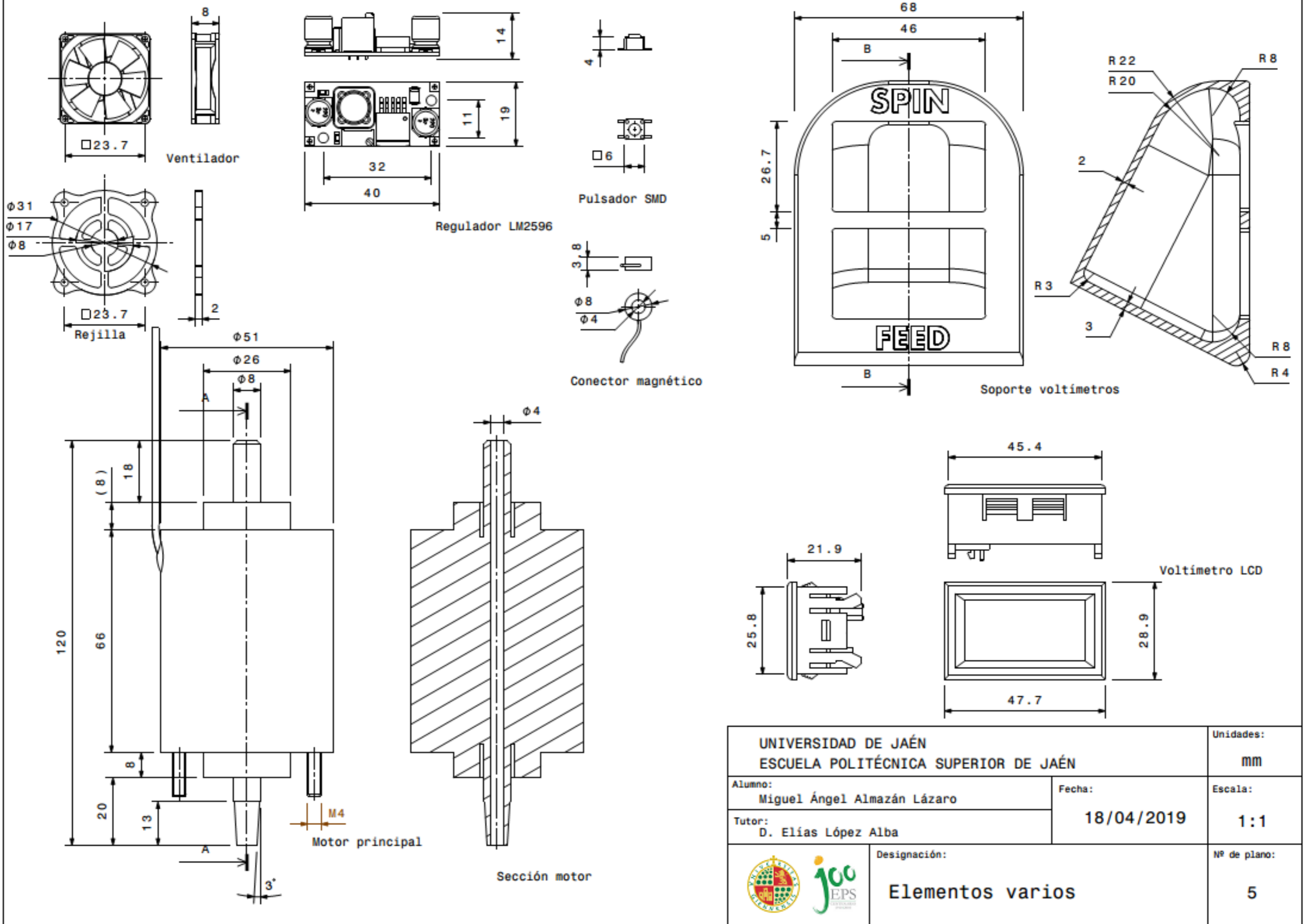


UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:1
Tutor: D. Elías López Alba	Designación: Carcasa hta. principal	Nº de plano: 3

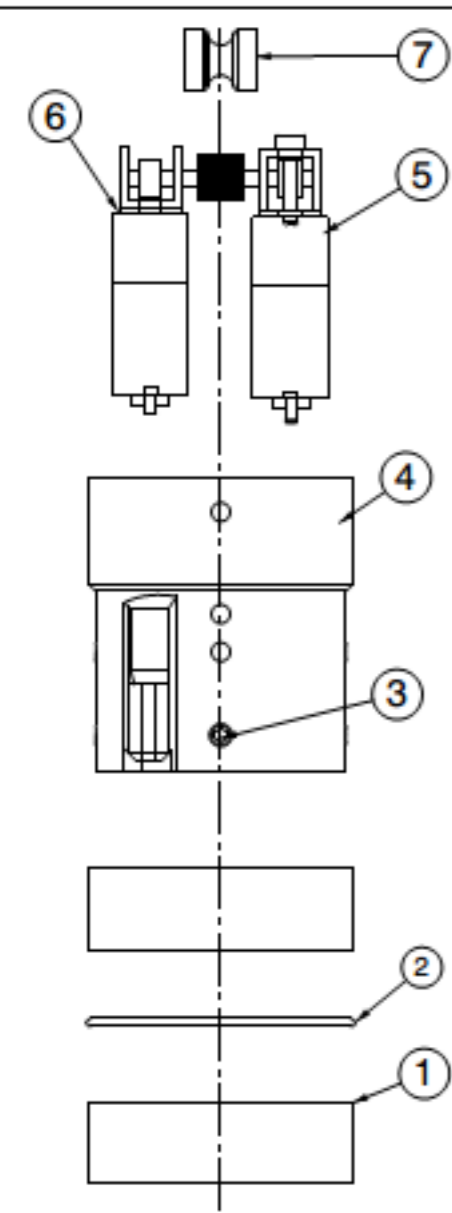




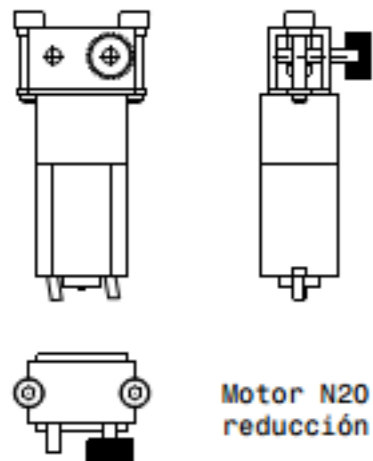
UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:1
Tutor: D. Elías López Alba	Nº de plano: 4	
		Designación: Tapa, suplemento de guiado y escobillas



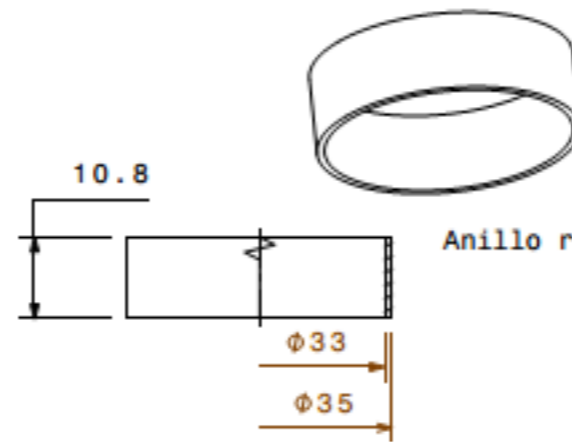
UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUOLA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:1
Tutor: D. Elías López Alba	Designación: Elementos varios	Nº de plano: 5



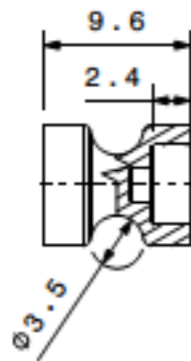
Sistema impulsión explosionado



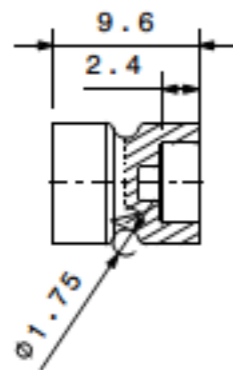
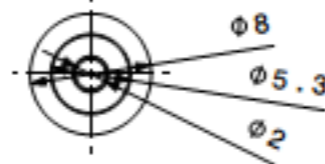
Motor N20 con reducción invertida



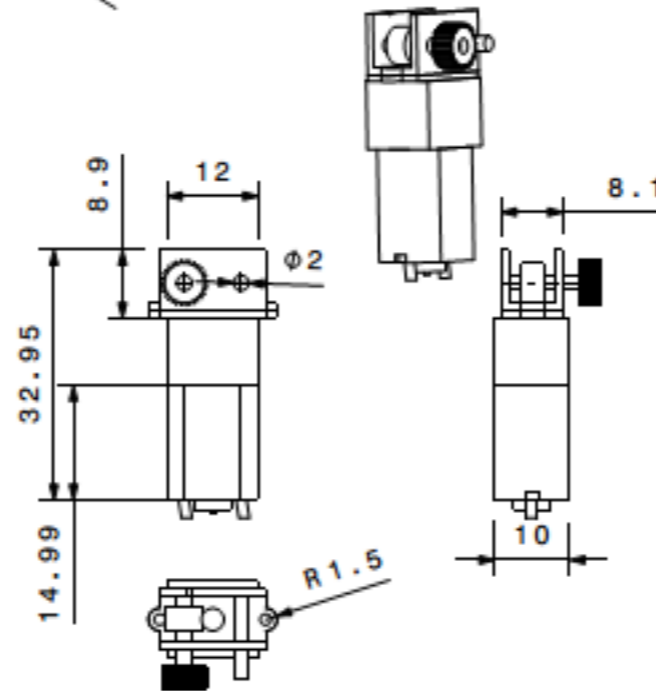
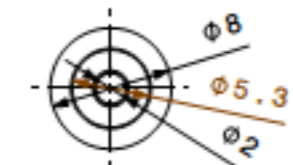
Anillo rozante (cobre)



Contra apoyo filamento 3 mm (2:1)

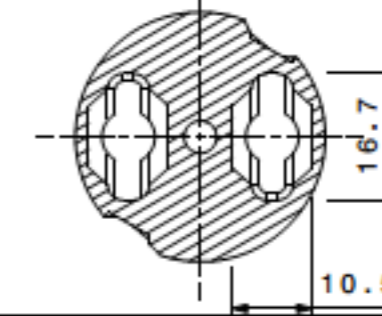
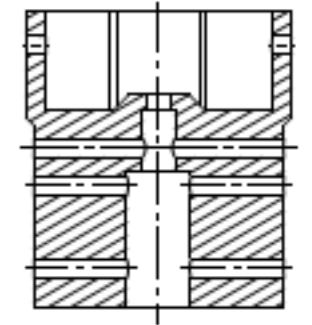
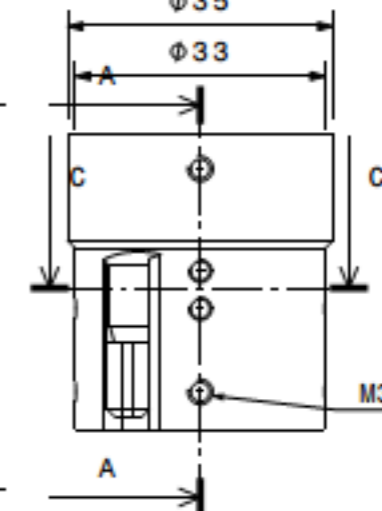
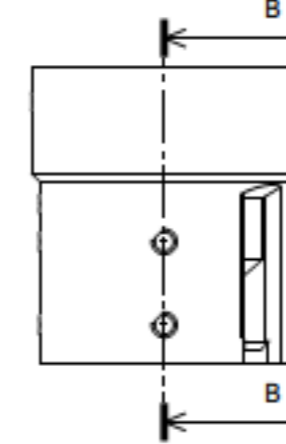
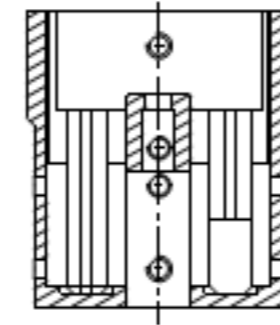
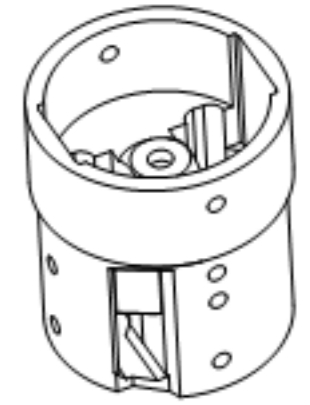


Contra apoyo filamento 1.75 mm (2:1)



Motor N20 con reducción

Muesca para soldadura



7	Contra apoyo filamento 1.75 - 3 mm	1
6	Conjunto motor reductor	1
5	Conjunto motor reductor invertido	1
4	Soporte impulsión (PLA)	1
3	Prisionero M3x5	6
2	Junta tórica 30x1 mm	1
1	Anillo rozante (cobre)	2
Marca	Denominación y observaciones	Cantidad

UNIVERSIDAD DE JAÉN
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

Unidades:

mm

Alumno:
Miguel Ángel Almazán Lázaro

Fecha:

Escala:

Tutor:
D. Elías López Alba

18/04/2019

1:1

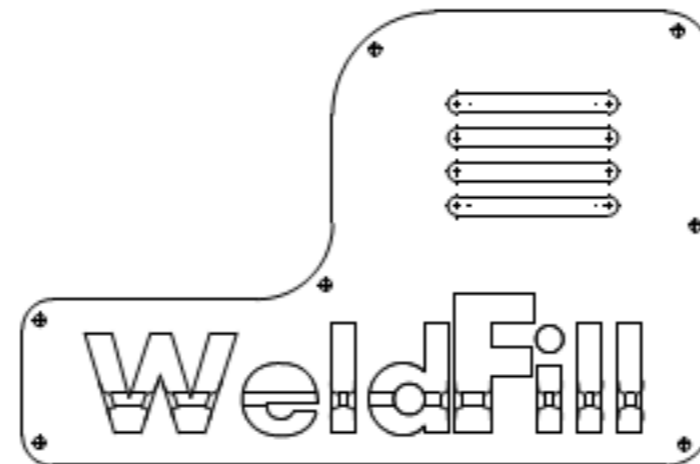
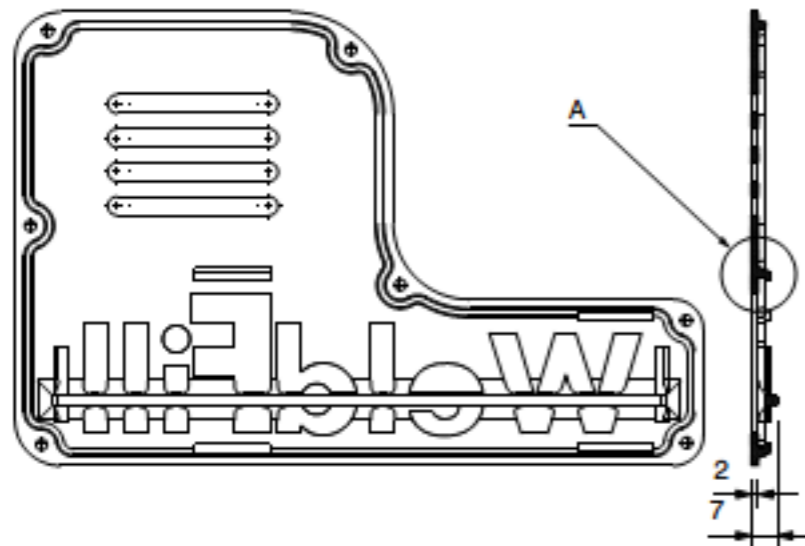
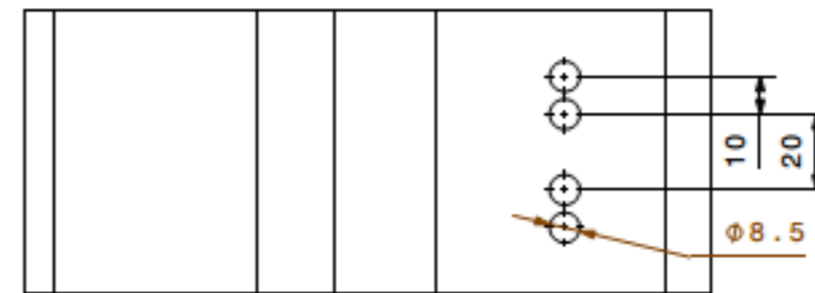
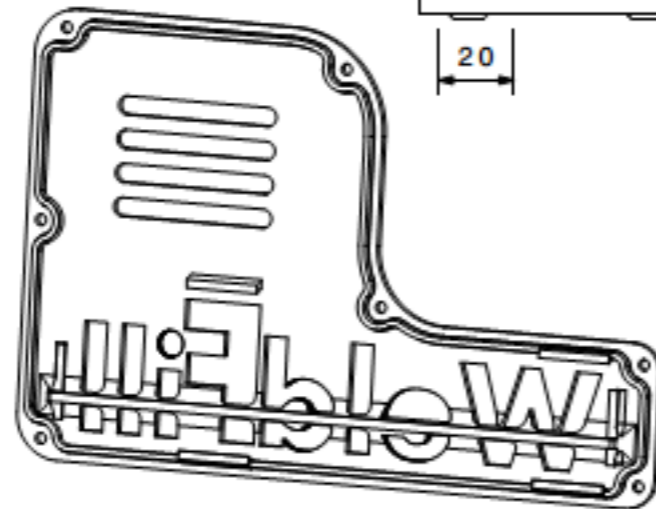
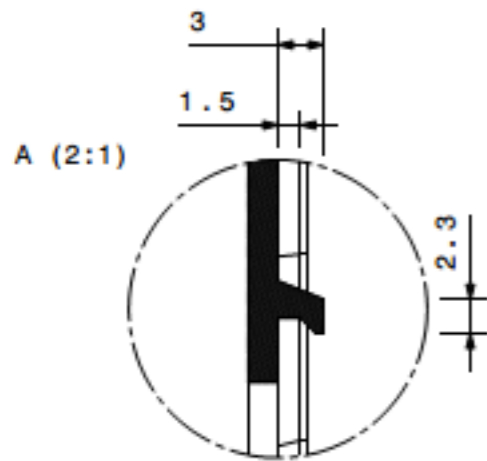
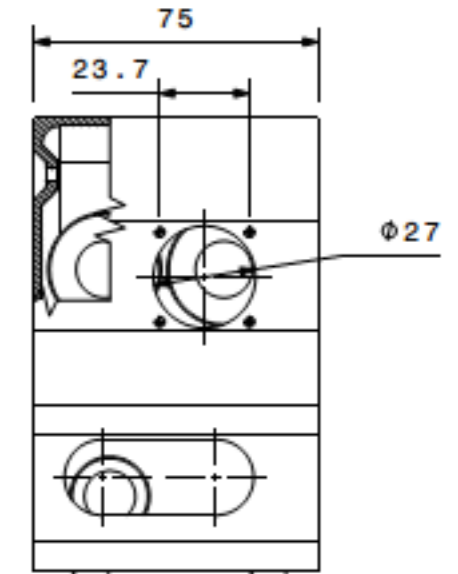
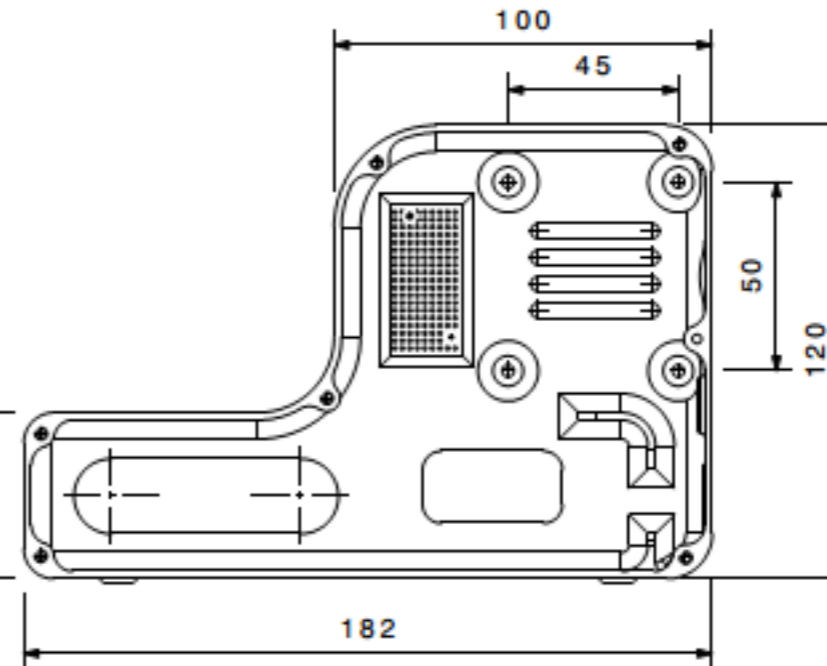
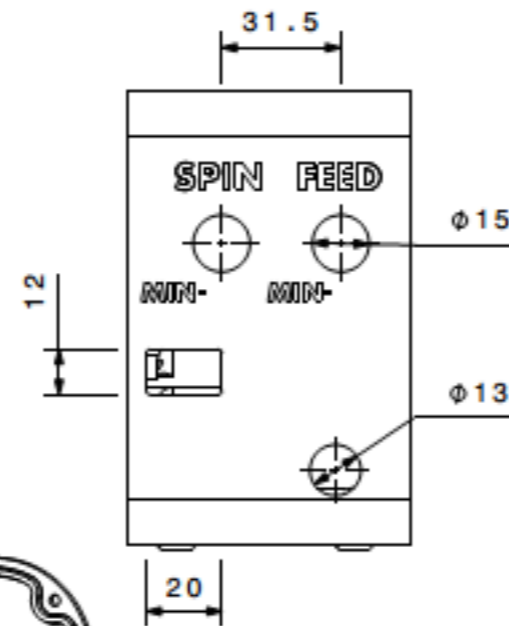
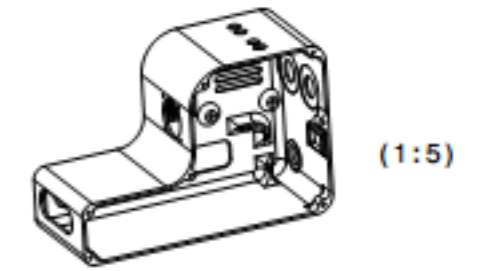
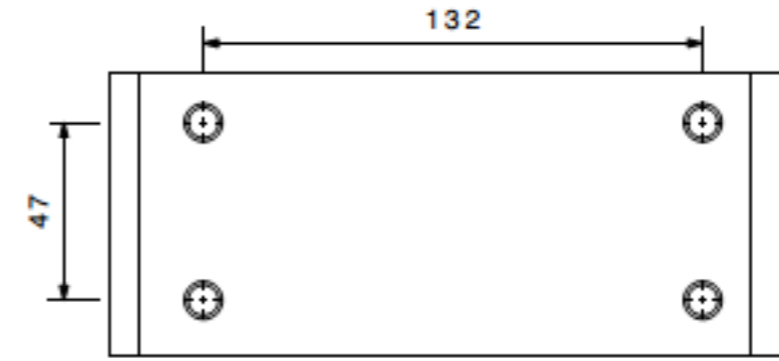
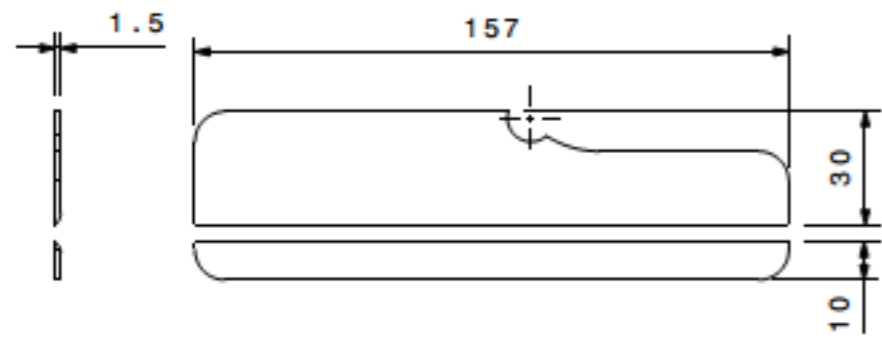


Designación:

Conjunto impulsor
filamento

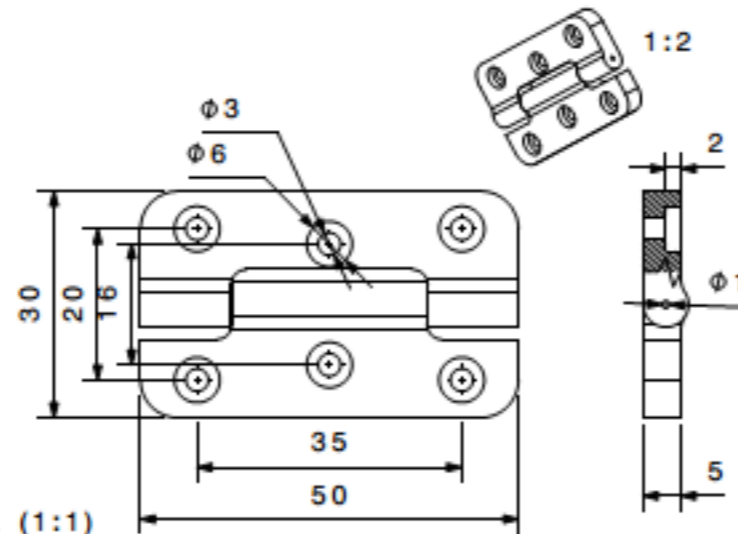
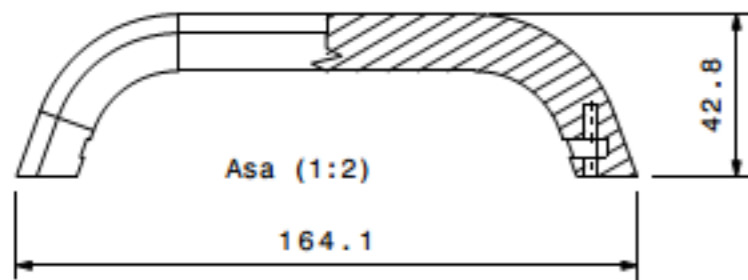
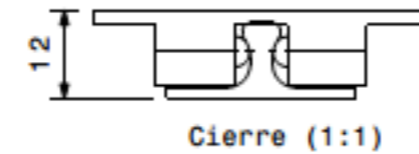
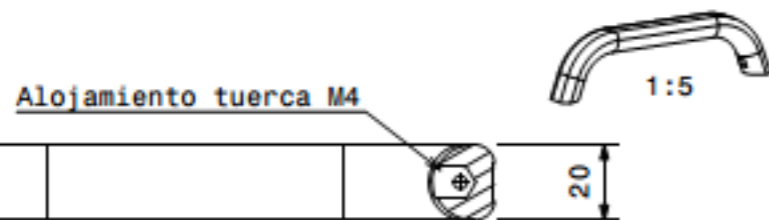
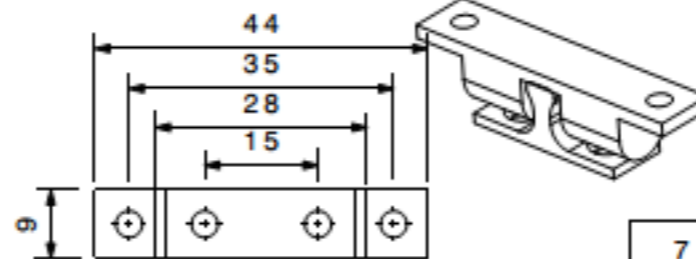
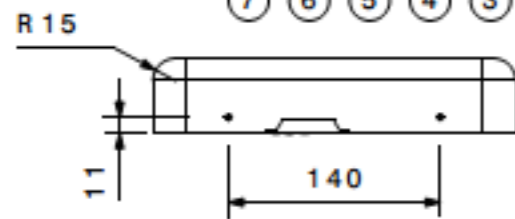
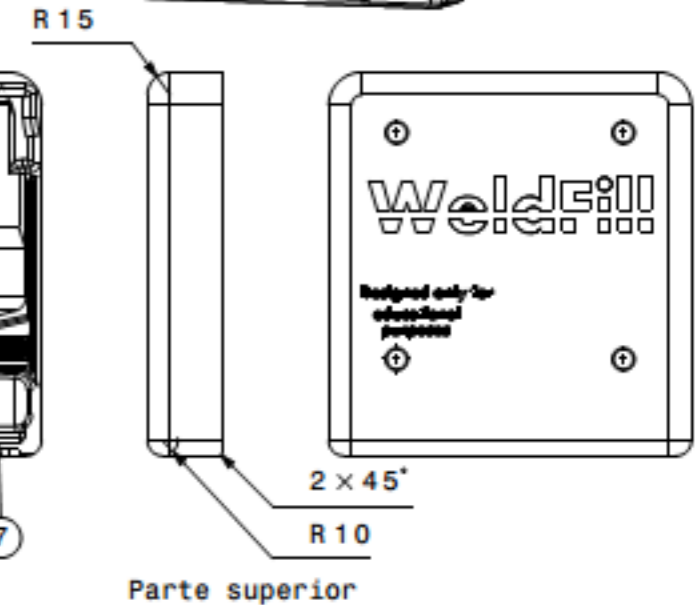
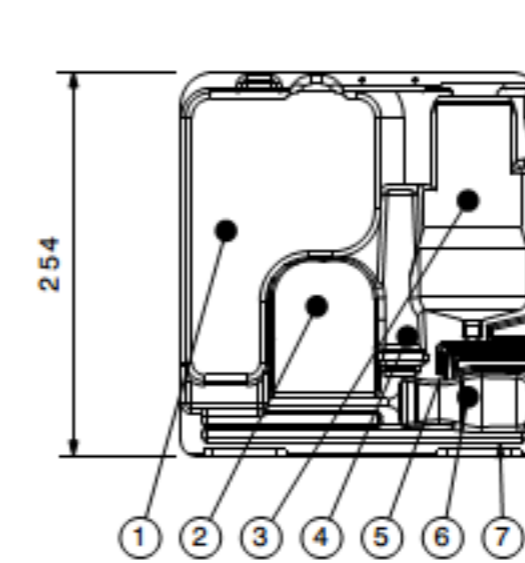
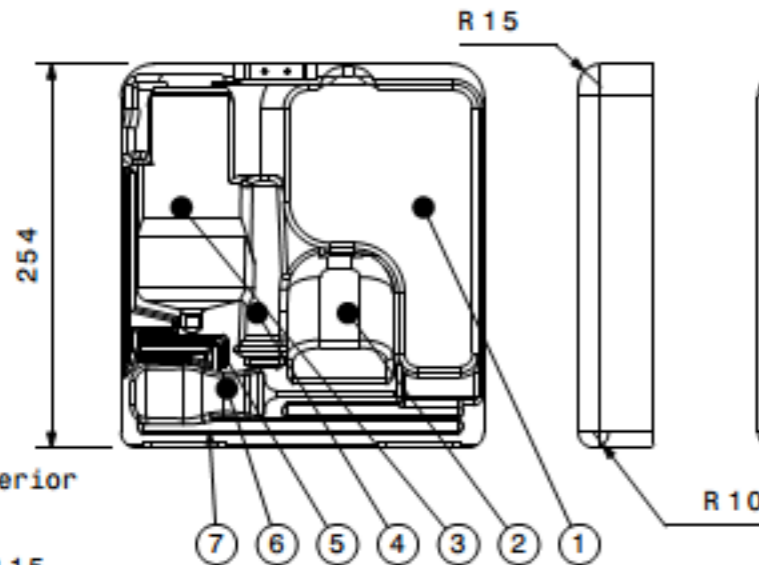
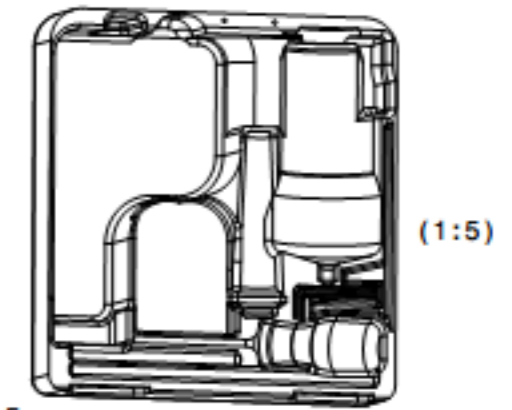
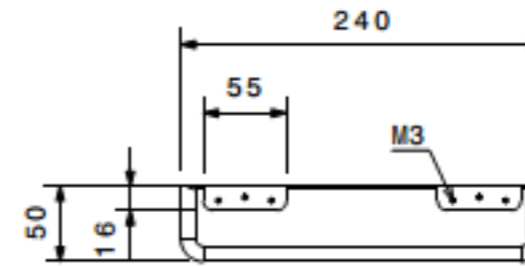
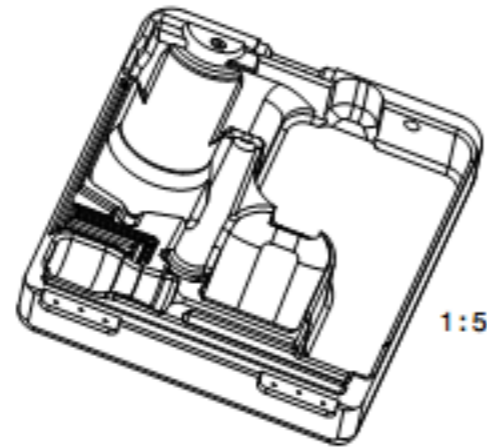
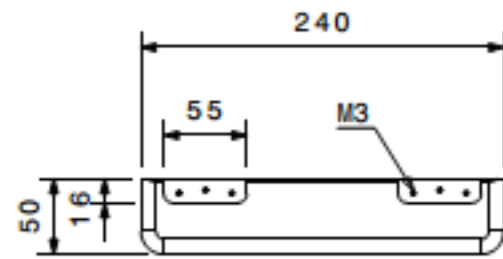
Nº de plano:

6



UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN		Unidades: mm
Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro	Fecha: 18/04/2019	Escala: 1:2
Tutor: D. Elías López Alba	Designación: Caja reguladora, tapa y embellecedor	Nº de plano: 7





7	Alojamiento barras de guiado	2
6	Alojamiento destornillador +	1
5	Alojamiento llaves allen	2
4	Alojamiento suplemento guiado	1
3	Alojamiento Herramienta principal	1
2	Alojamiento voltímetros	1
1	Alojamiento caja reguladora	1
Marca	Denominación y observaciones	Cantidad

UNIVERSIDAD DE JAÉN
 ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

Alumno: Miguel Ángel Almazán Lázaro
 Fecha: 18/04/2019

Tutor: D. Elías López Alba

Designación: Maletín de transporte, cierre, bisagra y asa

Nº de plano: 8



20. Bibliografía

- [1] I. Gibson, R. D.W., y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*. .
- [2] P. J. Bártolo, *Stereolithography. Materials, Processes and Applications*, Springer. 2011.
- [3] D. Heesom y L. Mahdjoubi, «Trends of 4D CAD applications for construction planning Trends of 4D CAD applications for construction planning», n.º January 2015, pp. 37-41, 2010.
- [4] K. W. Chau, M. Anson, y J. P. Zhang, «Four-Dimensional Visualization of Construction Scheduling and Site Utilization», n.º August, pp. 598-606, 2004.
- [5] T. Grimm, *User's Guide to Rapid Prototyping*. .
- [6] E. Filos, «Manufacturing Innovation and Horizon 2020», n.º October, 2013.
- [7] P. Taylor *et al.*, «Virtual and Physical Prototyping Virtual prototyping and manufacturing planning by using tri-dexel models and haptic force feedback Virtual prototyping and manufacturing planning by using tri-dexel models and haptic force feedback», n.º January 2015, pp. 37-41, 2007.
- [8] T. Dietmar, R. Stefan, y S. Andreas, «Challenges for Digital Product and Process Design Systems at BMW». .
- [9] ESAB, *Technical Handbook: Friction Stir Welding*. .
- [10] R. S. Mishra y M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*. 2007.
- [11] D. Lohwasser y Z. Chen, *Friction stir welding. From Basics to Applications*. .
- [12] F. Edition y M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing. Material, Processes, and Systems*, 4.^a ed. .
- [13] I. Gibson, D. W. Rosen, y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies. Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. .
- [14] M. D. Espín, «Aportaciones al conocimiento sobre la fabricación aditiva con la tecnología Fused Deposition Modeling».
- [15] M. Engineering y K. U. Leuven, «Binding mechanisms in selective laser sintering

- and selective laser melting», vol. 1, pp. 26-36, 2005.
- [16] D. D. Kopeliovich y Substech, «Plastics welding». [En línea]. Disponible en: www.substech.com.
- [17] M. Rojek y J. Stabik, «Handbook of Plastics Joining Hot Gas Welding», vol. 41, 2010, pp. 40-47.
- [18] Lanxess, «Hot Plate Welding», 2018. [En línea]. Disponible en: www.lanxess.com.
- [19] C. B. Bucknall, I. C. Drinkwater, G. R. Smith, y B. M. K. Oal, «Hot Plate Welding of Plastics: Factors Affecting Weld Strength», vol. 20, n.º 6, 1980.
- [20] J. Guo, «Solid-State Welding Processes in Manufacturing», pp. 1-21, 2014.
- [21] N. Kumar, Y. Wei, y R. S. Mishra, *Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials Friction Stir Welding of Dissimilar Alloys and Materials*. Elsevier, 2015.
- [22] M. Kazem Besharati Givi y P. Asadi, *Advances in Friction Stir Welding and Processing*. 2014.
- [23] *Welding processes handbook*. 2003.
- [24] H. S. Arora, S. Mridha, y H. S. Grewal, «Controlling the length scale and distribution of the ductile phase in metallic glass composites through friction stir processing», vol. 035011.
- [25] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, y J. C. Needham, «Improvements Relating to Friction Welding», 1195.
- [26] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, y P. M. G. P. Moreira, «Effect of friction stir welding parameters with newly developed tool for lap joint of dissimilar polymers», *Procedia Eng.*, vol. 114, pp. 199-207, 2015.
- [27] P. Surendrababu, A. Gopala Krishna, y C. Srinivasa Rao, «Material Flow Behaviour in Friction Stir Welding Process-A Critical Review on Process Parameters and Modeling Methodologies», *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. Website www.ijetae.com ISO Certif. J.*, vol. 3, n.º 6, pp. 219-225, 2013.

- [28] A. Paoletti, F. Lambiase, y A. Di Ilio, «Analysis of forces and temperatures in friction spot stir welding of thermoplastic polymers», 2015.
- [29] W. R. Longhurst *et al.*, «Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B : Journal of Engineering Manufacture», 2010.
- [30] Y. Bozkurt, «The optimization of friction stir welding process parameters to achieve maximum tensile strength in polyethylene sheets», *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 440-445, 2012.
- [31] N. Kumar, R. S. Mishra, y J. A. Baumann, *Residual Stresses in Friction Stir Welding*. 2014.
- [32] S. H. Dashatan, T. Azdast, S. R. Ahmadi, y A. Bagheri, «Friction stir spot welding of dissimilar polymethyl methacrylate and acrylonitrile butadiene styrene sheets», *J. Mater.*, vol. 45, pp. 135-141, 2013.
- [33] M. Pacchione y D. Lohwasser, «Friction stir welding application to aircraft primary structures», *Aircr. Des. Princ. PR0407463, airbus*, 2004.
- [34] M. Kumagai y S. Tanaka, «Properties of aluminum wide panels by friction stir welding», *1st Int. Symp. Frict. Stir Welding, Thousand oaks, CA, USA, June 14–16*, p. 1999, 1999.
- [35] R. Talwar, D. Bolser, R. . Lederich, y J. Baumann, «Friction stir welding of airframe structures», *2nd Int. FSW Symp. gothenburg, Sweden, June 26–28*, 2000.
- [36] P. J. Haagensen, O. T. Midlin, y M.Rane, «Fatigue performance of friction stir butt welds in a 6000 series aluminum allo», *Comput. methods Exp. Meas. Surf. Treat. Eff. II*, vol. 8, pp. 589-598, 1995.
- [37] K. J. Colligan, J. . Pickens, y J. Xu, «Welding tool and process parameter effects in friction stir welding of aluminum alloys», *Frict. Stir Weld. Process. II, Jata, K.V., Mahoney, M.W., lienert, T.J. Mishra, R.S., Ed. TMS, 181–190*, p. 2003, 2003.
- [38] D. Lohwasser, «Friction Stir Welding in A350», *EADS Res. Work. aiRBUS*, n.º november, p. 2005, 2005.

- [39] D. Li *et al.*, «Fatigue property of stationary shoulder friction stir welded additive and non-additive T joints», vol. 1718, n.º January, 2016.
- [40] K. COLLIGAN, «Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum», *Suppl. TO Weld. J.*, n.º July, pp. 229-237, 1999.
- [41] A. Zafar, M. Awang, y S. R. Khan, «Friction Stir Welding of Polymers: An Overview», pp. 19-37.
- [42] M. K. Bilici y A. I. Yüklér, «Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets», *Mater. Des.*, vol. 33, n.º 1, pp. 145-152, 2012.
- [43] T. Taavitsainen, P. Vilaça, y T. Mutanen, «Production by FSW of free-shape hollow box profile in AA5754 for automotive application», *Weld. World*, 2016.
- [44] H. S. Arora, H. Singh, y B. K. Dhindaw, «Composite fabrication using friction stir processing — a review», pp. 1043-1055, 2012.
- [45] P. H. F. Oliveira, S. T. Amancio-filho, J. F. Santos, y E. H. Jr, «Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA», *Mater. Lett.*, vol. 64, n.º 19, pp. 2098-2101, 2010.
- [46] F. Simões y D. M. Rodrigues, «Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: literature review, experimental results and empirical analysis», *J. Mater.*, 2013.
- [47] P. Taylor, A. Scialpi, M. Troughton, S. Andrews, y L. A. C. De Filippis, «Viblade™: friction stir welding for plastics», n.º November 2014, pp. 37-41.
- [48] K. Labastie-coeyrehourcq, «Étude de méthodes d ' analyse rapides de la structure moléculaire du polyéthylène To cite this version: HAL Id: tel-00443616», 2009.
- [49] S. R. Strand, «Effects of Friction Stir Welding on Polymer Microstructure», 2004.
- [50] S. Saeedy y M. K. B. Givi, «Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part B: Journal of Engineering Manufacture Investigation of the effects of critical process parameters», 2011.

- [51] A. Arici y S. Selale, «Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene», vol. 12, n.º 6, pp. 536-539, 2007.
- [52] U. States, «Effects of double passes of the tool on friction stir welding», vol. 0, pp. 3313-3316, 2005.
- [53] P. Taylor, M. Aydin, y M. Aydin, «Polymer-Plastics Technology and Engineering Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on the Friction Stir Welding of UHMW-Polyethylene Effects of Welding Parameters and Pre-Heating on the Friction Stir Welding of UHMW-Polyethylene», n.º August 2014, pp. 37-41, 2010.
- [54] E. A. Squeo, G. Bruno, A. Guglielmotti, y F. Quadrini, «Friction Stir Welding of Polyethylene Sheets», *Ann. "dunărea jos" Univ. Galați Fascicle, Technol. Mach. Build.*, pp. 241-246, 2009.
- [55] K. Panneerselvam y K. Lenin, «Effects and defects of the polypropylene plate for different parameters in friction stir welding process», pp. 143-152, 2013.
- [56] K. Panneerselvam y K. Lenin, «Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile», *J. Mater.*, vol. 53, pp. 302-307, 2014.
- [57] A. Mostafapour y E. Azarsa, «A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure , tensile and flexural properties», *Int. J. Phys. Sci. Vol. 7*, vol. 7, n.º 4, pp. 647-654, 2012.
- [58] M. A. Rezgui, M. Ayadi, A. Cherouat, K. Hamrouni, A. Zghal, y S. Bejaoui, «Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene», vol. 07003, pp. 1-8, 2010.
- [59] Z. Kiss y T. Czigány, «Microscopic analysis of the morphology of seams in friction stir welded polypropylene», vol. 6, n.º 1, pp. 54-62, 2012.
- [60] Z. Kiss y T. Czigány, «Effect of Welding Parameters on the Heat Affected Zone and the Mechanical Properties of Friction Stir Welded Poly(ethylene-terephthalate-glycol)», *J. Appl. Polym. Sci. DOI 10.1002*, 2012.
- [61] A. Bagheri, T. Azdast, y A. Doniavi, «An experimental study on mechanical

- properties of friction stir welded ABS sheets», *J. Mater.*, vol. 43, pp. 402-409, 2013.
- [62] S. Eslami, P. J. Tavares, y P. M. G. P. Moreira, «Fatigue Life Assessment of Friction Stir welded Dissimilar Polymers», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 1433-1438, 2017.
- [63] W. J. Arbegast, «A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding», vol. 58, pp. 372-376, 2008.
- [64] O. Lorrain, V. Favier, H. Zahrouni, y D. Lawrjaniec, «Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 210, pp. 603-609, 2010.
- [65] L. C, «Material flow in friction stir welding», *Microsc Microanal* 14(S3):87–90, 2008.
- [66] P. A. Colegrove y H. R. Shercliff, «Two-dimensional CFD modelling of flow round profiled FSW tooling», *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 9, n.º 6, pp. 483-492, 2005.
- [67] Z. A, «Visual analysis of material flow during friction stir welding of nylon-6», *ARPN J Eng Appl Sci* 1113309–13312, 2006.
- [68] S. F, W. Q, y W. T, «The effects of crystallinity on the mechanical properties and the limiting PV (pressure velocity) value of PTFE.», *Tribon Int* 93, vol. Part A, pp. 1-10, 2016.
- [69] W. D, «Tribological evaluation of surface modified H13 tool steel in warm forming of Ti-6Al-4 V titanium alloy sheet», *Chin J Aeronaut* 27(4)1002–1009, vol. 27, 2014.
- [70] H. W. Starkweather, G. E. Moore, E. Hansen, T. M. Roder, y R. E. Brooks, «Effect of Crystallinity on the Properties of Nylons», vol. XXI, pp. 189-204, 1956.
- [71] J. Gao, Y. Shen, J. Zhang, y H. Xu, «Submerged Friction Stir Weld of Polyethylene Sheets», vol. 41059, pp. 1-8, 2014.
- [72] M. Ghaemy, M. R. Hadjmohammadi, y R. Tabaraki, «Study of Crystallinity of High-density Polyethylene by Inverse Gas Chromatography», vol. 9, n.º 2, pp.

117-124, 2000.

- [73] C. Millot, L. F. Olivier, L. Paul, y R. Seguela, «Assessment of polyamide-6 crystallinity by DSC Temperature dependence of the melting enthalpy», *J. Therm. Anal. Calorim.*, 2015.
- [74] M. AM&T, «How to Select Carbon Brushes for Motors and Generators ®».
- [75] Cimsamex, «Guía de especificaciones para escobillas de carbón».
- [76] www.mersen.com, «TECHNICAL DATA SHEET PRESSURE ON CARBON BRUSHES», pp. 1-4.
- [77] V. S. Nagarajan y V. Rajini, *Electrical Machine Design*.
- [78] «SuperMagnet». [En línea]. Disponible en: <https://www.supermagnete.de>.
- [79] Vectric, «Aspire». [En línea]. Disponible en: <https://www.vectric.com/products/aspire>.
- [80] «Velleman». [En línea]. Disponible en: <https://www.velleman.eu/>.
- [81] «AdSIRO». [En línea]. Disponible en: <http://www.adsiro.com/>.
- [82] «Hitachi». [En línea]. Disponible en: <http://www.hitachi.eu/es-es>.
- [83] «Bosch». [En línea]. Disponible en: <https://www.bosch-professional.com/es/es/>.
- [84] BQ, «PLA Filament 1.75 mm», p. 75.
- [85] A. N. Standard, «ASW B4.0:2007. Standard Methods for Mechanical Testing of Welds». 2007.
- [86] P. Materials, E. I. Materials, P. Matrix, C. Materials, y P. Specimens, «Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1», n.º January, pp. 1-15, 2004.
- [87] U. P. de Catalunya, «Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM», 2017.
- [88] K. Weman, *Welding processes handbook*. CRC Press, 2003.
- [89] T. F. I. N. D. E. Grado, «Propiedades mecánicas de componentes fabricados

mediante modelado por deposición fundida», 2017.

- [90] P. L. A. Ultimaker, N. Pla, E. Pla, y A. No, «Ficha de datos técnicos PLA», pp. 1-3, 2008.
- [91] A. Overview y N. E. Methods, «An Overview of Nondestructive Evaluation Methods», vol. 3, n.º June, pp. 17-31, 2003.
- [92] T. Santos, P. Vilaça, L. Quintino, y S. De Tecnologia, «Developments in NDT for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds in Aluminium Alloys», *Weld. World*, Vol. 52, n.º 9/10, 2008 – Res. Suppl., pp. 30-37.
- [93] M. de E. y S. S. I. N. de S. e H. en el Trabajo, «Herramientas manuales. Criterios ergonómicos y de seguridad para su selección».
- [94] Ultimaker, «Technical data sheet ABS».
- [95] «Ultimaker». [En línea]. Disponible en: www.ultimaker.com.