

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA POR LÁMINAS DE ESPUMA POLIESTIRENO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

GABRIEL ISAAC OÑA QUIROZ

Gabriel_ioq@live.com

WLADIMIR IVAN SARMIENTO TAPIA

wmirs@hotmail.com

DIRECTOR: ING. OSCAR EFRAÍN SOTOMAYOR GÁLVEZ

oscar.sotomayor@epn.edu.ec

Quito, Noviembre 2015

DECLARACIÓN

Nosotros, Gabriel Isaac Oña Quiroz y Wladimir Ivan Sarmiento Tapia, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Gabriel Isaac Oña Quiroz

Wladimir Ivan Sarmiento Tapia

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Gabriel Isaac Oña Quiroz y Wladimir Ivan Sarmiento Tapia, bajo mi supervisión.

Ing. Oscar Efraín Sotomayor Gálvez

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A mis amados padres que siempre están presentes, Myrian y Edgar.

A mi hermana para quien quiero ser un ejemplo, Leslie.

A mis abuelitos, Napoleón, Marina y Rosario.

A mi amada novia, Carolina.

GABRIEL

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por guiarme y apoyarme en cada momento, y ser mi ejemplo de vida.

A mi padre por sus consejos y por no permitir que me rinda.

A mi novia por acompañarme y ayudarme todos estos años.

A todos los miembros de mi familia que de una u otra me alentaron a cumplir este objetivo.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y sus ingenieros por los conocimientos y lecciones que me han entregado.

Al Ing. Oscar Sotomayor por todo el tiempo, conocimientos, consejos y guía que permitieron que este proyecto sea culminado con éxito.

A mi compañero de tesis por el esfuerzo y colaboración entregado en nuestro proyecto.

A todos los compañeros de la facultad que colaboraron en este proyecto.

A Freddy por los conocimientos y experiencia que colaboraron en la construcción del equipo.

GABRIEL

Agradezco a familiares profesores y amigo por haberme apoyado a lo largo de este proyecto.

WLADIMIR

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
CONTENIDO.....	V
LISTA DE TABLAS.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN	XX
PRESENTACIÓN	XXII
CAPITULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	1
1.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS).....	1
1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y CARACTERÍSTICAS.....	1
1.1.1.1 Densidad.....	1
1.1.1.2 Propiedades mecánicas.....	1
1.1.1.3 Estabilidad dimensional.....	2
1.1.1.4 Conductividad térmica.....	2
1.1.1.5 Resistencia al agua y la humedad	3
1.1.1.6 Resistencia química	3
1.1.1.7 Propiedades eléctricas.....	4
1.1.1.8 Naturaleza higiénica.....	4
1.1.1.9 Retención de vitamina C	4
1.1.1.10 Resistencia al envejecimiento	4
1.1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN	4
1.1.2.1 Producción del poliestireno expandible.....	5
1.1.2.2 Producción del poliestireno expandido.....	6

1.1.2.2.1	Pre-expansión.....	6
1.1.2.2.2	Maduración intermedia y estabilización	7
1.1.2.2.3	Expansión y moldeo final	7
1.1.3	PROCEDIMIENTO	9
1.1.4	APLICACIONES	10
1.1.4.1	Material para la construcción	11
1.1.4.2	Material para empaquetado de productos.....	12
1.1.4.3	Otras aplicaciones.....	12
1.2	FUNDICIÓN POR ESPUMA PERDIDA (LFC)	13
1.2.1	PARÁMETROS DEL PROCESO.....	13
1.2.1.1	Modelo de espuma.....	13
1.2.1.2	Ensamble del modelo.....	14
1.2.1.3	Tipos de recubrimiento.....	15
1.2.1.4	Aplicación del recubrimiento	16
1.2.2	VENTAJAS	16
1.2.3	APLICACIONES	17
1.3	MANUFACTURA DE LOS MODELOS DE ESPUMA EPS.....	17
1.3.1	TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES DE MAQUINADO	18
1.3.1.1	Maquinado por fresado	19
1.3.1.2	Maquinado por “corte” con alambre caliente	19
1.3.2	NUEVAS TECNOLOGÍAS DE MAQUINADO	21
1.3.2.1	Freeform Automated Sculpting Technology (FAST).....	24
1.3.2.2	ModelAngelo	25
1.3.2.3	Rapid Heat Ablation (RHA)	26
1.3.2.4	Michelangelo	27
1.3.2.5	True Surface System (Trusurf).....	28
1.3.2.6	Shapemaker II (SMII)	29
1.3.2.7	Freeform Thick Layered Object Manufacturing (FF-TLOM)	29

1.3.2.8	Variable Lamination Manufacturing (VLM)	30
1.3.2.9	Stratoconcept	31
1.3.2.10	Comparación de los ejemplos de nuevas tecnologías de maquinado	32
CAPITULO 2. PRUEBAS PRELIMINARES Y DISEÑO DEL EQUIPO EN UN PROGRAMA CAD		34
2.1	DEFINICIÓN DEL PRODUCTO O REQUERIMIENTO	34
2.2	DISEÑO CONCEPTUAL	38
2.2.1	SISTEMA DE CORTE	38
2.2.2	SISTEMA DE MOVIMIENTO	39
2.2.3	SISTEMA DE CONTROL	43
2.2.3.1	Tarjeta electrónica de control	50
2.2.4	CONCEPTO PARA EL EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA POR LAMINAS DE EPS	50
2.3	DISEÑO DE MATERIALIZACIÓN	51
2.3.1	DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL EQUIPO	51
2.3.2	DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO ...	60
2.3.2.1	Boquilla de calentamiento	62
2.3.2.2	Varillas cilíndricas horizontales	62
2.3.2.3	Rodamientos lineales de desplazamiento horizontal	78
2.3.2.4	Cabezal	79
2.3.2.5	Ejes conductores y conducidos	80
2.3.2.6	Casquillos horizontales	93
2.3.2.7	Bloques de desplazamiento horizontal	94
2.3.2.8	Rodamientos de los ejes horizontales	95
2.3.2.8.1	Selección de los rodamientos según el catálogo FAG	96
2.3.2.8.2	Selección del rodamiento según el catalogo SKF	100
2.3.2.9	Selección de poleas y bandas de distribución	102
2.3.2.10	Tensores para las bandas sincrónicas	105

2.3.2.11	Tornillo de potencia	106
2.3.2.12	Varillas cilíndricas verticales (guías).....	111
2.3.2.13	Rodamientos lineales verticales	112
2.3.2.14	Bloque de desplazamiento vertical	113
2.3.2.15	Perfiles de soporte.....	114
2.3.2.16	Acoplamientos del equipo	114
2.3.2.17	Conectores del equipo.....	116
2.3.2.18	Tapas del equipo	119
2.3.2.19	Estructura	120
2.4	DISEÑO DE DETALLE	121
CAPITULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO		123
3.1	FABRICACIÓN DE COMPONENTES POR IMPRESIÓN 3D	123
3.2	LISTA DE MATERIALES	125
3.3	MONTAJE DEL EQUIPO	131
3.3.1	MONTAJE DE LA ESTRUCTURA.....	131
3.3.2	MONTAJE DE LOS EJES CONDUCTORES	133
3.3.3	MONTAJE DE LOS EJES CONDUCTIDOS	136
3.3.4	MONTAJE DE LOS MOTORES Y SENSORES XY	138
3.3.5	MONTAJE DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO VERTICAL	139
3.3.6	MONTAJE DE LOS BLOQUES DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL, VARILLAS HORIZONTALES Y CABEZAL DE CORTE.....	140
3.3.7	MONTAJE DE LAS BANDAS Y ALINEACIÓN DE LAS VARILLAS HORIZONTALES.....	142
3.3.8	UBICACIÓN DE LA CAJA Y DE LA TARJETA ELECTRONICA	144
3.3.9	CONEXIÓN DE LA TARJETA ELECTRONICA.....	144
CAPITULO 4. PRUEBAS, CALIBRACIÓN Y CREACIÓN DE OBJETOS 3D ..		146
4.1	CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	146
4.1.1	GCODE	153
4.2	CREACIÓN DE MODELOS 3D.....	157
4.3	SECCIONAMIENTO DE MODELOS Y GENERACIÓN DEL GCODE ..	159

4.3.1 SECCIONAMIENTO CON SOFTWARE INVENTOR Y GENERACIÓN CON SOFTWARE CURA	160
4.3.2 SECCIONAMIENTO CON SOFTWARE CREATION WORKSHOP Y GENERACIÓN CON SOFTWARE MATLAB	165
4.3.3 SECCIONAMIENTO Y GENERACIÓN CON SOFTWARE CURA	171
4.4 MODIFICACIÓN DEL GCODE.....	173
4.5 PRUEBAS Y CALIBRACIÓN	177
4.5.1 PRUEBAS PARA EL ELEMENTO DE CORTE	178
4.5.2 PRUEBAS DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA	179
4.5.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO	182
4.5.4 PRUEBAS DE LAS CAPACIDADES DEL EQUIPO	183
4.5.4.1 Pruebas de fabricación de modelos 3D.....	183
CAPITULO 5. OBTENCIÓN DE MODELOS GASIFICABLES Y APLICACIÓN EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN	186
CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	194
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	194
6.2 CONCLUSIONES	196
6.3 RECOMENDACIONES	198
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
ANEXO A - DIAGRAMAS, TABLAS Y CATALOGOS UTILIZADOS EN EL DISEÑO DEL EQUIPO	202
A.1 Diagramas para el cálculo y selección de rodamientos lineales.....	203
A.2 Catálogo para la selección de rodamientos lineales.....	205
A.3 Tablas utilizadas para el diseño de los ejes conductores y conducidos' ...	206
A.4 Tipos de rodamientos y sus características.....	209
A.5 Catalogo de rodamientos FAG rígidos de bolas.....	211
A.6 Catalogo de rodamientos SKF rígidos de bolas.....	212
A.7 Guía y tablas de selección para bandas sincrónicas.....	213
ANEXO B – PLANOS DEL EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA POR LÁMINAS DE EPS	218

ANEXO C – FOTOGRAFIAS DEL PROCEDIMIENTO DE MONTAJE.....219

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades físicas típicas del EPS @ 21°C.	2
Tabla 1.2 Coeficientes de conductividad térmica K típicos para el EPS.	3
Tabla 1.3 Distribución del mercado de los polímeros estirénicos termoplásticos.	11
Tabla 1.4 Distribución de aplicaciones para el EPS.	11
Tabla 1.5 Requisitos de densidad típicos para los modelos usados en el proceso LFC.....	14
Tabla 1.6 Método de manufactura y herramienta de corte utilizada para cada máquina de corte de espuma para PR.	33
Tabla 2.1 Documento de especificación para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	37
Tabla 2.2 Tabla de evaluación del peso específico de cada criterio.	47
Tabla 2.3 Tabla de evaluación para opciones de control.	48
Tabla 2.4 Tabla de evaluación para control de temperatura.	48
Tabla 2.5 Tabla de evaluación para interface.....	48
Tabla 2.6 Tabla de evaluación para funciones incorporadas.	49
Tabla 2.7 Tabla de evaluación para licencia.	49
Tabla 2.8 Tabla de conclusiones para la selección del software de control.	49
Tabla 2.9 Especificaciones generales del motor “paso a paso”.	81
Tabla 2.10 Especificaciones eléctricas del motor “paso a paso”.	81
Tabla 2.11 Especificaciones del rodamiento FAG 608.2Z.....	100
Tabla 2.12 Especificaciones del rodamiento SKF 628/8 – 2Z	102
Tabla 2.13 Condiciones de diseño para las bandas sincrónicas.	103
Tabla 3.1 Propiedades típicas del PLA.....	124
Tabla 3.2 Lista de elementos y materiales utilizados en la construcción del equipo.	126
Tabla 4.1 Códigos principales del software de control Cura.....	155
Tabla 4.2 Resultados de las pruebas para el elemento de corte.....	179
Tabla 4.3 Resultados de las pruebas de velocidad y temperatura en láminas de EPS de 10mm de espesor.....	181
Tabla 5.1 Tiempos de fabricación de los modelos EPS.	190
Tabla 5.2 Materiales y equipos utilizados en el proceso de fundición.	192

Tabla 6.1 Control de cumplimiento de las especificaciones del equipo.....	196
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fases de transformación del poliestireno durante la producción de elementos en EPS.....	5
Figura 1.2 (a) Molécula de pentano. (b) Perlas de poliestireno expandible.....	5
Figura 1.3 Procesos de pre-expansión continuo y discontinuo para materiales expandibles.	6
Figura 1.4 Proceso de expansión y moldeo final de bloques de EPS.	8
Figura 1.5 Bloque de EPS obtenido después de la expansión y moldeo final.....	8
Figura 1.6 Molde para la obtención de cajas de EPS para frutas y vegetales.....	9
Figura 1.7 Procedimiento de fundición por espuma perdida (LFC).	10
Figura 1.8 Máquinas fresadoras para espuma EPS.....	19
Figura 1.9 Proceso de maquinado manual de EPS por “corte” con alambre caliente.	20
Figura 1.10 Máquinas CNC de “corte” por alambre caliente para EPS.	20
Figura 1.11 Comparación entre las capacidades de tamaño y complejidad de manufactura entre las máquinas de prototipado rápido, de corte de espuma y de corte de espuma para prototipado rápido.....	21
Figura 1.12 Clasificación de las tecnologías de prototipado rápido.	22
Figura 1.13 Elementos fabricados utilizando las tecnologías convencionales de prototipado rápido.	23
Figura 1.14 Distribución de aplicaciones para los elementos fabricados por prototipado rápido.	24
Figura 1.15 Sistema de corte FAST y soporte para cuello fabricado con el mismo.	25
Figura 1.16 Piezas de espuma fabricadas con el sistema ModelAngelo.....	26
Figura 1.17 Fabricación de una pieza por el método RHA.....	27
Figura 1.18 Equipo Michelangelo y pieza fabricada por este sistema.	28
Figura 1.19 Piezas de EPS fabricadas con el sistema Trusurf.....	29
Figura 1.20 Piezas fabricadas con el sistema FF-TLOM.....	30
Figura 1.21 Máquinas Rapid Shaper basadas en el sistema VLM.	31
Figura 1.22 Proceso de fabricación de piezas con el sistema Stratoconcept.....	31

Figura 1.23 Comparación de capacidades de complejidad y tamaño de las máquinas de corte de espuma para PR.	32
Figura 2.1 Piezas con perforaciones interiores fabricadas con máquinas de corte por alambre caliente convencionales (los cortes indeseables a través de las mismas son evidentes).	36
Figura 2.2 Procedimiento de corte de láminas de EPS utilizando un elemento calentado.	39
Figura 2.3 Servomotor para un sistema de movimiento.	40
Figura 2.4 Motor “paso a paso” para un sistema de movimiento.	42
Figura 2.5 Interface del software de control Mach3.	45
Figura 2.6 Interface del software de control Cura.	46
Figura 2.7 Interface del software de control Foamworks 3.0	47
Figura 2.8 Tarjeta de control para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	50
Figura 2.9 Resistencia eléctrica y termocupla para sistema de corte.	52
Figura 2.10 Transmisor de la termocupla para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	52
Figura 2.11 Esquema en Inventor del sistema de corte del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	53
Figura 2.12 Esquema en Inventor del sistema de movimiento para los ejes XY del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	55
Figura 2.13 Esquema en Inventor del sistema de movimiento para el eje Z del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	56
Figura 2.14 Perfiles estructurales de aluminio utilizados como estructura.	57
Figura 2.15 Perfiles L de aluminio utilizados como estructura.	58
Figura 2.16 Esquema en Inventor de la estructura del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	58
Figura 2.17 Boquilla de calentamiento del sistema de corte.	62
Figura 2.18 Diagrama de reacciones en una viga doblemente empotrada.	63
Figura 2.19 Configuración de las varillas cilíndricas horizontales.	66
Figura 2.20 Diagrama de cuerpo libre para las vigas del equipo.	66
Figura 2.21 Diagrama de fuerza cortante y momento flector para las varillas cilíndricas horizontales.	70

Figura 2.22 Diagrama de desplazamientos en función de la carga Q.	70
Figura 2.23 Diagrama de desplazamientos del momento M_A	71
Figura 2.24 Diagrama de desplazamientos del momento M_B	71
Figura 2.25 Cabezal del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	80
Figura 2.26 Configuración de los ejes horizontales del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	82
Figura 2.27 Diagrama de cuerpo libre de los ejes horizontales.	82
Figura 2.28 Diagrama fuerza cortante y momento flector plano x – y para los ejes.	86
Figura 2.29 Diagrama fuerza cortante y momento flector plano x – z para los ejes.	86
Figura 2.30 Diagrama de momento flector plano y – z para los ejes.	87
Figura 2.31 Casquillos horizontales.	93
Figura 2.32 Bloques de desplazamiento horizontal para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	94
Figura 2.33 Factores radiales y axiales de los rodamientos rígidos de bolas.	97
Figura 2.34 Esquema de los rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera.	99
Figura 2.35 Esquema de los rodamientos SKF.	102
Figura 2.36 Tensor para las bandas de distribución.	106
Figura 2.37 Esquema de una rosca cuadrada y una rosca trapezoidal.	106
Figura 2.38 Esquema conjunto tuerca – tornillo de potencia.	107
Figura 2.39 Diagrama de fuerzas para elevar la carga.	107
Figura 2.40 Diagrama de fuerzas para bajar la carga.	108
Figura 2.41 Guía vertical para el sistema de movimiento en el eje Z.	112
Figura 2.42 Bloque de desplazamiento vertical.	113
Figura 2.43 Acople motor eje horizontal – ejes conductores.	115
Figura 2.44 Acople motor eje vertical – tornillo de potencia.	116
Figura 2.45 Conector motor eje vertical – estructura.	117
Figura 2.46 Conector motor eje horizontal – estructura.	117
Figura 2.47 Conector tuerca – bloque de desplazamiento vertical.	118
Figura 2.48 Conector rodamiento lineal – bloque de desplazamiento vertical.	118
Figura 2.49 Tapa externa de los rodamientos.	119
Figura 2.50 Tapa interna de los rodamientos.	120

Figura 2.51 Tapa interna de los rodamientos con extensión para sensor de posición.	120
Figura 2.52 Diseño en Inventor del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	121
Figura 3.1 Fabricación de un componente mediante el método de impresión 3D FDM.	125
Figura 3.2 Esquema de la ubicación de los perfiles verticales de la estructura...132	
Figura 3.3 Esquema del procedimiento de montaje de los perfiles horizontales superiores de la estructura.	132
Figura 3.4 Esquema del procedimiento de montaje de los perfiles horizontales inferiores de la estructura.	133
Figura 3.5 Esquema de la ubicación de los elementos del equipo en el eje conductor.....	134
Figura 3.6 Esquema del procedimiento de montaje del primer eje conductor en el equipo.....	135
Figura 3.7 Esquema del procedimiento de montaje del segundo eje conductor en el equipo.....	135
Figura 3.8 Esquema del procedimiento de montaje de los ejes conducidos del equipo.....	137
Figura 3.9 Esquema del procedimiento de montaje de los motores y sensores XY.	138
Figura 3.10 Esquema del procedimiento de montaje del conjunto de desplazamiento vertical.	139
Figura 3.11 Esquema del procedimiento de montaje del sistema de movimiento vertical.	140
Figura 3.12 Esquema del procedimiento de montaje del cabezal de corte.	141
Figura 3.13 Esquema del procedimiento de montaje de los bloques de desplazamiento horizontal.....	141
Figura 3.14 Esquema del procedimiento de montaje de las varillas horizontales.	142
Figura 3.15 Esquema del procedimiento de montaje y tensión de las bandas....	143
Figura 4.1 Pantalla de inicio del software de control Cura.....	146

Figura 4.2 Pantalla de selección para agregar máquinas en el software de control Cura.....	147
Figura 4.3 Pantalla de ajustes para máquinas del software Cura.	148
Figura 4.4 Ventana de ajustes para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.	148
Figura 4.5 Interface con ajustes completos del software de control Cura.	149
Figura 4.6 Ventana de ajustes de experto del software de control Cura.	150
Figura 4.7 Configuraciones iniciales en la interface de ajustes completos del software de control Cura.	152
Figura 4.8 Ventana de preferencias del software de control Cura.....	153
Figura 4.9 Start Gcode por defecto del software de control Cura.....	155
Figura 4.10 Start Gcode modificado para el equipo de manufactura aditiva.	156
Figura 4.11 End Gcode por defecto del software de control Cura.	157
Figura 4.12 End Gcode modificado para el equipo de manufactura aditiva.	157
Figura 4.13 Ejemplo de modelo 3D creado en Autodesk Inventor 2014.	159
Figura 4.14 Primera etapa del proceso de seccionamiento del modelo 3D en Autodesk Inventor.	161
Figura 4.15 Segunda etapa del proceso de seccionamiento del modelo 3D en Autodesk Inventor.	162
Figura 4.16 Ejemplo de modelo 3D seccionado en 5 capas de 10mm de espesor.	162
Figura 4.17 Ejemplo de secciones de gran tamaño que no pueden ser cortadas simultáneamente.	163
Figura 4.18 Ejemplo del procedimiento de deshabilitación de secciones.....	163
Figura 4.19 Iconos para activar los comandos de posicionamiento del software Cura.....	164
Figura 4.20 Modos de visualización del software Cura.	164
Figura 4.21 Modelo 3D ubicado en el área de trabajo del software Cura.	165
Figura 4.22 Ventana de configuración del software Creation Workshop.	167
Figura 4.23 Ventana de seccionamiento de un modelo 3D.	167
Figura 4.24 Carpeta con las imágenes de las secciones generadas con el software Creation Workshop.....	168

Figura 4.25 Imagen obtenida en Matlab con los puntos de contorno en color azul.	169
Figura 4.26 Columnas que contienen las coordenadas XY de la capa del modelo 3D.....	170
Figura 4.27 Generación del Gcode utilizando Excel.....	171
Figura 4.28 Modelo 3D ubicado en el software de control Cura.....	172
Figura 4.29 Ejemplo de Gcode que muestra la identificación de las capas al utilizar el método de seccionamiento y generación con Cura.....	173
Figura 4.30 Ejemplo de perfil de corte antes de modificar el Gcode.	174
Figura 4.31 Comparación entre la primera línea del procedimiento de corte original y modificada.	175
Figura 4.32 Comparación entre un bloque original y los bloques modificados.	175
Figura 4.33 Línea final del Gcode que debe ser borrada.	175
Figura 4.34 Comparación antes y después de las modificaciones para objetos con perforaciones internas.....	176
Figura 4.35 Ejemplo de perfil de corte después de modificar el Gcode.	176
Figura 4.36 Ventana de control del proceso de corte.....	178
Figura 4.37 Icono del botón de inicio del proceso de corte.	178
Figura 4.38 Punta de corte doblada al trabajar con 240°C y 10mm/s.	180
Figura 4.39 Medición de elemento cortado de 50x50mm.....	182
Figura 4.40 Elemento de una sola capa de forma simple con perforaciones internas.	183
Figura 4.41 Elemento de una sola capa de forma compleja.....	184
Figura 4.42 Elemento de una sola capa con perforaciones internas de forma compleja.	184
Figura 4.43 Elemento de una sola capa en XPS de 5mm de espesor.	185
Figura 5.1 Modelos 3D generados en Inventor.	186
Figura 5.2 Modelos 3D seccionados y ubicados en Inventor.	187
Figura 5.3 Fotografías del procedimiento de corte de las capas de los modelos 3D.	188
Figura 5.4 Identificación auxiliar de las capas de los modelos de EPS.	188
Figura 5.5 Ejemplo de modelo 3D con perforaciones auxiliares para alineación.	189

Figura 5.6 Fotografías del procedimiento de ensamble del modelo de EPS del motor a escala.	189
Figura 5.7 Fotografías del procedimiento de ensamble del modelo de EPS del disco de freno.	190
Figura 5.8 Modelos gasificables de EPS totalmente ensamblados.	191
Figura 5.9 Fotografías del procedimiento de llenado de las cajas de moldeo.	192
Figura 5.10 Fotografías del procedimiento de vertido del aluminio fundido en las cajas de moldeo.	192
Figura 5.11 Fotografías del motor de un cilindro a escala fundido en aluminio.	193
Figura 5.12 Fotografías del disco de freno fundido en aluminio.	193
Figura A.0.1 Diagrama para el factor de dureza f_H	203
Figura A.0.2 Diagrama para el factor de temperatura f_T	203
Figura A.0.3 Diagrama para el factor de contacto f_c	204
Figura A.0.4 Diagrama para el factor de carga f_w	204
Figura C.0.1 Fotografía del procedimiento de ensamble de la estructura.	220
Figura C.0.2 Fotografías del procedimiento de montaje de los ejes conductores y conducidos.	220
Figura C.0.3 Fotografía del procedimiento de montaje de los motores XY.	221
Figura C.0.4 Fotografía del procedimiento de montaje del cabezal de corte y las varillas horizontales.	221
Figura C.0.5 Fotografía del procedimiento de montaje del sistema de movimiento vertical.	222
Figura C.0.6 Fotografía del montaje de los tensores en las bandas del equipo.	222
Figura C.0.7 Fotografía de las bandas y tensores montados en el equipo.	223
Figura C.0.8 Fotografía del procedimiento de alineación de las varillas horizontales del equipo.	223
Figura C.0.9 Fotografía de la conexión de los componentes del equipo en la tarjeta electrónica.	224

RESUMEN

El presente trabajo de titulación está compuesto por seis capítulos que abarcan el desarrollo del proyecto de diseño y construcción del equipo de manufactura aditiva por láminas de espuma poliestireno. La descripción del contenido de cada uno de ellos se presenta a continuación.

En el capítulo 1 se describen las generalidades del poliestireno expandido, que será el material principal para la fabricación de los modelos gasificables; así como el procedimiento, parámetros, ventajas y aplicaciones del proceso de fundición por espuma perdida en el que se utilizarán los modelos fabricados por el equipo. Este capítulo contiene también una breve descripción de las tecnologías y métodos convencionales de maquinado de materiales espuma, y de las nuevas tecnologías que se han investigado alrededor del mundo.

El capítulo 2 contiene toda la información referente al proceso de diseño del equipo. En él se encuentran las pruebas preliminares, consideraciones, cálculos, y procesos de selección de alternativas y materiales, que permitieron llegar al diseño final de la máquina.

El capítulo 3 trata sobre el procedimiento de construcción y ensamble del equipo. Aquí se explica el proceso de fabricación de componentes por impresión 3D, método que fue empleado para la fabricación de una gran cantidad de componentes del equipo. Este capítulo contiene también la lista de materiales y las instrucciones de montaje que se emplean para la construcción de la máquina.

En el capítulo 4 se describen todas las pruebas que se realizaron en el equipo de manufactura aditiva, así como el procedimiento de configuración y calibración del mismo. Este capítulo contiene también una explicación del Gcode utilizado en los equipos de control numérico computarizado, y la explicación de los métodos de seccionamiento y generación del Gcode para los modelos 3D que se definieron y analizaron en el presente trabajo.

El capítulo 5 muestra dos ejemplos de modelos gasificables obtenidos con el equipo de manufactura aditiva y el resultado obtenido al ser utilizados en el laboratorio de fundición con fines ilustrativos.

El capítulo 6 contiene el análisis de resultados, referente a las capacidades del equipo, así como las conclusiones y recomendaciones producto de la realización de presente proyecto de titulación.

PRESENTACIÓN

El proceso de fundición por espuma perdida es una técnica que permite obtener piezas fundidas con un buen acabado superficial y tolerancias dimensionales relativamente estrechas. Además, esta técnica presenta una gran cantidad de ventajas al compararlo con otros métodos de fundición, siendo la posibilidad de fabricar piezas complejas la más importante de ellas.

Uno de los requerimientos para poder llevar a cabo este proceso de fundición con éxito es el disponer de adecuados modelos de espuma gasificables. Los mencionados modelos pueden ser obtenidos por distintos métodos tales como corte, mecanizado, extruido, expansión en matriz, entre otros. En la actualidad existe una gran variedad de equipos para la fabricación de modelos de materiales espuma, que van desde el control manual hasta el control numérico computarizado.

En el caso del laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional, uno de los métodos de fabricación de los modelos de espuma gasificables empleados es el corte por alambre caliente con un equipo controlado manualmente. La aplicación de este método por parte de los estudiantes conlleva a la obtención de modelos de baja calidad y precisión, y que están limitados a formas simples. Es por este motivo que se requiere un equipo que permita obtener modelos gasificables de mayor complejidad y con mayor precisión dimensional, para que estos a su vez permitan obtener una mayor variedad de piezas fundidas de mejor calidad.

Para responder a esta necesidad se plantea el diseño y construcción de un equipo de manufactura aditiva por láminas de espuma poliestireno mediante el cual se realizará una sucesión de cortes en distintas láminas de poliestireno expandido que posteriormente serán unidas para formar los cuerpos 3D que finalmente serán usados como modelos de fundición gasificables.

CAPITULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

El poliestireno expandido (EPS por sus siglas en inglés) es una espuma polimérica termoplástica, ligera y rígida, que se forma al expandir perlas de poliestireno que contienen un agente de expansión en su estructura.

1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y CARACTERÍSTICAS^{1, 2}

En esta sección se describen las propiedades físicas y características del EPS han hecho que este material se destaque en un gran número de aplicaciones.

1.1.1.1 Densidad

Los productos de EPS tienen aproximadamente un 98% de aire en su estructura por lo que son muy ligeros y con valores de densidad que van desde los 10 hasta los 55 kg/m³ según su aplicación. Esta propiedad permite ahorrar energía y recursos al facilitar la manipulación y transporte de los productos de EPS.

1.1.1.2 Propiedades mecánicas

Como en la mayoría de sólidos celulares, las propiedades de resistencia mecánica del EPS dependen principalmente de la densidad y generalmente aumentan con la misma (**Tabla 1.1**).

Los valores de resistencia a la compresión del EPS permiten que los productos fabricados en este material sean sometidos a cargas de compresión sin que se fracturen. Esta propiedad es de gran utilidad en aplicaciones donde se requiere almacenar productos o soportar cargas al ser parte de una estructura.

¹ (The EPS packaging group, págs. 5, 6)

² (Alliance of foam packaging recyclers, 2000)

Tabla 1.1 Propiedades físicas típicas del EPS @ 21°C³.

Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la compresión al 10% de deformación (kPa)	Resistencia a la flexión (kPa)	Resistencia a la tensión (kPa)	Resistencia al corte (kPa)
16	89,63	199,95	213,74	213,74
24	165,47	296,47	351,63	365,42
32	206,84	399,90	427,47	482,63
40	289,58	517,11	510,21	634,32
48	441,26	606,74	606,74	813,58
52	461,95	723,95	675,69	965,27

Adicionalmente el EPS tiene la característica de absorber impactos lo que le permite ser usado en aplicaciones donde se busca proteger elementos delicados durante su almacenamiento y transporte.

1.1.1.3 Estabilidad dimensional

La estabilidad dimensional es una característica importante del EPS y representa la capacidad del material para mantener su forma y dimensiones al variar los factores ambientales. El máximo cambio dimensional que se puede esperar de un producto de EPS es menor al 2%.

1.1.1.4 Conductividad térmica

Debido a su estructura celular cerrada llena de aire, el EPS tiene un bajo coeficiente de conductividad térmica que se traduce en una baja tasa de transferencia de calor. Esta característica le da una gran capacidad como aislante térmico e inhibidor de cambios repentinos en la temperatura. El coeficiente de conductividad del EPS depende de su densidad y de la temperatura ambiente (**Tabla 1.2**).

³ (Alliance of foam packagign recyclers, 2000, pág. 1)

Tabla 1.2 Coeficientes de conductividad térmica K típicos para el EPS⁴.

Densidad (kg/m ³)	Temperatura de ensayo (°C)	Coeficiente de conductividad K (W/m·K)
16	-17,78	0,032
	4,44	0,035
	23,89	0,037
	37,78	0,040
32	-17,78	0,029
	4,44	0,030
	23,89	0,033
	37,78	0,036

1.1.1.5 Resistencia al agua y la humedad

La resistencia a la humedad es la capacidad de evitar que el agua entre en la estructura de un material y afecte sus propiedades. El EPS es esencialmente impermeable al agua gracias a su estructura celular. Sin embargo, puede absorber un bajo porcentaje de agua, entre 2 y 4 % del volumen, al estar totalmente sumergido. Es moderadamente permeable al vapor de agua al estar sometida a diferenciales de presión. De manera general ni el agua ni el vapor afecta propiedades térmicas y físicas del EPS⁵.

1.1.1.6 Resistencia química

El EPS presenta las siguientes características de resistencia química:

- El agua y las soluciones acuosas de sales y álcalis no afectan al EPS.
- La mayoría de solventes orgánicos no son compatibles con el EPS.
- La radiación ultravioleta afecta ligeramente los productos de EPS causando una coloración amarillenta y fragilidad superficial, pero sin afectar de ninguna otra forma las propiedades físicas del material.

⁴ (Alliance of foam packagign recyclers, 2000, pág. 2)

1.1.1.7 Propiedades eléctricas

La resistividad volumétrica del poliestireno expandido moldeado con un rango de densidad entre 20 y 40 kg/m³ a 24°C y 50% de humedad relativa es de 4×10^{13} ohm·cm. La resistencia dieléctrica es de aproximadamente 2KV/mm. Debido a estas propiedades el EPS puede ser tratado con agentes anti estáticos para cumplir con las especificaciones de los empaques para la industria electrónica y militar.

1.1.1.8 Naturaleza higiénica

El EPS es un material completamente inerte e inocuo por lo que no permite la proliferación de parásitos, hongos y/o bacterias ni en su superficie ni en su interior ya que estos no encuentran valor nutritivo en el material.

1.1.1.9 Retención de vitamina C

Los productos EPS tiene la particularidad de retener por más tiempo la vitamina C de las frutas y vegetales que otros materiales destinados al empaque de alimentos.

1.1.1.10 Resistencia al envejecimiento

Las propiedades del poliestireno expandido se conservan a lo largo de toda la vida del material ya que estas no se ven afectadas ni alteradas por agentes externos.

1.1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN

La producción de los elementos en espuma EPS se divide principalmente en dos fases; la primera consiste en obtener la materia prima del proceso, que es el poliestireno expandible; y la segunda comprende la producción propiamente dicha de los elementos en EPS mediante la transformación del poliestireno expandible en poliestireno expandido. La **Figura 1.1** muestra las distintas fases de transformación del poliestireno durante el proceso de producción de elementos de EPS

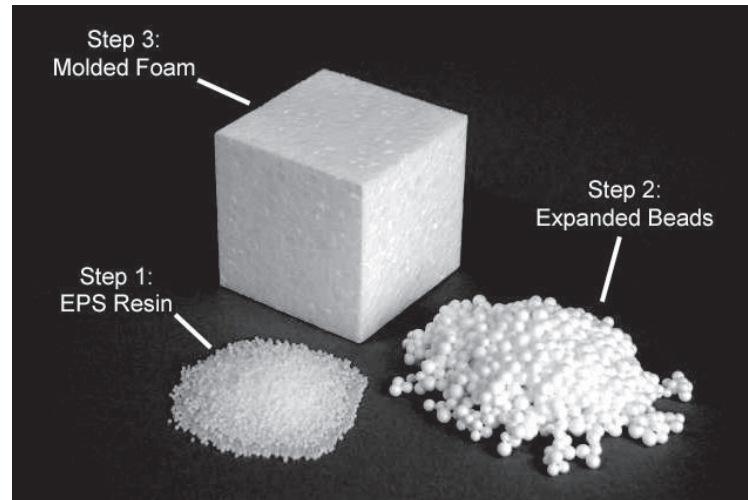


Figura 1.1 Fases de transformación del poliestireno durante la producción de elementos en EPS⁶.

1.1.2.1 Producción del poliestireno expandible

Existen varios métodos de obtención del poliestireno expandible pero de manera general estos consisten en incorporar un agente de expansión, comúnmente pentano (**Figura 1.2a**), durante la polimerización del estireno. Al finalizar la reacción, el poliestireno obtenido es extruido y cortado en un pelletizador para obtener las perlas compactas de poliestireno expandible (**Figura 1.2b**) que serán la materia prima para la obtención de los elementos en EPS.

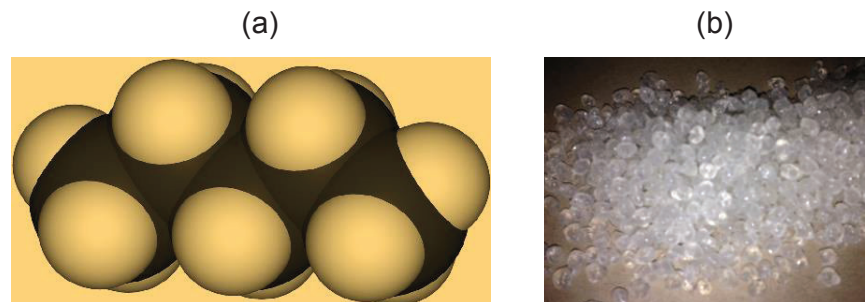


Figura 1.2 (a) Molécula de pentano⁷. (b) Perlas de poliestireno expandible⁸.

⁶ <http://epsfoamprod.com.sharepoint.com/siteimages/EPS%20Foam%20Raw%20Materials%205.jpg>

⁷ (The EPS packaging group, pág. 9)

⁸ <http://www.worldwiderecycler.com/uploads/1/3/3/7/13377679/6696993.jpg>

1.1.2.2 Producción del poliestireno expandido

El proceso de producción de los elementos en EPS continúa con la transformación del poliestireno expandible en poliestireno expandido. Esta transformación se lleva a cabo en tres etapas que son: (1) pre-expansión, (2) maduración intermedia y estabilización, (3) expansión y moldeo final.

1.1.2.2.1 Pre-expansión

El proceso de expansión consiste en calentar las perlas de poliestireno expandible, que tienen una densidad aproximada de 630kg/m^3 , en equipos conocidos como pre-expansores utilizando vapor a temperaturas de entre 80°C y 100°C . Estas temperaturas logran que el agente de expansión ebullicione y se genere una presión en el interior de las perlas de poliestireno que aumenta el volumen de las mismas. Al final de proceso se obtienen perlas con estructura celular cerrada, con aire en su interior y una densidad de entre 10 y 35 kg/m^3 .

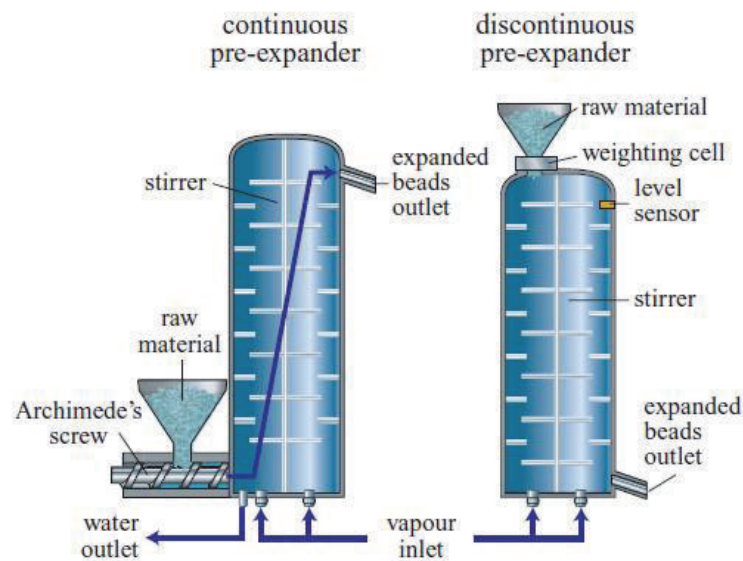


Figura 1.3 Procesos de pre-expansión continuo y discontinuo para materiales expandibles⁹.

⁹ (Castellani, Longo, & Pasquali, 2005, pág. 859)

El proceso de pre-expansión se puede llevar a cabo de manera continua o discontinua (**Figura 1.3**), siendo la primera opción la de mayor productividad y la segunda la que permite tener el mejor control sobre la densidad final del material.

1.1.2.2 Maduración intermedia y estabilización

El objetivo de esta etapa es el de obtener perlas con mayor elasticidad mecánica y capacidad de expansión mejorada, y consiste en dejar enfriar las perlas recientemente expandidas hasta alcanzar la temperatura ambiente. Durante este enfriamiento el agente de expansión se condensa y se genera un vacío en el interior de las perlas que las hace altamente inestables, al punto que una pequeña presión externa las deformaría permanentemente. Para balancear la presión interna en las perlas expandidas, mediante difusión del aire, se las mantiene en silos con paredes permeables durante algunas horas. Al mismo tiempo las perlas también se secan y parte del agente de expansión se pierde por lo que la duración del proceso no se puede extender indefinidamente.

1.1.2.3 Expansión y moldeo final

La etapa de expansión y moldeo final (**Figura 1.4**) consiste en llenar un molde con las perlas pre-expandidas y volver a calentarlas empleando vapor para provocar la expansión del agente remanente en el material. La expansión genera un aumento de presión que comprime las perlas entre sí, causando su adhesión, y por lo tanto su sinterización. Finalmente, el producto obtenido es enfriado y sometido a una maduración y estabilización adicional.

En esta etapa se pueden usar dos técnicas diferentes de moldeo: el moldeo de bloque y el moldeo de forma.

El moldeo de bloque consiste en emplear matrices con forma de paralelepípedo para obtener grandes bloques de EPS (**Figura 1.5**). Estos pueden ser comercializados de esta forma o ser cortados en otras presentaciones comerciales como, láminas, cilindros y paneles. Tanto los bloques como sus elementos

derivados son utilizados directamente en su presentación comercial o son maquinados para obtener formas particulares que son requeridas para cumplir con alguna aplicación específica.

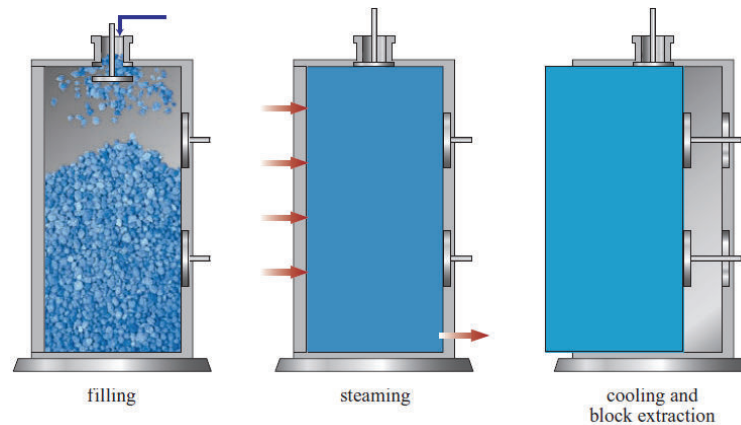


Figura 1.4 Proceso de expansión y moldeo final de bloques de EPS¹⁰.



Figura 1.5 Bloque de EPS obtenido después de la expansión y moldeo final¹¹.

El moldeo de forma utiliza matrices con la forma que se quiera dar a un producto (**Figura 1.6**). Este tipo de moldeo se emplea generalmente en la fabricación a gran escala de elementos que deben tener una forma específica para la aplicación en la que serán usados. Los empaques de EPS, que se utilizan para almacenar productos de todo tipo y forma, son un buen ejemplo de este tipo de moldeo ya que

¹⁰ (Castellani, Longo, & Pasquali, 2005, pág. 859)

¹¹ http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/eps-block-molding-machine-51738-3985109.jpg

se producen en grandes cantidades y deben tener una forma específica en función del producto que almacenaran.



Figura 1.6 Molde para la obtención de cajas de EPS para frutas y vegetales¹².

1.1.3 PROCEDIMIENTO¹³

Para obtener una pieza fundida mediante LFC se sigue el siguiente procedimiento:

- Se crea el modelo en espuma gasificable de la pieza que se quiere obtener, incluyendo los canales de alimentación para el ingreso del metal fundido.
- Se recubre el modelo con un revestimiento refractario y permeable.
- Una vez que el recubrimiento está seco se introduce el modelo en una caja de moldeo que tenga una capa de arena de entre 25 y 75 mm en la base.
- Con el modelo correctamente ubicado en la caja de moldeo se llena el mismo con arena suelta y sin aglutinante.
- Se hace vibrar el recipiente periódicamente para que la arena suelta fluya y se compacte alrededor de todo el modelo.
- Una vez que la arena esta compactada se lleva la caja de moldeo al área de colado y se vierte el metal fundido por la bajante de los canales de alimentación

¹² http://g02.s.alicdn.com/kf/HTB1U_HyHFXXXXcFaXXXq6xXFXXxi/High-quality-Vegetable-box-mold-fruit-basket.jpg

¹³ (ASM International, 1998, págs. 499-502)

- El metal vaporiza inmediatamente el modelo de espuma, remplazando completamente el espacio que ocupaba el modelo de poliestireno y duplicando precisamente sus características
- Se deja enfriar la pieza fundida.
- Se voltea la caja de moldeo para que la arena suelta se desprenda de la pieza fundida.
- Se recolecta la arena para ser reutilizada.
- Finalmente se tiene la pieza fundida lista para remover los canales de alimentación y ser limpiada.

El procedimiento se observa resumido en la **Figura 1.7**.

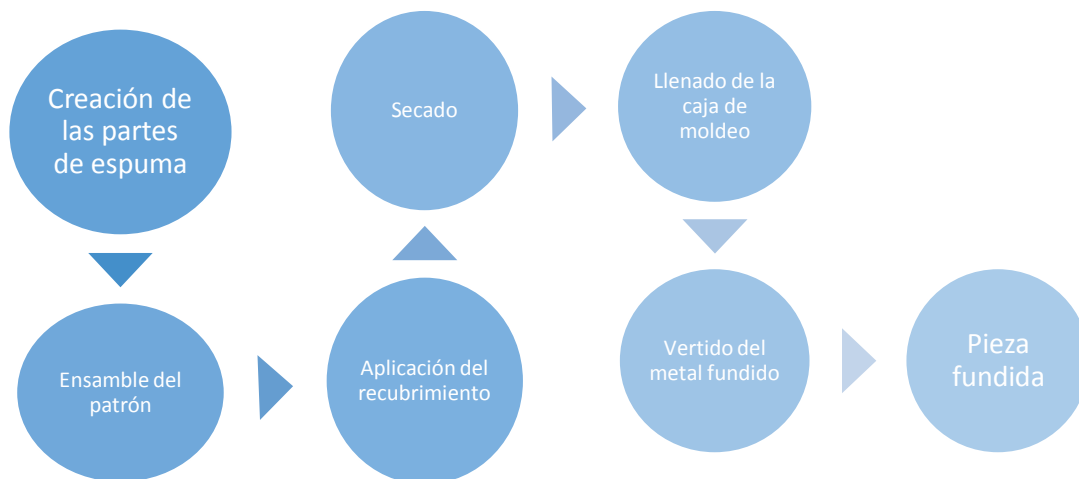


Figura 1.7 Procedimiento de fundición por espuma perdida (LFC).

Fuente: Propia

1.1.4 APLICACIONES

Las propiedades y características del EPS, junto con su gran capacidad para ser rápidamente moldeado en la forma y tamaño que se requiera, han permitido que los productos de poliestireno expandido sean empleados en una gran variedad de industrias y aplicaciones, llegando a abarcar un porcentaje importante del mercado

de los polímeros estirénicos termoplásticos (ver **Tabla 1.3**), los cuales a su vez representan aproximadamente el 12% de la producción global de plásticos.

Tabla 1.3 Distribución del mercado de los polímeros estirénicos termoplásticos¹⁴.

Polímero	Mercado Europeo	Mercado Mundial
SAN	2%	3%
ABS	24%	15%
GPPS/HIPS	57%	58%
EPS	17%	24%

Entre las principales aplicaciones del poliestireno expandido se encuentran las del sector de la construcción y como material para empaquetado, no obstante, existen también otras aplicaciones que representan un porcentaje menor dentro de la distribución de aplicaciones para el EPS (ver **Tabla 1.4**).

Tabla 1.4 Distribución de aplicaciones para el EPS¹⁵.

Sector	Participación
Aislamiento y construcción	70%
Empaquetado	25%
Otros	5%

A continuación se describen las aplicaciones para los productos moldeados de poliestireno expandido dentro de estos grupos.

1.1.4.1 Material para la construcción

Las propiedades mecánicas y características del EPS permiten que este sea utilizado en varios campos de la industria de la construcción desde la construcción de grandes estructuras como carreteras, puentes y edificios hasta la edificación de pequeñas residencias familiares. Algunas aplicaciones puntuales en esta industria son:

¹⁴ (Castellani, Longo, & Pasquali, 2005, pág. 859)

¹⁵ (Castellani, Longo, & Pasquali, 2005, pág. 860)

- Paneles de aislamiento térmico para paredes, pisos y techos.
- Bloques de relleno para aligerar estructuras de soporte de carga.
- Encofrados para cemento reforzado.
- Material de relleno para construcción de carreteras.
- Molduras decorativas para interiores y exteriores.

1.1.4.2 Material para empaquetado de productos

El poliestireno expandido ha sido usado como material de empaque para una gran variedad de productos en todo tipo de industrias. Las propiedades que han hecho del EPS el material ideal para empaques han sido, principalmente, su resistencia a la compresión, estabilidad dimensional, baja conductividad térmica y resistencia a la humedad. Algunos ejemplos de productos que son empacados en EPS son:

- Alimentos que requieren mantenerse fríos como carne y pescado.
- Vacunas y otros productos farmacéuticos.
- Frutas y verduras.
- Electrodomésticos.
- Componentes electrónicos.
- Bienes y equipos de oficina, entre muchos otros.

1.1.4.3 Otras aplicaciones

Dentro de las aplicaciones no convencionales para el EPS se tiene las siguientes:

- Material de relleno para cascos de protección.
- Asientos de seguridad para niños.
- Prototipos rápidos para diseño conceptual de productos comerciales.
- Esculturas promocionales y artísticas.
- Modelos de espuma para fundición.

El presente trabajo se enfoca en la última aplicación. Así, los modelos de fundición serán utilizados en el proceso de fundición por espuma perdida.

1.2 FUNDICIÓN POR ESPUMA PERDIDA (LFC)

El proceso de fundición por espuma perdida, o Lost Foam Casting (LFC por sus siglas en inglés), es un método de bajo costo para la producción de piezas fundidas ferrosas y no ferrosas de formas complejas, con buen acabado superficial y tolerancias estrechas, que emplea modelos de espuma gasificables y técnicas de fundición con arena sin aglutinantes.

Este método es conocido también como fundición por modelo evaporativo, fundición por espuma evaporativa, proceso de modelo perdido, proceso de fundición sin cavidad por poliestireno expandido, moldeado por poliestireno expandido, o proceso con molde lleno¹⁶.

1.2.1 PARÁMETROS DEL PROCESO

Para obtener piezas de buena calidad, mediante el proceso LFC, es importante conocer los parámetros que intervienen y su influencia en la estructura y propiedades de las piezas fundidas.

1.2.1.1 Modelo de espuma

Dado que la fundición es la representación exacta del modelo de espuma gasificable la obtención de un modelo de alta calidad es un paso crucial en el proceso LFC. Es por esto que es muy importante trabajar con un modelo fabricado en un material espuma adecuado, y controlar correctamente los parámetros de calidad superficial, fusión y la estabilidad dimensional en el mismo.

¹⁶ (ASM International, 1998, pág. 508)

Desde el inicio del proceso LFC la espuma de poliestireno expandido (EPS) ha sido, y sigue siendo, el material más utilizado para la fabricación de los modelos empleados en este método de fundición. Esto se debe a las propiedades del EPS (V. sección 1.1.1) y a que si bien existen otros materiales espuma, como el polimetilmetacrilato (PMMA), metacrilato-estireno (MMA-St), polietileno expandido (EPE), entre otros; estos tienen un mayor costo de producción que el EPS y por lo tanto se usan solamente en aplicaciones en las que el EPS presenta algún defecto.

Los valores de densidad requeridos en los modelos de EPS para algunos metales usados en el proceso LFC se indican en la **Tabla 1.5**.

Tabla 1.5 Requisitos de densidad típicos para los modelos usados en el proceso LFC¹⁷.

Metal	Temperatura de vertido del metal fundido		Densidad del modelo de EPS	
	°C	°F	kg/m ³	lb/ft ³
Aluminio	705 – 790	1300 - 1450	24 - 27	1,5 - 1,7
Bronce/Latón	1040 – 1260	1900 - 2300	20 - 21,6	1,25 - 1,35
Hierro gris	1370 – 1455	2500 - 2650	≤ 20	≤ 1,25

1.2.1.2 Ensamble del modelo

En la producción de piezas fundidas de formas complejas los modelos generalmente están formados por múltiples elementos que se ensamblan para formar el modelo completo y el sistema de alimentación. También se puede utilizar el proceso de ensamble para crear modelos ramificados que permiten fundir varias piezas en un solo paso de colado.

El procedimiento de ensamble depende de la complejidad del modelo, la calidad requerida en la pieza fundida, y el tipo de producción que se va a realizar. Para ensamble de prototipos o piezas de baja producción se puede emplear un proceso de ensamble manual; mientras que para ensambles de piezas que requieren alta calidad o que corresponden a altas tasas de producción se recomienda utilizar procedimientos automáticos o semiautomáticos.

¹⁷ (ASM International, 1998, pág. 503)

En el ensamble de las piezas industriales se emplean generalmente adhesivos de fusión en caliente especialmente diseñados para este proceso. Estos adhesivos se aplican a temperaturas entre 120°C y 130°C. Sin embargo, se pueden emplear otros adhesivos líquidos o de contacto siempre que estos sean adecuados para su uso con los modelos de espuma y sean compatibles con el material fundido que se utilizara en la fundición¹⁸. Algunos adhesivos que se han utilizado exitosamente para ensamblar modelos de EPS son el los adhesivos de poliuretano (Loctite), la silicona en estado sólido y la silicona líquida¹⁹.

Para realizar el ensamble de los elementos de EPS se debe seguir el procedimiento indicado por el adhesivo que se va a emplear. La forma de aplicación varía dependiendo del método de ensamble siendo para un procedimiento manual suficiente el aplicar el adhesivo en los bordes internos y externos de las piezas que se van a unir, mientras que para los procedimientos automáticos o semiautomáticos se sumerge la cara de una de las piezas en un tanque que contiene el adhesivo líquido.

1.2.1.3 Tipos de recubrimiento

El recubrimiento refractario que se aplica a la espuma cumple con las funciones de ser la de barrera entre la superficie suave del modelo y la superficie rugosa de la arena compactada, y la de controlar los productos gaseosos generados por el EPS vaporizado que escapan a través del recubrimiento y la arena que rodea el modelo.

El control de los gases es necesario para mejorar los resultados obtenidos al trabajar con distintos metales fundidos y se logra utilizando recubrimientos con distinta permeabilidad. Las fundiciones de metales ferrosos requieren generalmente recubrimientos de mayor permeabilidad que las fundiciones de metales no ferrosos como al aluminio. El recubrimiento refractario más utilizado por sus propiedades de transferencia de calor y su bajo costo es la sílice.

¹⁸ (ASM International, 1998, pág. 506)

¹⁹ http://www.submarineboat.com/lost_foam_casting.htm

Otro componente que se debe considerar es el solvente que se empleara para el recubrimiento refractario ya que este debe ser compatible con el EPS. El solvente de mayor uso es el agua.

1.2.1.4 Aplicación del recubrimiento

El recubrimiento refractario puede ser aplicado mediante inmersión, aplicación con brocha, rociado con atomizador o flujo de recubrimiento y la selección del método depende del tamaño del modelo. Para modelos pequeños y medianos se prefiere la inmersión, mientras que para modelos grandes se emplean los otros métodos. Cualquiera que sea el método a emplearse se debe asegurar que la totalidad del modelo sea cubierto por el refractario. Una vez que el recubrimiento esta aplicado se debe dejar secar el modelo durante aproximadamente 24 horas. Se puede disminuir el tiempo de secado utilizando hornos o sistemas de microondas.

1.2.2 VENTAJAS

El proceso LFC presenta numerosas ventajas sobre otros métodos de fundición, tales como:

- La fabricación de piezas complejas no requiere líneas de partición ni corazones.
- El proceso emplea cajas de moldeo de una sola pieza de fácil manipulación y bajo costo.
- La espuma EPS tiene un bajo costo y se puede moldear fácilmente en modelos de formas complejas, tamaños variados y alta calidad superficial.
- Las piezas fundidas requieren un mínimo trabajo de acabado y limpieza.
- El proceso puede ser automatizado y tiene un bajo costo para altas tasas de producción.²⁰
- El uso de arenas sin tratamiento, ni aglutinantes hace que el sistema sea económico y fácil de manejar.

²⁰ (Kalpakjian S., 2002, pág. 275)

- La cantidad de trabajo y la habilidad requerida para llevar a cabo este proceso de fundición es menor que en otros métodos.
- Es posible generar modelos ramificados que permiten fundir múltiples piezas a la vez.
- La espuma EPS permite crear prototipos rápidos que ayudan a reducir los costos de desarrollo en las empresas.
- Los elementos utilizados en el proceso tienen un menor impacto ambiental que los usados en otros métodos.

1.2.3 APLICACIONES

Debido al desarrollo histórico de este proceso, su mayor aplicación industrial se ha visto en el sector automotriz, donde se fabrican varios componentes tales como blocks de motor, campanas de freno, discos de freno, cigüeñales, entre otros; sin embargo, este proceso es utilizado también para la fabricación de carcasas de motores eléctricos, bombas centrifugas, accesorios para sistemas de distribución de fluidos, poleas y piezas decorativas.

De manera general este proceso es aplicable a la fabricación de cualquier pieza fundida a partir de aleaciones ferrosas y no ferrosas, pero su potencial es correctamente aprovechado en la manufactura de piezas de formas complejas y/o que requieren un buen acabado superficial y tolerancias estrechas que reduzcan las operaciones de maquinado posterior a la fundición.

1.3 MANUFACTURA DE LOS MODELOS DE ESPUMA EPS

Los modelos de espuma de poliestireno expandido se pueden obtener directamente, con la forma requerida, en la expansión y moldeo final; o mediante el maquinado a partir de las distintas presentaciones comerciales del EPS.

Para obtener los modelos directamente como producto de la expansión final se emplea el moldeo de forma. Este método, descrito en la sección 1.1.2.2.3, es de gran utilidad para la obtención de los modelos que se usan en la fabricación en

serie de piezas fundidas, y tiene la ventaja de permitir un excelente control sobre la densidad del modelo; sin embargo, para bajas tasa de producción y peor aún para la fundición de piezas únicas, este método no se justifica debido los altos costos que involucra la adquisición de las máquinas de producción de poliestireno expandido y los moldes de expansión requeridos para cada forma específica.

El maquinado a partir de las presentaciones comerciales de EPS, al contrario que el moldeo de forma, es el procedimiento adecuado para la fabricación de modelos de espuma EPS que se utilizaran en procesos de fundición con baja tasa de producción o la fundición de piezas únicas. Este método tiene la ventaja de permitir crear modelos de formas libres de una manera rápida, sencilla y, dependiendo de la complejidad del equipo de maquinado, a bajo costo. El maquinado de EPS se puede usar también para la creación de esculturas o figuras que serán utilizadas como adornos o publicidad; y prototipos rápidos que se pueden utilizar en el diseño conceptual de productos comerciales o en la evaluación aerodinámica e hidrodinámica de diseños industriales.

Dado que la fabricación de modelos de EPS para fundición mediante el moldeo de forma es un proceso establecido y ampliamente estudiado, el desarrollo de este trabajo se enfocara en la obtención de un proceso y un equipo que permita realizar las operaciones de maquinado en el poliestireno expandido. Para esto es importante conocer las tecnologías y los equipos con los que se fabrican los modelos de poliestireno.

Es importante mencionar que estas tecnologías permiten también maquinar otros tipos de espumas como las de poliestireno extruido (XPS por sus siglas en ingles) y las de polipropileno expandido (EPP).

1.3.1 TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES DE MAQUINADO

Las tecnologías convencionales de maquinado para la espuma EPS, en el ámbito industrial y artesanal, son el fresado y el corte con alambre caliente.

1.3.1.1 Maquinado por fresado

El maquinado por fresado consiste en labrar el EPS utilizando herramientas giratorias especiales para obtener los objetos con la forma requerida. Este procedimiento permite obtener piezas de formas complejas con buena calidad superficial y precisión. Sin embargo, la adquisición de la maquinaria involucra una gran inversión que solo se justifica si se van a realizar trabajos de gran tamaño para producción comercial.



Figura 1.8 Máquinas fresadoras para espuma EPS²¹.

1.3.1.2 Maquinado por “corte” con alambre caliente

El maquinado por “corte” con alambre caliente se basa en hacer pasar corriente por un alambre metálico delgado para que este, debido a su resistividad, se caliente hasta alcanzar una temperatura adecuada para que el calor emitido por el alambre vaporice el EPS y se realice el “corte”. Los alambres utilizados pueden ser delgados y tensionados cuando se quiere realizar un corte recto, o gruesos y sujetos en sus extremos cuando se requiere utilizar alambres preformados para dar perfiles específicos a las piezas. Esta tecnología se aplica utilizando equipos domésticos o artesanales hasta máquinas comerciales e industriales.

²¹ <http://g01.s.alicdn.com/kf/HTB1YSBgHFXXXXcwXpXXq6xXFXXXt/Factory-Price-Foam-4-Axis-Cnc-Router.jpg>

Los equipos domésticos son generalmente pequeños, se controlan manualmente y se utilizan para la creación de objetos de formas libres para aplicaciones didácticas o artísticas. La necesidad de control manual de estos equipos impide obtener piezas con buenos acabados superficiales y/o de gran tamaño. La **Figura 1.9** muestra algunos ejemplos de maquinado utilizando los equipos domésticos y sus resultados. Este es el método que emplea actualmente el laboratorio de fundición de la Escuela Politécnica Nacional para fabricar sus modelos de EPS para el proceso LFC.

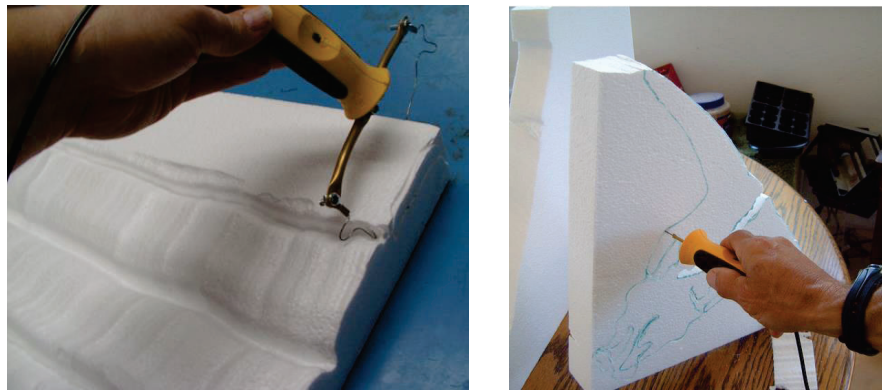


Figura 1.9 Proceso de maquinado manual de EPS por “corte” con alambre caliente²².



Figura 1.10 Máquinas CNC de “corte” por alambre caliente para EPS²³.

Las máquinas de “corte” por alambre caliente de aplicación comercial e industrial generalmente son controladas numéricamente y permiten obtener elementos

²² https://hotwirefoamfactory.com/images/D/k47_3-14.jpg

²³ http://www.cnc-multitool.com/shopseiten/cnc-multitool/images//test/cut4000S_1.png

maquinados de todos los tamaños, con buena calidad superficial y precisión. Las características geométricas que se pueden obtener con estas máquinas se ve limitado por la necesidad de usar alambre caliente tensionado o preformado como elemento de maquinado. Adicionalmente, si bien el costo de las opciones básicas y pequeñas de esas máquinas es relativamente accesible, el costo para las máquinas con características mejoradas y de mayores tamaños puede fácilmente llegar a ser tan alto como el de las fresadoras. La **Figura 1.10** muestra algunos ejemplos de las distintas opciones y tamaños de maquinaria que existe en el mercado para esta tecnología.

1.3.2 NUEVAS TECNOLOGÍAS DE MAQUINADO

Las nuevas tecnologías de maquinado para materiales espuma surgen como respuesta a la necesidad de sistemas que llenen la brecha entre las máquinas de prototipado rápido (PR) convencionales y los equipos de maquinado de materiales espuma convencionales (**Figura 1.11**). A estos nuevos sistemas se los conoce como máquinas de corte de espumas para prototipado rápido (PR).

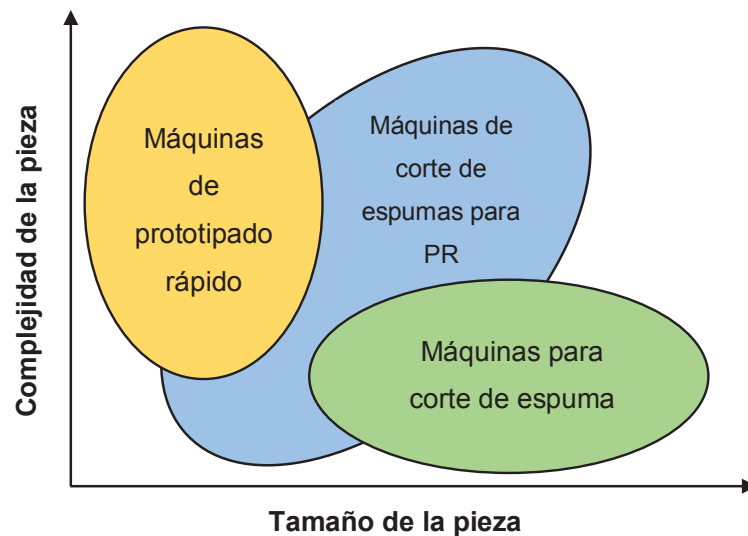


Figura 1.11 Comparación entre las capacidades de tamaño y complejidad de manufactura entre las máquinas de prototipado rápido, de corte de espuma y de corte de espuma para prototipado rápido²⁴.

²⁴ (Brooks & Aitchison, 2010)

El prototipado rápido se refiere, de manera general, a cualquier tecnología que permite fabricar rápidamente modelos a escala real de piezas o ensambles a partir de modelos creados en un programa de diseño asistido por computadora (CAD por sus siglas en inglés). Si bien existen varias tecnologías de PR la mayoría de ellas funcionan bajo el principio de manufactura aditiva el cual se define como un proceso de unión de materiales, usualmente capa sobre capa, para fabricar objetos a partir de datos de modelos 3D. El principio de manufactura aditiva, en función del espesor de las capas que se utilizan, se divide en dos tipos de procesos, estos son: manufactura aditiva por capas delgadas, cuando se utilizan capas con espesores de hasta 1mm; y manufactura aditiva por capas gruesas, cuando se emplean capas con espesores mayores a 1mm. La **Figura 1.12** ilustra de mejor manera la clasificación de las tecnologías de prototipado rápido.

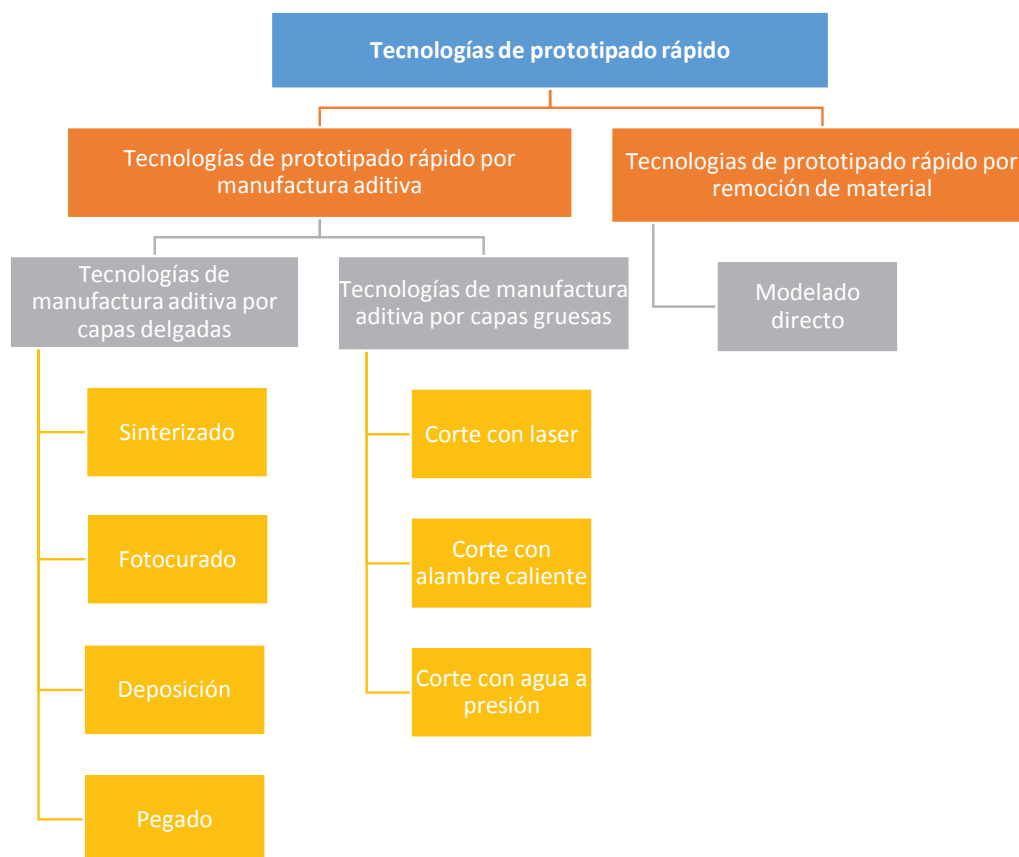


Figura 1.12 Clasificación de las tecnologías de prototipado rápido^{25, 26}.

²⁵ (Ahn, 2002, pág. 5)

²⁶ (Pham & Gault, 1998, pág. 3)

Las máquinas de PR convencionales emplean el principio de manufactura aditiva por capas delgadas las cuales son depositadas sucesivamente para formar los cuerpos 3D. Estas capas tienen bordes verticales y por lo tanto dan como resultado elementos con superficies escalonadas (**Figura 1.13**). Para mejorar la calidad superficial y minimizar el efecto del escalonamiento se deben emplear capas muy delgadas, pero esto se traduce en el aumento de tiempo de manufactura y la consecuentemente incapacidad de producir objetos de tamaño medio y grande de manera eficiente y eficaz. Es importante mencionar que si bien el PR se usó inicialmente solo para el diseño conceptual de productos ahora sus aplicaciones se han diversificado ampliamente (**Figura 1.14**).

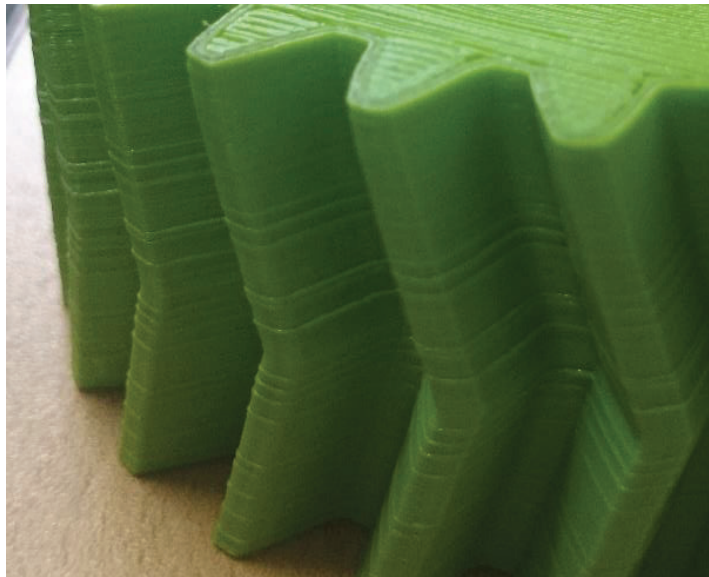


Figura 1.13 Elementos fabricados utilizando las tecnologías convencionales de prototipado rápido.

Fuente: Propia

Por otro lado, como se indica en la sección 1.3.1, las tecnologías convencionales de maquinado de materiales espuma permiten obtener piezas de gran tamaño rápidamente pero involucran un costo muy alto como para justificar su uso en la fabricación de piezas destinadas a prototipos y producción no industrial.

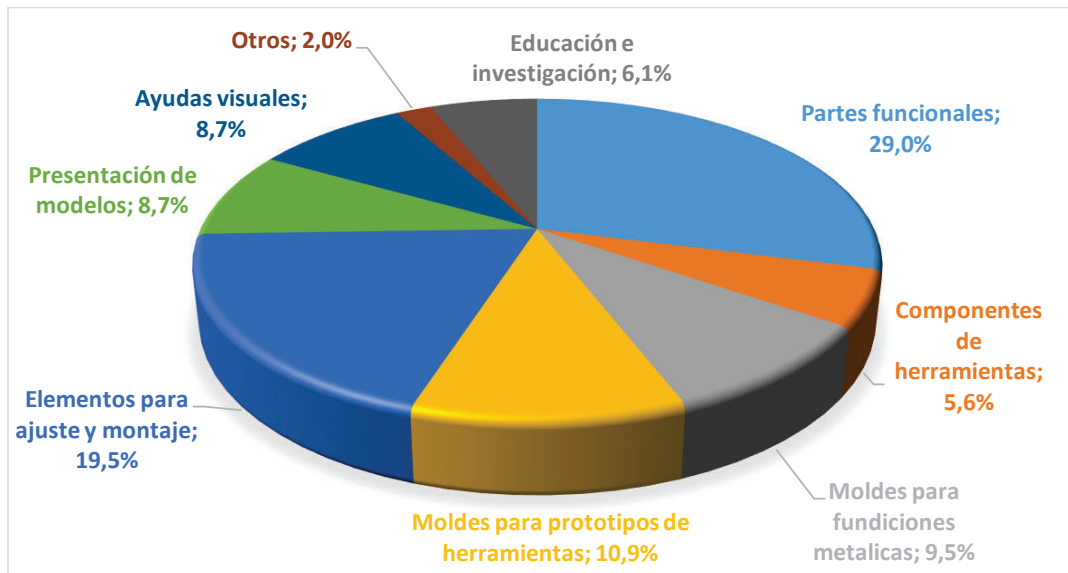


Figura 1.14 Distribución de aplicaciones para los elementos fabricados por prototipado rápido²⁷.

Para suplir las limitaciones de las tecnologías antes señaladas, y realizar trabajos de prototipado rápido y manufactura en materiales espuma, se han desarrollado las máquinas de corte de espuma para PR. Estos sistemas permiten obtener elementos con características geométricas complejas, en tamaño medio y grande, de una manera rápida y con bajo costo. Los métodos de fabricación que utilizan estas tecnologías son: la manufactura por capas, que consiste en construir cuerpos solidos mediante el ensamble de capas maquinadas individualmente; y el modelado directo, en el cual se maquina íntegramente el elemento que se quiere fabricar a partir de una sola pieza de materia prima. A continuación se presentan algunos ejemplos de las máquinas de corte de espuma para PR que han sido desarrolladas en varios lugares del mundo.

1.3.2.1 Freeform Automated Sculpting Technology (FAST)

FAST es el nombre con el que se conoce a un sistema de corte de espuma para PR desarrollado en el 2010 por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Canterbury en Nueva Zelanda. El sistema trabaja con el método de modelado directo y está compuesto por un scanner laser que permite adquirir la

²⁷ Wohlers Report 2014. Wohlers Associates, Inc.

información de alguna superficie que se quiera replicar, un software CAD/CAM para preparar los modelos 3D y producir los perfiles de corte, un robot industrial Kuka KR6 con 6 ejes de movimiento utilizado para mover la herramienta de corte siguiendo los perfiles, y una herramienta de corte (cuchillas de nicromo de varios tamaños) calentada por resistividad para cortar el material espuma (**Figura 1.15**).

Con el sistema FAST se pueden obtener elementos de muy alta complejidad con buen acabado superficial, y tamaños medianos y grandes (**Figura 1.15**).

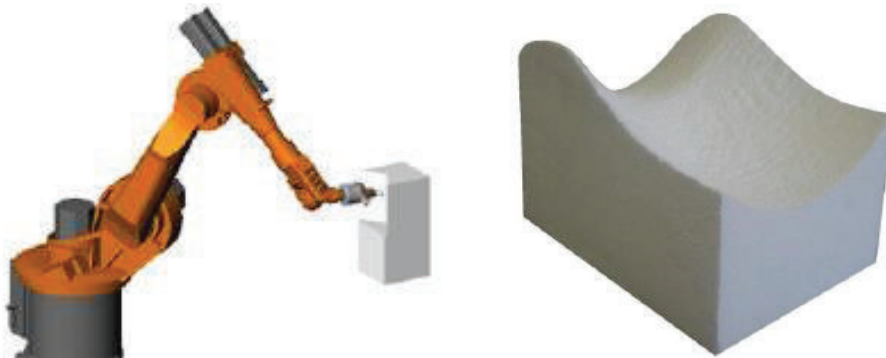


Figura 1.15 Sistema de corte FAST y soporte para cuello fabricado con el mismo²⁸.

1.3.2.2 ModelAngelo

ModelAngelo es un sistema completo, desarrollado en el 2005 por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Americana de Beirut en el Líbano, que está formado por una máquina de corte de espuma para PR y un software propio. Esta tecnología emplea una herramienta de corte calentada por resistividad, compuesta por dos alambres pequeños de acero inoxidable, y una combinación de movimientos giratorios y lineales para realizar un procedimiento de moldeado directo.

El procedimiento de corte empieza por sujetar el material a un mecanismo similar al de un torno. A continuación se realizan los movimientos lineales y giratorios, de

²⁸ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 4)

manera sincronizada, que permitirán remover el material y obtener la pieza maquinada.

Con este método se pueden fabricar elementos medianos de baja complejidad, buenos acabados superficiales. La limitación a objetos medianos se presenta por el tamaño de la máquina. Adicionalmente se tiene el impedimento de maquinar una cara de la pieza ya que es necesario mantener sujeto uno de los lados de la espuma durante el corte. Algunos ejemplos de piezas fabricados con ModelAngelo se muestran en la **Figura 1.16**.



Figura 1.16 Piezas de espuma fabricadas con el sistema ModelAngelo²⁹.

1.3.2.3 Rapid Heat Ablation (RHA)

El procedimiento RHA, desarrollado en el 2006 por el Instituto de Ciencia y Tecnología Avanzada de Corea (KAIST), es una técnica de moldeo directo que consiste en utilizar una herramienta caliente montada en el cabezal de una fresadora. La herramienta utilizada en este sistema está especialmente diseñada para maquinar el material espuma mediante ablación y, a diferencia de las herramientas de otros sistemas tiene la forma de una fresa de mecanizado con punta redonda.

El método RHA permite obtener piezas complejas con muy buen acabado superficial y precisión, con poco material residual, y en menor tiempo que las

²⁹ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 8)

tecnologías convencionales de maquinado. Pero por otro lado, el tamaño de las piezas que se pueden fabricar es limitado y se pierde una gran cantidad de material debido al tamaño de la herramienta. La **Figura 1.17** muestra el proceso de fabricación y una pieza fabricada por el método RHA.

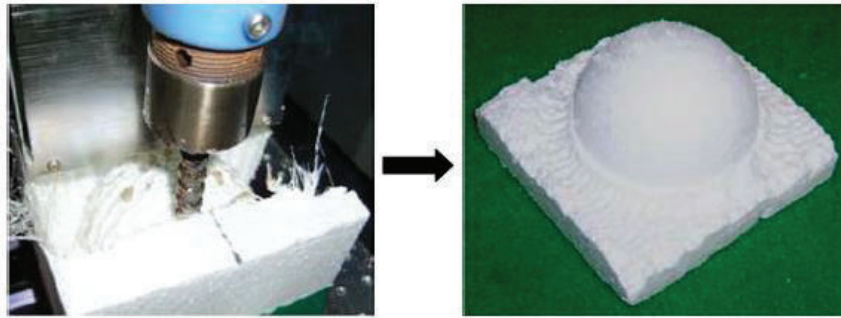


Figura 1.17 Fabricación de una pieza por el método RHA³⁰.

1.3.2.4 Michelangelo

Michelangelo es un sistema de moldeado directo de materiales espuma desarrollado en el año 2006 en el Instituto de Tecnología de Tokio. El sistema está formado por un robot industrial con seis ejes de movimiento y una mesa de trabajo con dos ejes de movimiento. El método de fabricación consiste en tallar caras planas en el material, a partir de un modelo simplificado del elemento que se quiere maquinar, utilizando un alambre caliente como herramienta de corte.

El procedimiento de manufactura empieza con la generación de un mallado para el modelo que se quiere fabricar. El proceso continua con la aplicación de un algoritmo de simplificación del mallado que permite disminuir la complejidad de la pieza y así facilitar el maquinado. Con el mallado definido, se procede a generar el perfil de corte que seguirá el equipo y a realizar la simulación de interferencia para el proceso de corte. Finalmente se realiza el maquinado de la pieza.

El sistema Michelangelo permite obtener piezas relativamente grandes mucho más rápido que por otros métodos, pero por otro lado, no se pueden producir elementos

³⁰ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 13)

que tengan características muy complejas o que requieran alta precisión. La **Figura 1.18** muestra el equipo Michelangelo y una pieza fabricada con este sistema.

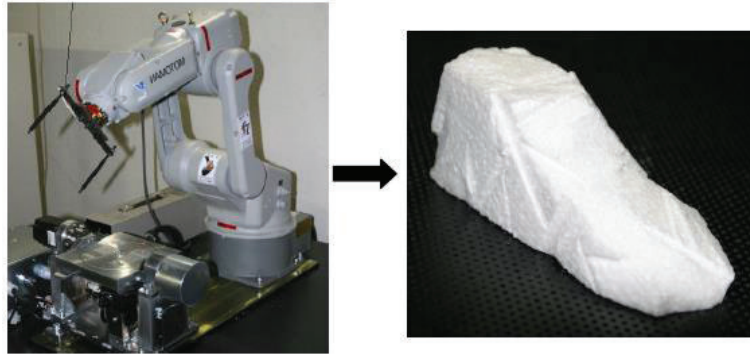


Figura 1.18 Equipo Michelangelo y pieza fabricada por este sistema³¹.

1.3.2.5 True Surface System (Trusurf)

Trusurf es un sistema, desarrollado en 1997 por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Queensland en Australia, que usa el método de manufactura por capas para crear modelos de espuma de tamaños superiores a 1m³. Este sistema consiste de un equipo de 5 ejes de movimiento que corta las secciones transversales de la pieza que se quiere fabricar utilizando un chorro de agua a presión. El chorro de agua puede ser direccionado para obtener capas de material con bordes inclinados que reducen el acabado escalonado que se presenta normalmente en los sistemas de manufactura por capas. Gracias a esta característica se pueden utilizar planchas de hasta 30mm de espesor para fabricar las capas y de esta manera obtener elementos de mayor tamaño en menor tiempo.

El procedimiento de manufactura del Trusurf empieza con la creación del modelo a fabricar. Seguidamente, el sistema genera el perfil de corte directamente del modelo CAD y la máquina realiza el corte siguiendo este perfil. Con las capas cortadas, se procede a ensamblar y pegar las capas manualmente hasta formar la pieza final. La **Figura 1.19** muestra dos ejemplos de piezas fabricadas con Trusurf.

³¹ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 14)

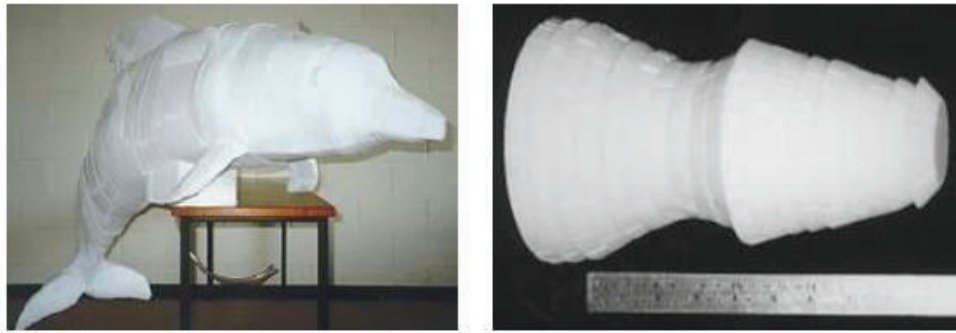


Figura 1.19 Piezas de EPS fabricadas con el sistema Trusurf³².

1.3.2.6 Shapemaker II (SMII)

Shapemaker II es un sistema de manufactura desarrollado en 1996 por el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de Utah. Este sistema fue diseñado para producir elementos de tamaños superiores a 1m^3 a partir de espumas de poliestireno y consiste en realizar cortes en planchas de 25mm de espesor utilizando alambre caliente. El alambre caliente se encuentra sujeto a dos cabezales independientes que realizan los movimientos de corte y generan capas con bordes inclinados. Estas capas son ensambladas posteriormente a mano.

Esta tecnología presenta la ventaja de poder crear piezas de gran tamaño con formas complejas. Sin embargo, este sistema no permite crear capas que tengan bordes con inclinación superior a los 45° y no se pueden utilizar planchas menores a 25mm por lo que es imposible crear objetos que requieran capas más delgadas.

1.3.2.7 Freeform Thick Layered Object Manufacturing (FF-TLOM)

FF-TLOM es una tecnología desarrollada en la Facultad de Diseño de la Universidad de Tecnología de Delft en Holanda y que emplea el principio de manufactura por capas para crear piezas de XPS (Poliestireno extruido). Para realizar el maquinado se emplea un robot con seis grados de movimiento en

³² (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 6)

conjunto con un equipo de tres grados de libertad para sujetar la cuchilla flexible de nicromo que se usa como herramienta de corte.

El sistema FF-TLOM puede producir piezas grandes con buen acabado superficial, pero está limitado a piezas con forma de sólidos de revolución u objetos que tengan pocos cambios de curvatura. La **Figura 1.20** muestra ejemplos de piezas fabricadas con FF-TLOM.

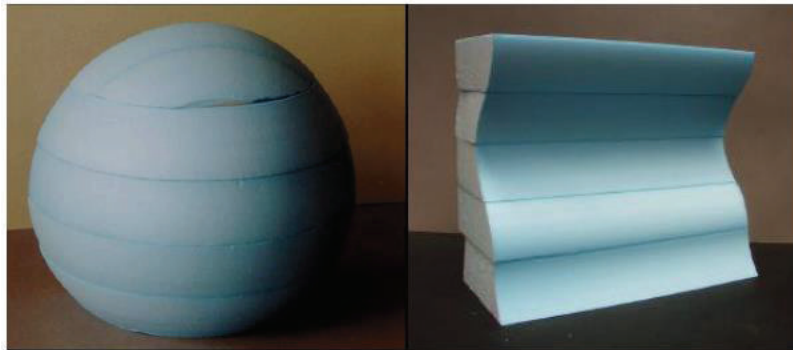


Figura 1.20 Piezas fabricadas con el sistema FF-TLOM³³.

1.3.2.8 Variable Lamination Manufacturing (VLM)

El sistema VLM fue desarrollado en el 2002 en el Departamento de Ingeniería Mecánica del KAIST en Taejon, Corea. Este sistema se basa en el método de manufactura por capas y utiliza una máquina con cuatro ejes de movimiento para controlar el alambre caliente que se utiliza como herramienta de corte para obtener secciones con bordes inclinados. Las principales ventajas de este sistema son la alimentación automática de material, la posibilidad de usar planchas de diferentes espesores y el ensamble automático de la pieza al final del proceso.

Este método permite fabricar rápidamente piezas grandes y muy complejas. Por las ventajas que presenta este sistema y por su nivel de automatización, el proceso VLM ha llegado a ser comercializado por la empresa Menix Engineering Co. Ltd. bajo el nombre e Rapid Shaper (**Figura 1.21**).

³³ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 10)



Figura 1.21 Máquinas Rapid Shaper basadas en el sistema VLM³⁴.

1.3.2.9 Stratoconcept

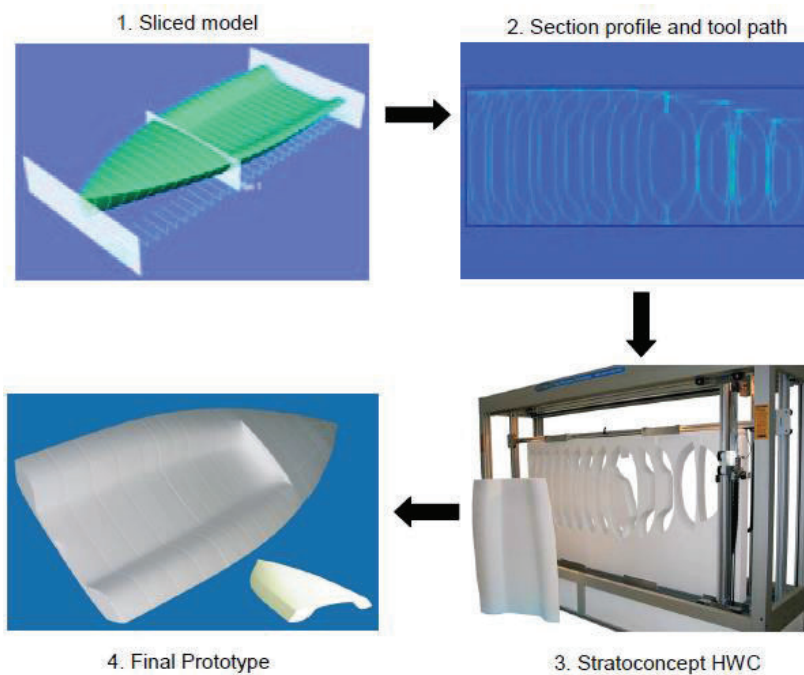


Figura 1.22 Proceso de fabricación de piezas con el sistema Stratoconcept³⁵.

La tecnología Stratoconcept fue desarrollada en conjunto por la empresa de manufactura de sistemas de corte de espumas por alambre caliente, Croma, y el

³⁴ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 12)

³⁵ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 15)

centro Europeo de prototipado rápido y herramientas, Cirtes. Stratoconcept se basa en la manufactura por capas mediante el corte por alambre caliente con una máquina de cuatro ejes de movimiento (**Figura 1.22**).

Este sistema permite fabricar rápidamente piezas de gran tamaño, sin embargo, las capas del modelo deberán ser ensambladas y pegadas manualmente.

1.3.2.10 Comparación de los ejemplos de nuevas tecnologías de maquinado

Las características de los sistemas descritos anteriormente permiten realizar una comparación entre sus capacidades y principios de funcionamiento. La **Figura 1.23** compara las capacidades, en cuanto a complejidad y tamaño de las piezas obtenidas, de los sistemas presentados.



Figura 1.23 Comparación de capacidades de complejidad y tamaño de las máquinas de corte de espuma para PR³⁶.

La **Tabla 1.6** resume la información del método de manufactura y la herramienta de corte utilizada en cada una de las máquinas de corte de espuma para PR presentada.

³⁶ (Brooks & Aitchison, 2010, pág. 16)

Tabla 1.6 Método de manufactura y herramienta de corte utilizada para cada máquina de corte de espuma para PR.

Sistema	Herramienta de corte	Método de manufactura
FAST	Cuchilla caliente	Modelado directo
ModelAngelo	Alambre caliente	
RHA	Herramienta caliente	
Michelangelo	Alambre caliente	
Trusurf	Agua a presión	Manufactura aditiva por capas
SM II	Alambre caliente	
FF-TLOM	Cuchilla caliente	
VLM	Alambre caliente	
Stratoconcept	Alambre caliente	

CAPITULO 2. PRUEBAS PRELIMINARES Y DISEÑO DEL EQUIPO EN UN PROGRAMA CAD

El proceso de diseño de una máquina es una actividad que se realiza con el objetivo de concebir un producto que satisfaga una demanda o necesidad. Esta se lleva a cabo, de manera general, en cuatro etapas que son: definición del producto o requerimiento, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle³⁷.

A continuación se presenta el desarrollo de cada una de estas etapas, aplicadas al diseño de un equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS, que es requerido por el laboratorio de fundición de la EPN, para fabricar cuerpos 3D que puedan ser usados como modelos de fundición gasificables en el proceso LFC.

2.1 DEFINICIÓN DEL PRODUCTO O REQUERIMIENTO

Esta etapa tiene el objetivo de definir las especificaciones que deberá cumplir la máquina a diseñarse. Las especificaciones son el conjunto de características y funciones que se originan a partir de los requerimientos y/o deseos planteados por quien solicita la máquina, por el proceso mismo y por el equipo de diseño. El conjunto de especificaciones se organizan y presentan en un documento de especificación (**Tabla 2.1**).

Para responder al requerimiento del laboratorio de fundición se propone desarrollar un equipo de maquinado de materiales espuma que corresponda al grupo de máquinas de corte de espuma para PR (ver sección 1.3.2), que emplee el método de manufactura aditiva por capas gruesas y que realice el corte de las láminas empleando un elemento caliente. El laboratorio de fundición requiere que el equipo cumpla con las siguientes funciones y características:

- Cortar perfiles en láminas de EPS que posteriormente serán ensambladas para formar los cuerpos.

³⁷ (Riba Romeva, 2002, pág. 78)

- Utilizar láminas de EPS de presentación comercial con dimensiones de 500x500 en varios espesores.
- Obtener los perfiles de corte utilizando un software de generación de trayectorias.
- Realizar el proceso de corte automáticamente mediante la utilización de un software de control.

Para establecer algunas características adicionales que deberá tener la máquina para realizar correctamente su tarea de corte se recurre a la información disponible en proyectos o investigaciones realizados en el campo del maquinado de espumas de poliestireno. La información disponible sobre los procedimientos y parámetros que intervienen en los distintos métodos de corte para materiales espuma es limitada. Sin embargo, se han desarrollado algunas investigaciones alrededor del mundo con el objetivo de establecer las condiciones óptimas de maquinado para las espumas de poliestireno mediante el corte con alambre caliente. De estas investigaciones experimentales, así como de las especificaciones de equipos de similares características, se ha obtenido información importante sobre las relaciones entre las variables que intervienen en el proceso y los valores referenciales para las mismas. Esta información se describe a continuación:

- La temperatura de fundición del EPS es de 240°C y la temperatura de descomposición es de 470°C³⁸.
- La velocidad de los equipos de corte de EPS varía en función de las características específicas de los mismos. Sin embargo, se han encontrado equipos con velocidades de corte que van desde 1mm/s³⁹ hasta 60mm/s⁴⁰.
- Manteniendo una temperatura igual o superior a los 240°C y velocidades bajas, se puede realizar el corte sin ejercer fuerza sobre el elemento de corte⁴¹.
- El ancho de corte que deja el alambre caliente en el EPS depende de la temperatura y la velocidad, siendo directamente proporcional a la temperatura

³⁸ (Ahn, 2002, pág. 56)

³⁹ (Beltrán Venegas & Vela Chulde, 2010, págs. 146-152)

⁴⁰ <http://www.cnc-multitool.com/cnc/foam-cutting-machine/independent-axis/cut3000s.html>

⁴¹ (Aitchison, Brooks, Bain, & Pons, 2009, pág. 2)

e inversamente proporcional a la velocidad. Tamaños grandes para el ancho de corte involucran una incertidumbre sobre la precisión dimensional del proceso de corte y por lo tanto se debe buscar reducir tales valores⁴².

Esta información nos permite determinar que, se requiere un equipo que pueda calentar el elemento de corte a una temperatura mínima de 240°C, que tenga un rango de velocidad desde 1mm/s hasta 60mm/s y que permita regular tanto la temperatura como la velocidad para que, mediante ensayos, se puedan encontrar las condiciones óptimas para realizar el procedimiento de corte sin ejercer fuerzas en el elemento/herramienta caliente.

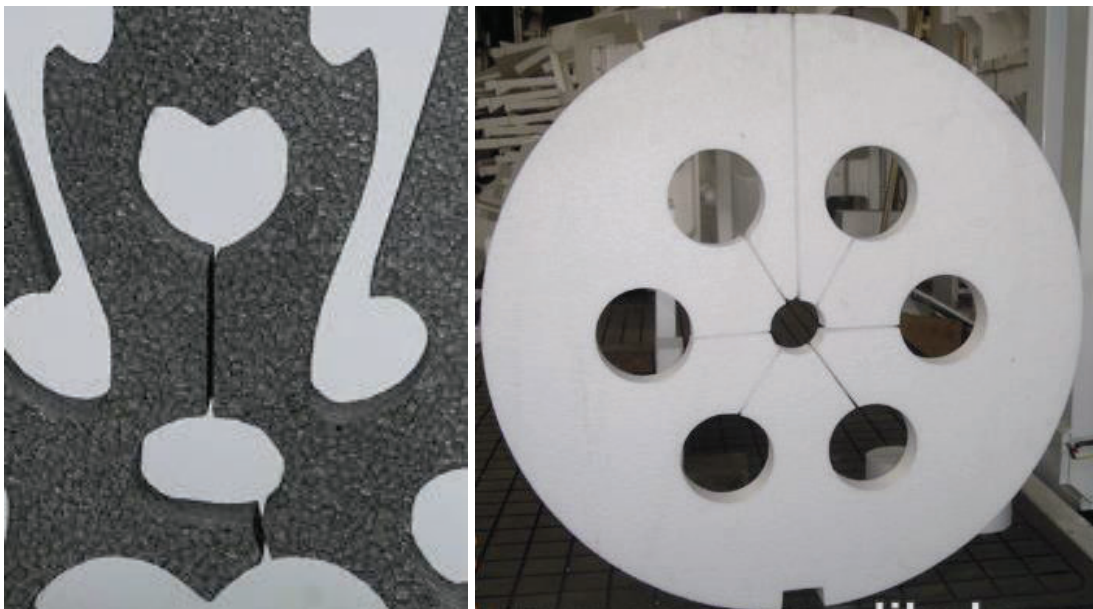


Figura 2.1 Piezas con perforaciones interiores fabricadas con máquinas de corte por alambre caliente convencionales (los cortes indeseables a través de las mismas son evidentes)⁴³.

Adicionalmente se plantea que el equipo permita fabricar piezas con perforaciones internas sin tener que cortar a través de las mismas. El planteamiento responde a que esta tarea no se puede llevar a cabo en las máquinas de corte por elemento caliente existentes en la actualidad sin dejar una marca en la pieza cortada (**Figura 2.1**).

⁴² (Aitchison, Brooks, Bain, & Pons, 2009, pág. 3)

⁴³ http://i00.i.aliimg.com/photo/v0/50005741310_3/XPS_and_EPS_CNC_hot_wire_foam.jpg
http://i00.i.aliimg.com/img/pb/910/924/838/838924910_336.jpg

El conjunto de funciones, características y requerimientos mencionados se resume en la **Tabla 2.1** como el documento de especificación.

Tabla 2.1 Documento de especificación para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA POR LAMINAS DE ESPUMA POLIESTIRENO			Fecha inicial: 11/03/2015	
			Última revisión: 10/04/2015	
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	11/03/2015	LF	R	Cortar perfiles de las secciones de objetos 3D en láminas de material espuma de poliestireno.
	27/03/2015	D	R	Calentar el elemento/herramienta de corte a más de 240°C.
	27/03/2015	D	D	Realizar perforaciones internas en las secciones de objetos 3D sin cortar a través de las mismas.
Dimensiones	11/03/2015	LF	R	Las láminas a cortar tienen las dimensiones de 500x500 y espesores de hasta 20mm.
Movimientos	27/03/2015	D	R	Velocidad variable para el movimiento de corte en el rango de 1mm/s a 60mm/s.
Fuerzas	03/04/2015	D	NR	No deben actuar fuerzas en el elemento/herramienta de corte.
Materiales	11/03/2015	LF	R	Láminas de EPS de presentación comercial.
Señales y control	11/03/2015	LF	R	Perfiles de corte deben ser generados por un software.
	11/03/2015	LF	R	Un software debe controlar el proceso de corte.
Propone:	LF = Laboratorio de fundición; D = Diseñadores			
R/D:	R = Requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo			

Fuente: Propia

2.2 DISEÑO CONCEPTUAL

“El diseño conceptual parte de la especificación obtenida y proporciona como resultado un principio de solución aceptado”⁴⁴.

Para cumplir con las especificaciones planteadas para la máquina se requiere encontrar soluciones para los siguientes sistemas funcionales:

- Sistema de corte.
- Sistema de movimiento.
- Sistema de control.

2.2.1 SISTEMA DE CORTE

Un sistema de corte está compuesto, de manera general, por la herramienta de corte, el mecanismo de sujeción de la herramienta y el mecanismo de calentamiento, y, conjuntamente con el sistema de movimiento, cumple con la función de realizar el corte en las láminas de EPS. Los sistemas de corte por elemento caliente utilizados en la actualidad (ver sección 1.3) emplean un alambre o cuchilla sujetos o tensionados en sus extremos, y que se calientan al hacer pasar corriente eléctrica a través de ellos.

Como alternativa a estos sistemas convencionales, se propone un método de corte que utilice un elemento (alambre o herramienta) calentado mediante transferencia de calor desde una fuente caliente. El sistema propuesto no necesitará de un mecanismo de tensión o sujeción en ambos extremos del elemento de corte por lo que permitirá realizar perforaciones internas en las secciones de los objetos 3D sin cortar a través de las mismas.

Para comprobar la validez del sistema se realizaron pruebas preliminares calentado varios elementos mediante transferencia de calor desde una resistencia eléctrica y

⁴⁴ (Riba Romeva, 2002, pág. 91)

verificando que es posible realizar el corte de láminas de EPS. El procedimiento de las pruebas fue el siguiente:

- Enrollar alambre de Nicromo en los elementos de prueba.
- Conectar los extremos del alambre de Nicromo a una fuente eléctrica.
- Encender la fuente para calentar el alambre de Nicromo.
- Permitir que se caliente el elemento de prueba.
- Cortar láminas de EPS utilizando el elemento calentado (**Figura 2.2**).

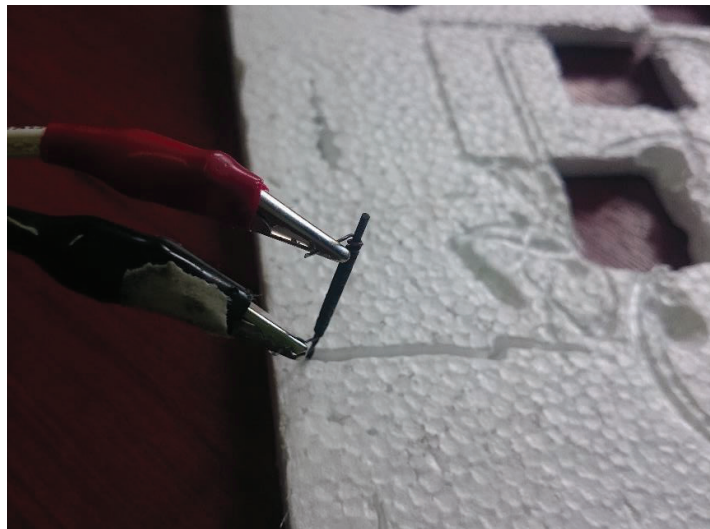


Figura 2.2 Procedimiento de corte de láminas de EPS utilizando un elemento calentado.

Fuente: Propia

Una vez realizadas las pruebas, se decide aplicar el método de corte por elemento calentado como la solución para el sistema de corte ya que se comprobó que este método es viable.

2.2.2 SISTEMA DE MOVIMIENTO

El sistema de movimiento será el encargado de mover al sistema de corte para obtener las secciones cortadas de EPS. Los sistemas comúnmente utilizados están compuestos por motores eléctricos, conectados a tornillos de potencia, que mueven los componentes de los equipos a lo largo de los ejes de desplazamiento.

Para realizar el movimiento de corte se plantea utilizar un sistema de movimiento que desplaza un cabezal o una base a través de los ejes cartesianos XYZ. Todos los ejes son conducidos por motores eléctricos que se mueven con velocidad variable. Los movimientos horizontales son transmitidos utilizando bandas de distribución y los movimientos verticales utilizando tornillos de potencia. Este enfoque se fundamenta en los principios y configuración utilizada en otros equipos de manufactura aditiva de código abierto siendo el proyecto RepRap la base de todos ellos⁴⁵.

Para definir completamente la solución para el sistema de movimiento se debe seleccionar el tipo de motor eléctrico que permitirá mover el equipo con velocidad variable. La selección del motor eléctrico se realizará entre dos tipos de motores usados comúnmente en estas aplicaciones: los servomotores y los motores paso a paso.

Servomotores

Un servomotor (**Figura 2.3**) es un dispositivo pequeño que puede ser controlado tanto en velocidad como en posición mediante una señal codificada, al modificar esta señal la posición angular de los engranajes cambia. Los servomotores son usados en radio control, marionetas y en robots.



Figura 2.3 Servomotor para un sistema de movimiento⁴⁶.

⁴⁵ http://reprap.org/wiki/RepRap_Options

⁴⁶ <http://www.directindustry.com/prod/sanyo-denki-europe/product-8104-489998.html>

Este tipo de motores están compuestos por circuitos de control y una resistencia variable (potenciómetro) que está conectada al eje central del servomotor. El potenciómetro es el componente que permite a los circuitos de control determinar el ángulo en el que se encuentra el motor y en función de esta información llevar a cabo la acción correspondiente. En el caso de que el eje se encuentre en la posición correcta el motor se apagara mientras que si el ángulo no es el correcto el circuito hace girar al motor en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. En un servomotor normal el control del movimiento angular se realiza entre 0° y 180° ⁴⁷.

Las características de los servomotores son⁴⁸:

- Alto costo de adquisición (especialmente si tienen un motor AC).
- Se necesita cables tanto para el motor como para los circuitos de control.
- Se necesita mantenimiento de las escobillas en los motores DC.
- El motor puede alcanzar velocidades mayores de 4000 RPM y entregar un torque de magnitud considerable.
- Debido a su control de lazo cerrado se tiene una mayor certeza de la correcta posición de estos motores.

Motores “paso a paso”

Los motores “paso a paso” (**Figura 2.4**) tienen la característica principal de moverse un paso a la vez por cada pulso aplicado y son usados en equipos que requieren movimientos precisos. Los pasos van desde 90° a 1.8° . Estos motores se clasifican en motores paso a paso de imán permanente, de reluctancia variable e híbridos. Dentro de los motores de imán permanente, se encuentran los motores bipolares los cuales son los adecuados para la aplicación de movimiento de ejes debido a que, para las mismas características eléctricas y tamaño, estos entregan más torque que los motores “paso a paso” unipolares.

⁴⁷ <http://www.info-ab.uclm.es/labelec/solar/electronica/elementos/servomotor.htm>

⁴⁸ (Artsoft USA, pág. 37)

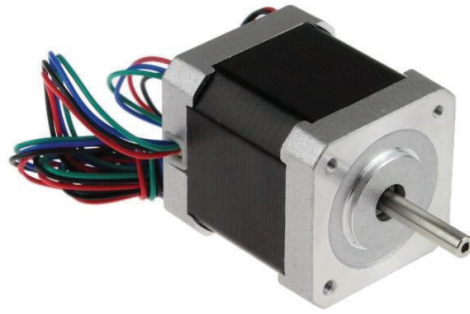


Figura 2.4 Motor “paso a paso” para un sistema de movimiento⁴⁹.

Las características de los motores “paso a paso” bipolares son⁵⁰:

- Bajo costo de adquisición.
- Conexión simple al motor con solo cuatro cables.
- Bajo mantenimiento.
- Velocidad del motor limitada a 1000 RPM y torque limitado a 21 Nm.
- Tienen un control de lazo abierto por lo que pueden perder pasos si se sobrecargan.

En nuestro caso se propone un sistema de corte en el que no existirán mayores cargas sobre el elemento de corte y se estima que los elementos que conforman el sistema de movimiento no supondrán una carga mayor a 1Nm. Adicionalmente el rango de velocidad que requiere el equipo (entre 1mm/s y 60mm/s) se puede obtener fácilmente con velocidades menores a las 1000 RPM. En base a las consideraciones mencionadas, se decide utilizar los motores “paso a paso” debido a que estos son los adecuados para aplicaciones con cargas bajas y donde no se requieren velocidades excepcionalmente altas. Adicionalmente, el relativo bajo costo de adquisición de estos motores en contraposición al de los servomotores es un beneficio adicional en su selección.

⁴⁹ http://2.bp.blogspot.com/-yhKSTGwrIX4/UfrLm60CnOI/AAAAAAAAADM/NY5BMn1oOp0/s1600/stepper_motor.jpg

⁵⁰ (Artsoft USA, pág. 37)

2.2.3 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control será el encargado de controlar al sistema de movimiento y de corte para obtener las secciones de los modelos 3D. Un sistema de control, para los equipos de este tipo, está compuesto por: un software para generar las instrucciones de movimiento, generalmente en formato “GCode” (ver sección 4.1.1); un software de control que lee, interpreta y envía las instrucciones de movimiento generadas previamente; y una tarjeta electrónica que recibe las instrucciones y las utiliza para accionar los distintos elementos del equipo (motores, sensores, indicadores luminosos, cartucho de calentamiento y termocupla). La tarjeta electrónica se adquiere en función del software de control que se va a utilizar, por lo que es necesario definir el o los softwares con los que va a trabajar el equipo.

La mayoría de softwares de control no tienen la opción de generar por si solos las instrucciones de movimiento y se limitan a leer, interpretar y enviar las mismas. En este caso se requiere instalar adicionalmente algún software de generación de instrucciones, entre los cuales encontramos a:

- Cura (Actúa también como software de control. Es extremadamente rápido y preciso).
- Slic3r (Software más popular pero contiene muchos errores).
- Lazycam.

Independientemente del software de generación que se seleccione antes se debe definir cuál será el software que controlara el equipo. Existen una gran cantidad de paquetes computacionales de control para máquinas. Sin embargo, las características de los paquetes que se buscan en para nuestra aplicación son:

- EL software no debe ser diseñado para una máquina específica, y debe permitir ser configurado para adaptarse a las necesidades de la máquina a ser diseñada (Opciones de control).
- El software debe incluir las opciones y funciones para realizar el control de temperatura.

- La interface usuario máquina debe ser amigable sin que esto implique opciones de control limitadas (Interface).
- El software debe tener incluidas la mayor cantidad de funciones necesarias para llevar el proceso de corte (Funciones incorporadas).
- De ser posible, el software debe ser de formato libre y no deberá requerir el pago de licencias de uso (Licencia).

Las opciones de paquetes computacionales para el control del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS que se analizaron son las siguientes:

Mach 3

Mach 3 es un software de control CNC para máquinas herramientas que se usa ampliamente a nivel mundial. Algunas de las máquinas en las que se utiliza este software de control son: fresadoras, enrutadores, equipo de corte con plasma, entre otros. El Software Mach 3 (**Figura 2.5**) tiene las siguientes características:

- Permite controlar hasta seis ejes de movimiento.
- Permite accionar un eje giratorio para una herramienta.
- Permite importar archivos DXF, BMP, JPG, y HPGL mediante otro software.
- Permite visualizar directamente el "Gcode".
- Permite personalizar completamente la interface del programa.
- Permite seleccionar el tipo de herramienta que utiliza la máquina.
- Necesita otros softwares para generar el "Gcode".
- No tiene incluida las funciones para realizar el control de temperatura.
- Es gratuito para aplicaciones domésticas pero con opciones y capacidades limitadas (Máximo Gcodes de 500 líneas).
- Requiere un amplio conocimiento del software para poder usarlo correctamente.

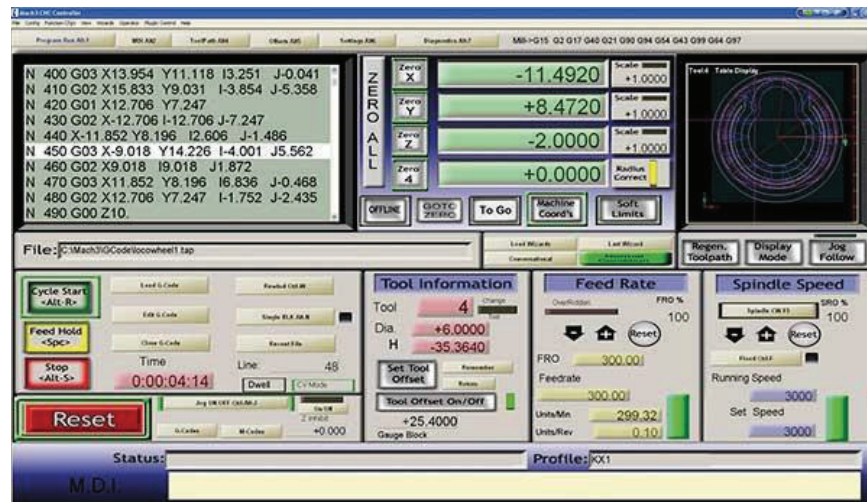


Figura 2.5 Interface del software de control Mach3⁵¹.

Cura

Cura es un software de control para impresoras 3D que, a partir de modelos CAD, genera las instrucciones de movimientos para producir objetos utilizando un cabezal. Si bien Cura está diseñado para controlar impresoras, las configuraciones de este programa permiten que este software sea usado como un controlador para cualquier equipo que requiera seguir rutas definidas a partir de un “Gcode”. El Software Cura (**Figura 2.6**) tiene las siguientes características:

- Permite controlar equipos con tres ejes de movimiento.
- Permite visualizar los objetos 3D.
- Los “Gcode” son generados por el mismo software.
- Es un software de licencia libre.
- Permite controlar una gran cantidad de parámetros de movimiento.
- Incluye funciones para controlar temperatura.
- La interface de control es totalmente amigable y fácil de usar.

⁵¹ http://www.arceurotrade.co.uk/imagecache/2d34505c-edf8-4c86-9b27-a2fc00c75ee2_600x345.jpg



Figura 2.6 Interface del software de control Cura⁵².

Foamworks 3.0

Foamworks 3.0 es un software especialmente diseñado para controlar máquinas cortadoras de cuatro ejes para materiales espuma mediante alambre caliente. Este programa permite utilizar perfiles generados en un programa CAD para generar y controlar los movimientos del alambre caliente, y así obtener los modelos 3D. El Software Foamworks 3.0 (**Figura 2.7**) tiene las siguientes características:

- Diseñado para controlar equipos de corte de materiales espuma por alambre caliente.
- No utiliza archivos de tipo GCODE sino archivos tipo DAT.
- Requiere de un software adicional para convertir los archivos DWF o DXF en archivos tipo DAT.
- Incluye funciones para controlar la temperatura.
- Es necesario comprar una licencia para utilizar el programa.
- El software trabaja solamente con perfiles y no con sólidos.
- La interface permite visualizar solamente los perfiles de corte.

⁵² <http://discourse.mcneel.com/uploads/default/11274/8de35ffad59ff12d.jpg>

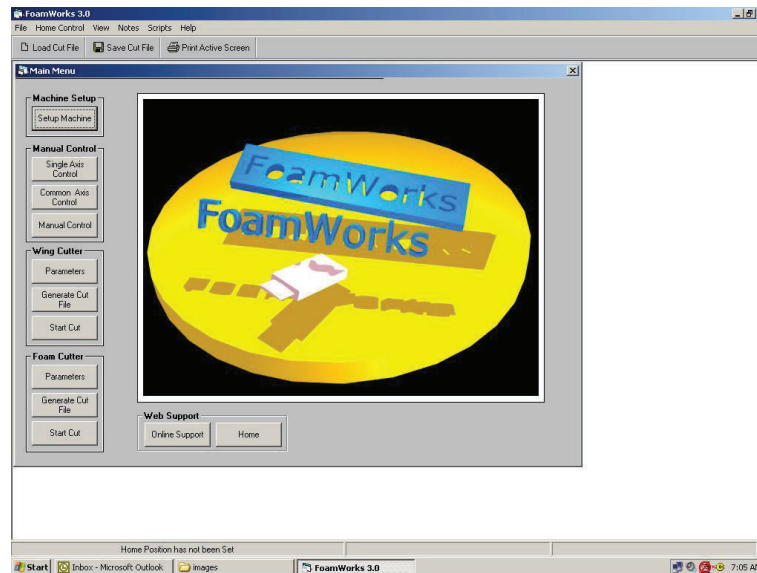


Figura 2.7 Interface del software de control Foamworks 3.0⁵³

Para realizar la selección del software de control se evaluó a cada uno de ellos siguiendo el método ordinal corregido de criterios ponderados. A continuación se muestran las tablas que se obtuvieron durante el proceso de selección.

Tabla 2.2 Tabla de evaluación del peso específico de cada criterio.

Criterio	Opciones de control	Control de temperatura	Interface	Funciones incorporadas	Licencia	$\Sigma + 1$	Ponderación
Opciones de control		0	1	0.5	0	1.5	0.167
Control de temperatura	1		1	1	1	4	0.444
Interface	0	0		0	0.5	0.5	0.056
Funciones incorporadas	0.5	0	1		1	2.5	0.278
Licencia	0	0	0.5	0		0.5	0.056
					Suma	9	1

Fuente: Propia

⁵³ <http://www.foamwork.net/images/main30.JPG>

Tabla 2.3 Tabla de evaluación para opciones de control.

Mach 3 > Cura > Foamworks 3.0					
Opciones de control	Mach 3	Cura	Foamworks 3.0	$\Sigma + 1$	Ponderación
Mach 3		1	1	2	0.667
Cura	0		1	1	0.333
Foamworks 3.0	0	0		0	0.000
Suma				3	1

Fuente: Propia

Tabla 2.4 Tabla de evaluación para control de temperatura.

Cura = Foamworks 3.0 > Mach 3					
Control de temperatura	Mach 3	Cura	Foamworks 3.0	$\Sigma + 1$	Ponderación
Mach 3		0	0	0	0.000
Cura	1		0.5	1.5	0.500
Foamworks 3.0	1	0.5		1.5	0.500
Suma				3	1

Fuente: Propia

Tabla 2.5 Tabla de evaluación para interface.

Cura > Mach 3 > Foamworks 3.0					
Interface	Mach 3	Cura	Foamworks 3.0	$\Sigma + 1$	Ponderación
Mach 3		0	1	1	0.333
Cura	1		1	2	0.667
Foamworks 3.0	0	0		0	0.000
Suma				3	1

Fuente: Propia

Tabla 2.6 Tabla de evaluación para funciones incorporadas.

Cura > Mach 3 > Foamworks 3.0					
Funciones incorporadas	Mach 3	Cura	Foamworks 3.0	$\Sigma + 1$	Ponderación
Mach 3		0	1	1	0.333
Cura	1		1	2	0.667
Foamworks 3.0	0	0		0	0.000
Suma				3	1

Fuente: Propia

Tabla 2.7 Tabla de evaluación para licencia.

Cura > Foamworks 3.0 > Mach 3					
Licencia	Mach 3	Cura	Foamworks 3.0	$\Sigma + 1$	Ponderación
Mach 3		0	0	0	0.000
Cura	1		1	2	0.667
Foamworks 3.0	1	0		1	0.333
Suma				3	1

Fuente: Propia

Tabla 2.8 Tabla de conclusiones para la selección del software de control.

Conclusión	Opciones de control	Control de temperatura	Interface	Funciones incorporadas	Licencia	Σ	Ponderación
Mach 3	0.111	0.000	0.019	0.093	0.000	0.222	3
Cura	0.056	0.222	0.037	0.185	0.037	0.537	1
Foamworks 3.0	0.000	0.222	0.000	0.000	0.019	0.241	2

Fuente: Propia

En base a la tabla de conclusiones se escoge a Cura como el software de control. Con el software de control definido se debe definir la tarjeta electrónica de control para el equipo.

2.2.3.1 Tarjeta electrónica de control

La tarjeta electrónica es el componente principal del sistema de control ya que esta lee y utiliza las señales que envía el software de control para accionar a los componentes que permiten llevar a cabo el proceso de corte; y también recepta la información de los componentes de control en el equipo y la envía al software para cerrar el lazo de control.

Este componente se selecciona en función del software de control que se va a utilizar por lo que la tarjeta seleccionada es la Arduino mega ultimaker shield 1.5.7 (**Figura 2.8**) que tiene cuatro controladores A4988 para los motores “paso a paso”.

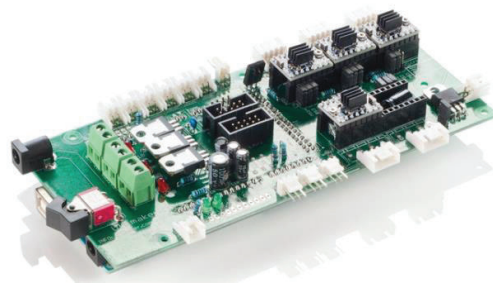


Figura 2.8 Tarjeta de control para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS⁵⁴.

2.2.4 CONCEPTO PARA EL EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA POR LAMINAS DE EPS

Una vez que se han tomado las decisiones para cada grupo funcional, se presenta una solución que satisface las especificaciones establecidas para la máquina que se está diseñando. Esta solución es el concepto base de la máquina que se propone diseñar y, a partir de este, se desarrolla el diseño de materialización y de detalle con el objetivo de obtener el equipo requerido.

La solución para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS que requiere el laboratorio de fundición será: un equipo que aplique el método de corte por alambre calentado, se mueva utilizando un sistema de movimiento que desplaza

⁵⁴ https://shop.ultimaker.com/Content/Images/Articles/UM-parts_38.png

un cabezal o una base a través de los ejes cartesianos XYZ mediante motores “paso a paso” y sea controlado mediante el software de control Cura.

2.3 DISEÑO DE MATERIALIZACIÓN

“El diseño de materialización es la etapa del proceso de diseño en la cual, partiendo de un concepto, y por medio de conocimientos y criterios técnicos y económicos, se determinan las formas y dimensiones de las diferentes piezas y componentes y, a la vez, se articulan de manera que aseguren la realización de las funciones”⁵⁵.

En esta etapa de diseño se utilizó el programa CAD Autodesk Inventor para crear y analizar las formas, dimensiones y movimientos relativos de los distintos elementos y sistemas que conforman el equipo.

2.3.1 DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL EQUIPO

En este punto del diseño fue necesario definir el método de calentamiento y los componentes que utilizará el sistema de corte, ya que en base a esta decisión y a la especificación de cortar láminas de EPS de 500x500x10mm se definieron los elementos que forman parte del equipo así como sus formas, ubicaciones y dimensiones básicas.

Para realizar el calentamiento del elemento de corte en el equipo se decidió utilizar una resistencia eléctrica que permita obtener temperaturas superiores a los 240°C. Sin embargo, la resistencia por sí sola no permitiría realizar el control de temperatura que se requiere para el proceso de corte, por lo que, adicionalmente se requiere una termocupla que trabaje en el rango de temperatura requerida y un transmisor. La termocupla tiene la función de registrar la temperatura en el mecanismo de calentamiento, mientras que el transmisor procesa la información registrada por la termocupla y la envía a la tarjeta electrónica de control. El

⁵⁵ (Riba Romeva, 2002, pág. 97)

funcionamiento conjunto de estos componentes permite realizar el control de la temperatura en el sistema de corte.



Figura 2.9 Resistencia eléctrica y termocupla para sistema de corte.

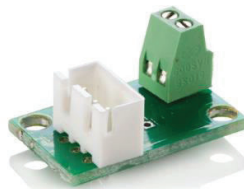


Figura 2.10 Transmisor de la termocupla para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS⁵⁶.

Los elementos mencionados deberán funcionar en conjunto con otros elementos para calentar al elemento de corte y necesitarán de otros componentes que permitan unir el sistema de corte al cabezal de movimiento. Para cumplir estas funciones se opta por adaptar el sistema de calentamiento de una impresora 3D, que cumplió su vida útil, ya que este sistema cumple una función similar en el equipo original. Los elementos que conforman este sistema son: un bloque calefactor de aluminio, un elemento aislante, un conector entre el elemento aislante y el bloque calefactor, un separador de madera y un sujetador del sistema de calentamiento al cabezal. Adicionalmente se requiere una boquilla sujetadora que permita cambiar rápidamente los distintos elementos de corte que se probarán en el equipo.

El sistema de corte funcionará de la siguiente manera: el cartucho de calentamiento eleva la temperatura del bloque calefactor, el calor generado será transferido a

⁵⁶ https://shop.ultimaker.com/Content/Images/Articles/UM-parts_34.png

través del bloque y la boquilla sujetadora hasta llegar al elemento de corte para calentarlo y alcanzar la temperatura que se requiere para cortar las láminas de EPS. La termocupla registrará la temperatura para mantenerla dentro de un rango cercano al valor programado. El conjunto de calentamiento estará unido al elemento aislante mediante el conector y el elemento aislante se ubicará a su vez en uno de los alojamientos del sujetador. El elemento aislante y el separador de madera son necesarios para impedir que el calor llegue al cabezal y lo dañe. Los agujeros mostrados en el sujetador tienen la función de facilitar la ubicación del sistema de corte y de los cables de conducción.

La **Figura 2.11** muestra un esquema con todos los elementos que conformarán el sistema de corte del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

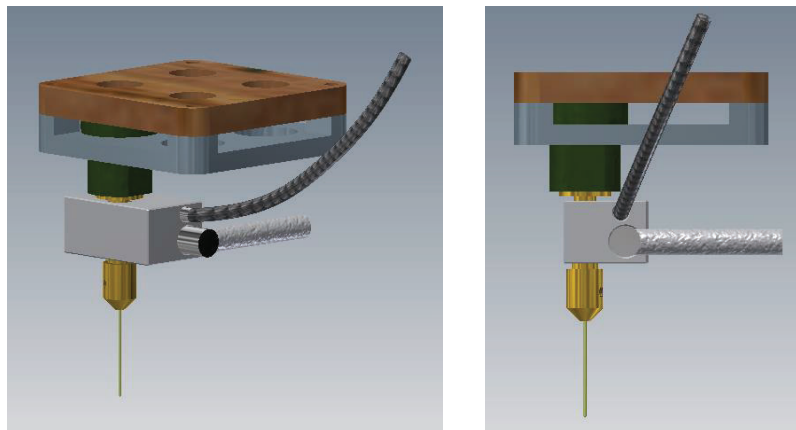


Figura 2.11 Esquema en Inventor del sistema de corte del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

La siguiente etapa es el diseño del sistema de movimiento. El mismo debe proveer movimiento relativo de la herramienta de corte con respecto a la plancha de espuma de poliestireno en las direcciones ortogonales X, Y, Z. En el sistema propuesto, la herramienta de corte tendrá dos grados de libertad (X y Y) mientras que el movimiento en la dirección Z se implementará en la mesa de trabajo, en la cual se posicionará la plancha de espuma de poliestireno.

El sistema de movimiento en las direcciones horizontales X y Y es el encargado de mover el cabezal que sujeta al sistema de corte. El movimiento del cabezal permite desplazar el elemento caliente mientras no está en contacto con el EPS y seguir las trayectorias de corte al estar en contacto con el EPS. El sistema de movimiento XY estará conformado por los siguientes componentes principales:

- Motores “paso a paso”.
- Ejes conductores.
- Acoplamiento motor – eje conductor.
- Ejes conducidos.
- Poleas de distribución.
- Bandas de distribución.
- Bloques de desplazamiento.
- Varillas cilíndricas.
- Cabezal.

El movimiento en los ejes XY se llevará a cabo de la siguiente manera:

- Motores “paso a paso” girarán en función de los pulsos emitidos por la tarjeta de control y transmitirán el movimiento a los ejes a los que están acoplados.
- El giro de los ejes será transmitido mediante las poleas y bandas a los ejes conducidos. Este movimiento generara un desplazamiento lineal en las bandas.
- Los bloques de desplazamiento, que están acoplados con las bandas, se deslizarán linealmente a lo largo de los ejes y moverán a las varillas cilíndricas empotradas en los bloques. Los límites de carrera de los bloques de desplazamiento se fijarán usando interruptores de fin de carrera.
- Los movimientos combinados de las varillas cilíndricas permitirán que el cabezal se desplace y de esta manera siga los perfiles de corte generados por el software de control.

La **Figura 2.12** muestra un esquema del sistema de movimiento para los ejes XY del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

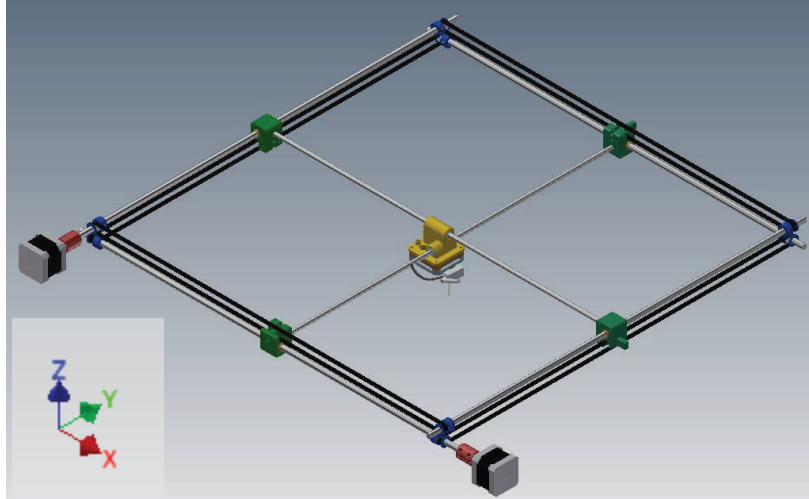


Figura 2.12 Esquema en Inventor del sistema de movimiento para los ejes XY del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

El sistema de movimiento para el eje vertical Z tendrá la función de sostener y ubicar la lámina de EPS bajo el nivel de acción del elemento caliente mientras este realiza sus movimientos de desplazamiento (Posición de desplazamiento), y ubicar la lámina de EPS en un nivel donde el elemento caliente la atraviese totalmente para realizar los movimientos de corte (Posición de corte). El sistema de movimiento Z estará formado por los siguientes componentes principales:

- Motor “paso a paso”.
- Tornillo y tuerca de potencia.
- Acoplamiento motor – tornillo.
- Bloque de desplazamiento.
- Varillas cilíndricas.
- Perfiles L (Sujetos al bloque de desplazamiento).

El movimiento en el eje Z se llevará a cabo de la siguiente manera:

- Los pulsos que envía la tarjeta electrónica harán girar al motor y el movimiento se transmitirá al tornillo de potencia acoplado.

- Al girar el tornillo de potencia la tuerca subirá o bajará en función del sentido de giro. Los límites de carrera para el eje vertical estarán definidos por interruptores de fin de carrera.
- La tuerca, que está sujeta al bloque de desplazamiento, moverá toda la base de y permitirá ubicar a la lámina de EPS en la posición de desplazamiento o de corte.
- El movimiento de la base será guiado por las varillas cilíndricas.

En el sistema de movimiento para el eje Z se presentaron dos opciones para la base que soportará la lámina de EPS. Esta base podía ser sólida o simplemente formada por perfiles que sostengan los extremos de la lámina. Finalmente se seleccionó la opción de usar perfiles de aluminio que sostengan los extremos laterales de la lámina de EPS considerando que estas no se pandean al estar simplemente apoyadas y debido a que se requiere que el elemento caliente atraviese la lámina de EPS y usar una base sólida dificultaría que se lleve a cabo esta operación.

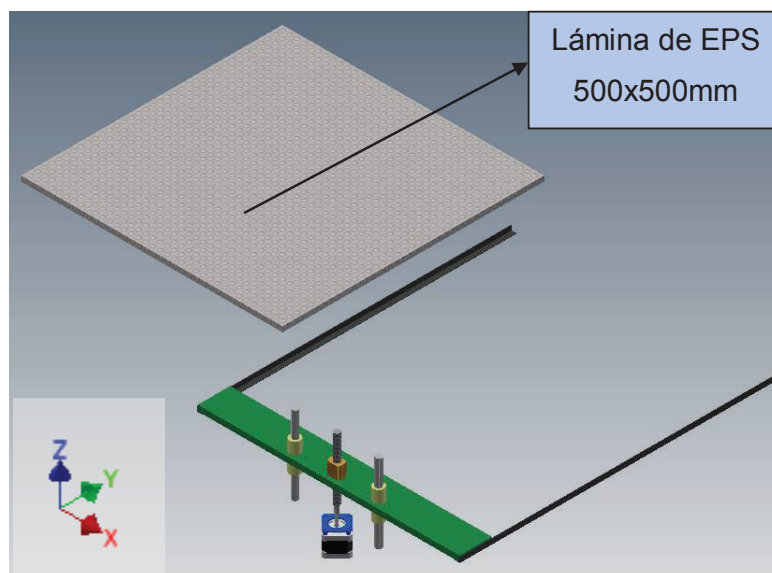


Figura 2.13 Esquema en Inventor del sistema de movimiento para el eje Z del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

La **Figura 2.13** muestra un esquema del sistema de movimiento para el eje Z del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

La estructura que soportara todos los componentes del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS será de aluminio. Se decide utilizar este material debido a sus propiedades de resistencia mecánica, bajo peso y resistencia a la corrosión. Sin embargo, se tiene dos opciones para la estructura de aluminio: estructura con perfiles estructurales de aluminio y estructura con perfiles L de aluminio.

Los perfiles estructurales de aluminio (**Figura 2.14**) son elementos que se utilizan en estructuras complejas o de gran tamaño que requieren un sistema de soporte robusto. Pero por otro lado, estos elementos necesitan de conectores especiales para realizar las conexiones entre los perfiles y con sus accesorios.



Figura 2.14 Perfiles estructurales de aluminio utilizados como estructura⁵⁷.

Los perfiles L de aluminio (**Figura 2.15**) son elementos que se utilizan en la construcción de estructuras simples y de tamaño pequeño a medio. Estos elementos se conectan entre sí, y con otros elementos, mediante pernos y tuercas sin la necesidad de accesorios adicionales.

⁵⁷ http://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/images/rkrosekrieger/content_abbildungen/produkte/pic_Flanschleiste.jpg

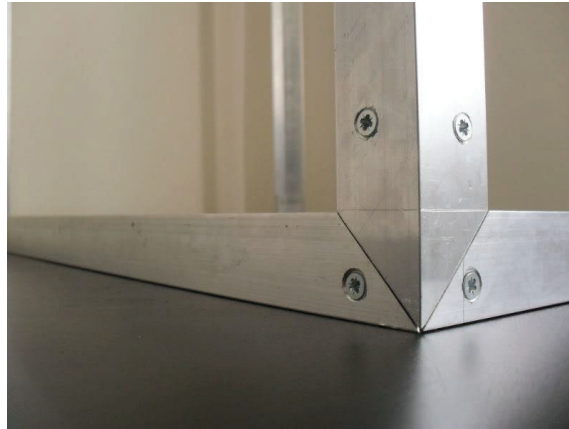


Figura 2.15 Perfiles L de aluminio utilizados como estructura⁵⁸.

Se decide utilizar perfiles L de aluminio debido a la facilidad de ensamble que presenta esta opción ya que la estructura que tendrá el equipo es de tamaño medio y no presenta mayor complejidad. Es importante considerar también que los perfiles L de aluminio se pueden adquirir con mayor facilidad que los perfiles estructurales. El esquema de la estructura del equipo se muestra en la **Figura 2.16**.

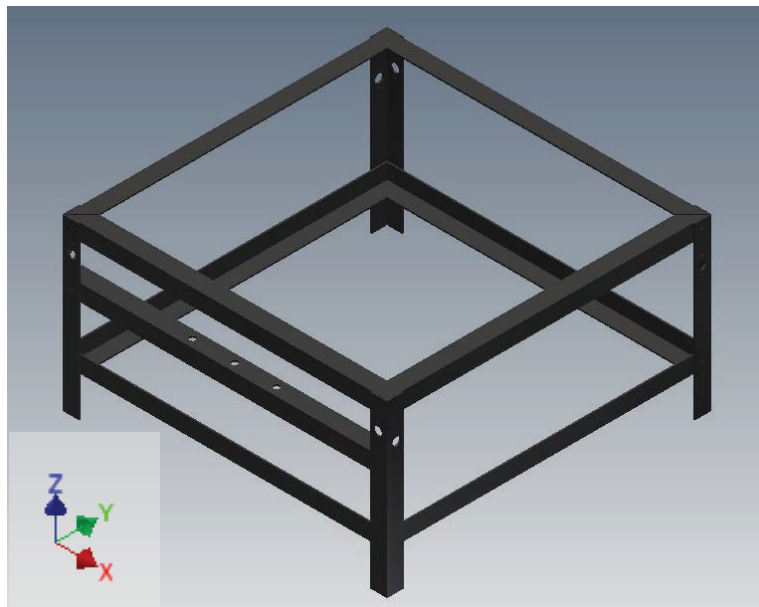


Figura 2.16 Esquema en Inventor de la estructura del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

⁵⁸ <http://i12.photobucket.com/albums/a215/CuBixxx/JOINT1.jpg>

Adicionalmente a los elementos ya mencionados, se necesitan otros elementos que permitirán unir y fijar los componentes del equipo, y garantizar que los movimientos de los sistemas se realicen correctamente. Estos elementos son:

- Rodamientos (Acoplados a la estructura para permitir el giro de los ejes conductores y conducidos).
- Rodamientos lineales para el movimiento en los ejes XYZ.
- Casquillos para los bloques de desplazamiento de los ejes XY.
- Conectores para la tuerca de potencia y los rodamientos lineales del eje Z.
- Conectores motores – estructura.
- Interruptores de fin de carrera (Cuatro para limitar los movimientos horizontales y dos para los verticales).
- Tensores para las bandas de distribución.
- Tapas externas para los rodamientos horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos horizontales con extensión para los sensores de posición final.
- Cajetín para el sistema electrónico.

Se deben considerar también los elementos adicionales que conforman el sistema electrónico de control del equipo. Estos son:

- Adaptador de energía.
- Ventilador para la tarjeta electrónica.

Cabe señalar que para la fabricación de algunos de los elementos del equipo diseñado en la presente tesis se utilizará técnicas de manufactura aditiva para la elaboración de piezas plásticas. Específicamente, se utilizará un equipo de manufactura aditiva por extrusión de polímeros y un polímero, conocido como poliácido láctico (PLA), como material para los elementos plásticos. Este procedimiento se explica detalladamente en la sección 3.1.

2.3.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

Partiendo del diseño esquemático del equipo, se procede a clasificar a los componentes del equipo dentro de dos grupos: los componentes que deben ser diseñados y los componentes que deben ser seleccionados. Una vez que se los ha clasificado, se llevan a cabo las actividades de diseño y selección correspondientes para cada componente. Finalmente como resultado de estas actividades se obtienen los planos de conjunto y de parte de los componentes de la máquina.

Los componentes que deben ser diseñados son todos aquellos que serán manufacturados específicamente para el equipo y por lo tanto deben ser sometidos a un proceso de diseño. Este proceso parte de los requerimientos de forma, dimensión, ubicación y función de cada elemento, así como de las sollicitaciones que debe soportar. El mismo consiste en llevar a cabo un conjunto de actividades que desembocan en la definición de las formas, dimensiones y materiales que deben tener los componentes para cumplir su función correctamente dentro del equipo.

Los componentes diseñados del equipo son:

- Boquilla de calentamiento.
- Varillas cilíndricas horizontales.
- Cabezal.
- Ejes conductores.
- Ejes conducidos.
- Casquillos horizontales.
- Bloques de desplazamiento horizontal.
- Acoplamientos motor eje horizontal – eje conductor.
- Tornillo y tuerca de potencia.
- Acoplamiento motor eje vertical – tornillo de potencia.
- Bloque de desplazamiento vertical.
- Conector tuerca – bloque de desplazamiento vertical.

- Varillas cilíndricas verticales.
- Conector rodamiento lineal – bloque de desplazamiento vertical.
- Perfiles de soporte para las láminas de EPS.
- Conector motor eje horizontal – estructura.
- Conector motor eje vertical – estructura.
- Tapas externas para los rodamientos de los ejes horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos de los ejes horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos de los ejes horizontales con extensión para los interruptores de fin de carrera.
- Tapas inferiores para las varillas cilíndricas verticales.
- Tensores para las bandas de distribución.
- Estructura.

Por otro lado, los componentes que deben ser seleccionados son aquellos elementos de la máquina que son fabricados en serie y son usados en el equipo. Estos elementos deben ser seleccionados en base a las condiciones de carga y funcionamiento que tendrán dentro del equipo en el que se van a usar, y siguiendo las guías de selección de cada fabricante.

Los componentes seleccionados del equipo son:

- Rodamientos lineales de desplazamiento horizontal.
- Poleas sincrónicas.
- Bandas sincrónicas.
- Rodamientos de los ejes horizontales.
- Rodamientos lineales de desplazamiento vertical.
- Tarjeta electrónica de control.
- Transmisor de la termocupla.

A continuación se detalla el proceso de diseño y selección de los componentes del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

2.3.2.1 Boquilla de calentamiento

La boquilla de calentamiento del sistema de corte tiene la función sujetar el elemento de corte y de transferir el calor producido por el cartucho de calentamiento al elemento de corte.

La boquilla no soporta solicitaciones mecánicas. Sin embargo, debe tener las propiedades físicas adecuadas para almacenar y transferir el calor necesario para el proceso de corte y para soportar las altas temperaturas requeridas. Otra consideración importante es que debe tener una rosca que le permita conectarse con el bloque calefactor de aluminio. La forma y dimensiones principales se muestran en la **Figura 2.17** y el material que se empleara para la boquilla será el bronce debido a sus propiedades de almacenamiento y transferencia de calor.

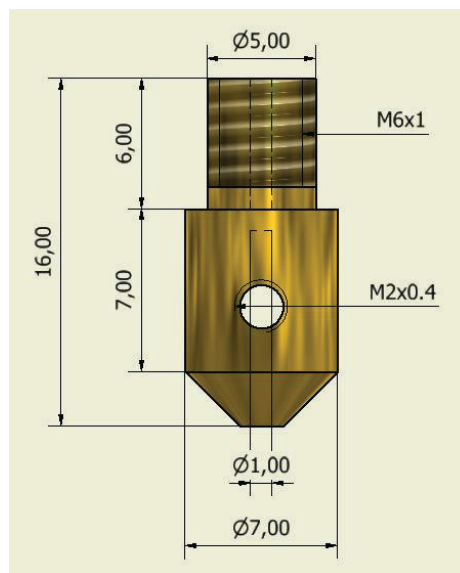


Figura 2.17 Boquilla de calentamiento del sistema de corte.

Fuente: Propia

2.3.2.2 Varillas cilíndricas horizontales

Las varillas cilíndricas horizontales son los componentes que sostienen y mueven el cabezal en el plano XY. Cada una de ellas esta empotrada en ambos extremos

a un bloque de desplazamiento. Por lo tanto, para el procedimiento de diseño son consideradas como vigas estáticamente indeterminadas doblemente empotradas.

Las vigas estáticamente indeterminadas son aquellas en las que las reacciones no pueden ser determinadas a partir de la estática, en este tipo de vigas las ecuaciones de equilibrio no son suficientes y es necesario hacer uso de ecuaciones adicionales para poder conocer las reacciones y deformaciones a las que están sometidas.

Una viga doblemente empotrada (**Figura 2.18**), como su nombre lo indica, tiene empotrados ambos extremos por lo que tienen seis incógnitas y tres ecuaciones de equilibrio las cuales no son suficientes para conocer todas las reacciones que soporta la viga.

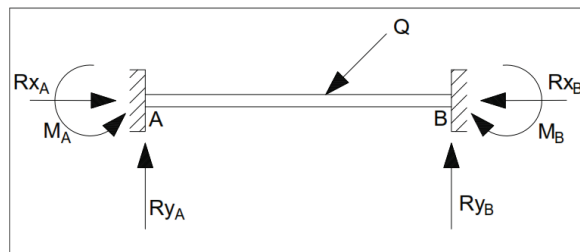


Figura 2.18 Diagrama de reacciones en una viga doblemente empotrada.

Fuente: Propia

Existen dos métodos para resolver vigas estáticamente indeterminadas. Estos son:

Análisis de la curva de deflexión con las ecuaciones diferenciales.

Las vigas estáticamente indeterminadas pueden resolverse usando ecuaciones diferenciales para la curva de deflexión. Para una viga de sección constante las ecuaciones diferenciales son las siguientes:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = M \quad (1)$$

$$EI \frac{d^3v}{dx^3} = V \quad (2)$$

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} = -q \quad (3)$$

Donde:

E = Modulo de Elasticidad

I = Momento de Inercia

M = Momento flexionante

V = Fuerza cortante

q = carga

v = Deflexión

x = Distancia

Para simplificar la forma de escritura de las ecuaciones anteriores se usan las siguientes expresiones:

$$v' = \frac{dv}{dx}; \quad (4)$$

$$v'' = \frac{d^2v}{dx^2}; \quad (5)$$

$$v''' = \frac{d^3v}{dx^3}; \quad (6)$$

$$v'''' = \frac{d^4v}{dx^4} \quad (7)$$

Remplazando estas expresiones en las ecuaciones diferenciales se tiene:

$$EIv'' = M \quad \text{Ecuación de Momento Flexionante} \quad (8)$$

$$EIv''' = V \quad \text{Ecuación de Fuerza Cortante} \quad (9)$$

$$EIv'''' = -q \quad \text{Ecuación de Carga} \quad (10)$$

El paso siguiente para hacer uso de estas ecuaciones es integrarlas para luego evaluar las constantes de integración a partir de las condiciones de la viga y de las condiciones de frontera.

Método de Superposición

Para hacer uso de este método es necesario conocer el grado de indeterminación estática (el grado de indeterminación estática es el número de reacciones que sobrepasan al número de ecuaciones de equilibrio), el método consiste en identificar las reacciones redundantes o sobrantes (las reacciones redundantes se identifican al momento de realizar los diagramas de equilibrio, si una reacción en los diagramas de equilibrio esta se convierte en una reacción redundante), una vez ya identificadas las reacciones redundantes se pueden plantear las ecuaciones de equilibrio en función de las reacciones desconocidas, las reacciones redundantes y de las cargas.

“A continuación suponemos que tanto las cargas originales como las reacciones redundantes actúan sobre la estructura liberada y encontramos las deflexiones superponiendo las deflexiones separadas debidas a las cargas y a las redundantes. La suma de estas deflexiones debe ser igual a las deflexiones en la viga original. Sin embargo, las deflexiones en la viga original (en los puntos donde se eliminaron restricciones) son cero o tienen valores conocidos. Por tanto, podemos escribir ecuaciones de compatibilidad (o ecuaciones de superposición) que expresen el hecho de que las deflexiones de la estructura liberada (en los puntos donde se eliminaron las restricciones) son iguales que las deflexiones en la viga original (en esos mismos puntos).

Como la estructura liberada es estáticamente determinada, es fácil determinar sus deflexiones empleando las técnicas descritas en el capítulo 9. Las relaciones entre las cargas y las deflexiones de la estructura liberada se denominan relaciones fuerza-desplazamiento. Al sustituir estas relaciones en las ecuaciones de compatibilidad, obtenemos ecuaciones en las que las redundantes son las cantidades desconocidas. Por tanto, en esas ecuaciones podemos despejar las reacciones redundantes. Después, conocidas las redundantes, podemos determinar todas las otras reacciones a partir de las ecuaciones de equilibrio.

Además, partiendo del equilibrio podemos determinar también las fuerzas cortantes y los momentos flexionantes⁵⁹.

Conocidos estos dos métodos para la solución de vigas estáticamente indeterminadas se procede a realizar el cálculo de las varillas cilíndricas horizontales. La **Figura 2.19** muestra esquemáticamente la configuración de las varillas cilíndricas y la **Figura 2.20** el diagrama de cuerpo libre para las mismas. Para realizar el diagrama de fuerzas se ha considerado una carga puntual en el centro de las varillas ya que en este punto se presenta la mayor deflexión.

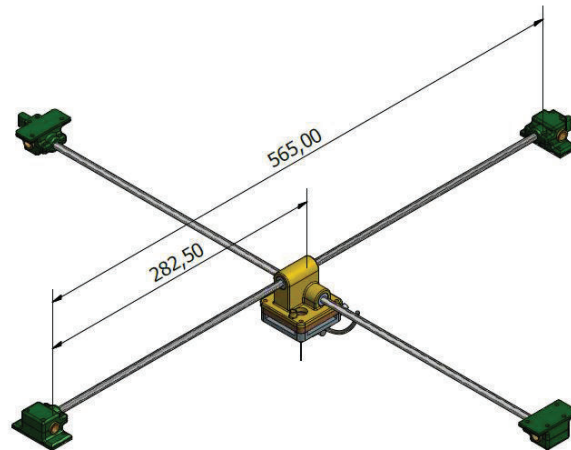


Figura 2.19 Configuración de las varillas cilíndricas horizontales.

Fuente: Propia

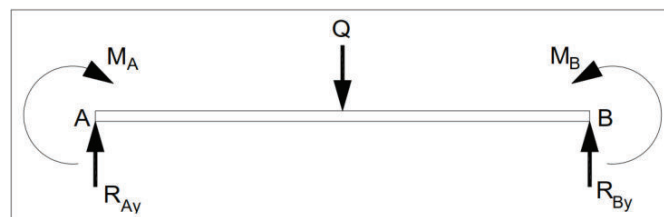


Figura 2.20 Diagrama de cuerpo libre para las vigas del equipo.

Fuente: Propia

⁵⁹ (Gere & Goodno, 2009, pág. 784)

Las condiciones de diseño son las siguientes:

- Las varillas cilíndricas horizontales tienen una longitud de 565mm.
- Para el procedimiento de cálculo se considera que cada varilla soporta la totalidad del peso del sistema de corte, cabezal y elementos adicionales.
- Se estima que el peso del sistema de corte es de 100gr.
- Se considera un peso de 125gr para los elementos adicionales como cabezal, rodamientos lineales, termocupla, cartucho de calentamiento, cables. Los elementos mencionados se encuentran ubicados en el cabezal.

Los cálculos de las reacciones usando el método del Análisis de la curva de deflexión con las ecuaciones diferenciales que se presentan a continuación.

Dado que la viga es simétrica al igual que su carga se tiene:

$$Ry_A = Ry_B$$

$$M_A = M_B$$

Al realizar una sumatoria de fuerzas en Y se tiene:

$$\sum Fy = 0$$

$$Ry_A + Ry_B - Q = 0$$

$$2Ry_A = Q$$

$$Ry_A = Ry_B = \frac{Q}{2}$$

$$Q = \frac{100 + 125}{1000} * 9.81 = 2.2 \text{ N}$$

$$Ry_A = Ry_B = 1.1 \text{ N}$$

Para calcular las magnitudes de los momentos se emplean las ecuaciones diferenciales descritas con anterioridad. Partiendo de la ecuación de carga se integra hasta obtener la ecuación de deflexión.

$$EIv'''' = -q = 0 \quad \left(0 < x < \frac{L}{2}\right) \quad (11)$$

Donde L es la longitud de la viga

$$EIv'''' = C_1 \quad (12)$$

$$EIv'' = C_1x + C_2 \quad (13)$$

$$EIv' = \frac{C_1x^2}{2} + C_2x + C_3 \quad (14)$$

$$EIv = \frac{C_1x^3}{6} + \frac{C_2x^2}{2} + C_4 \quad (15)$$

Terminada la integración se encuentran cuatro incógnitas C_1 , C_2 , C_3 y C_4 . Para encontrar estas constantes se deben aplicar las condiciones de frontera que se detallan a continuación.

La fuerza cortante en los extremos de la viga.- Es igual a las reacciones que la viga soporta en sus extremos.

$$EIv''' = V$$

Combinando las ecuaciones (9) y (12) se tiene el valor de C_1

$$C_1 = \frac{Q}{2} = 1.1N$$

El momento flexionante en el extremo de la viga.- Tomando como negativo al momento que se produce en el extremo A y haciendo uso de la ecuación de momento flexionante se tiene que:

$$EIv'' = C_1x + C_2$$

$$EIv'' = -M_A$$

$$EIv'' = \frac{Q}{2}x + C_2 \quad (16)$$

Analizando para $x = 0$:

$$EIv'' = C_2 \quad (17)$$

$$C_2 = -M_A$$

La pendiente de la viga en los soportes.- Puesto que la viga esta empotrada en sus extremos la deflexión en estos es igual a cero y también lo es la constante C_3

La pendiente de la viga en el centro del claro.- Por simetría se encuentra que la pendiente en $L/2$ también es cero

$$EIv' = \frac{C_1x^2}{2} + C_2x \quad (18)$$

$$0 = \frac{\frac{Q}{2}\left(\frac{L}{2}\right)^2}{2} + \frac{-M_AL}{2}$$

$$M_A = M_B = \frac{QL}{8} = \frac{2.2 * 0.565}{8} = 0.16 \text{ Nm}$$

La deflexión de la viga en los extremos.- Se necesita encontrar C_4 para esto se usa de la siguiente ecuación:

$$EIv = \frac{C_1x^3}{6} + \frac{C_2x^2}{2} + C_4 \quad (19)$$

Conociendo que la deflexión en $x = 0$ es nula y reemplazando estos valores en la ecuación anterior se tiene que:

$$C_4 = 0$$

Reemplazando los valores de las constantes en las ecuaciones de fuerza cortante y momento flexionante:

$$EIv''' = V = \frac{Q}{2} = 1.1 \text{ N}$$

$$EIv'' = M = \frac{Qx}{2} - \frac{QL}{8} = \frac{2.2x}{2} - 0.16$$

Partiendo de esas ecuaciones se procede a construir los diagramas de fuerza cortante y momento flector (**Figura 2.21**).

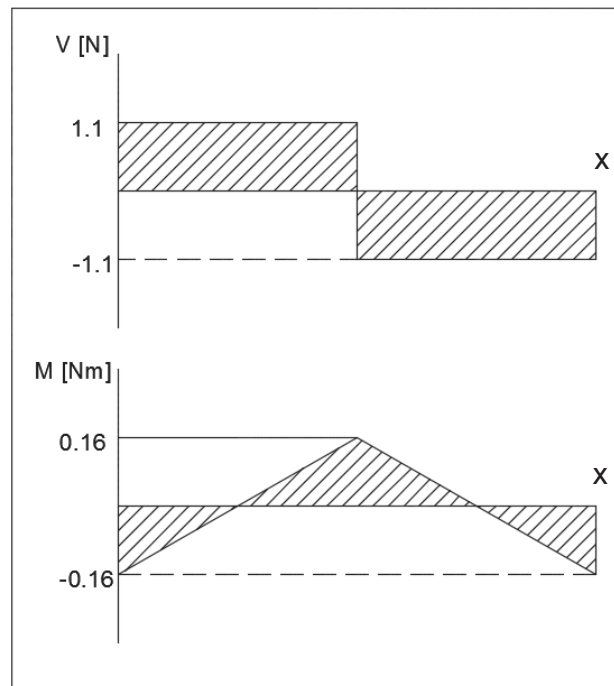


Figura 2.21 Diagrama de fuerza cortante y momento flector para las varillas cilíndricas horizontales.

Fuente: Propia

Los cálculos de las reacciones usando el método de superposición se presentan a continuación. Para hacer uso de este método se dibujan los diagramas de desplazamiento (**Figura 2.22, 2.23 y 2.24**):

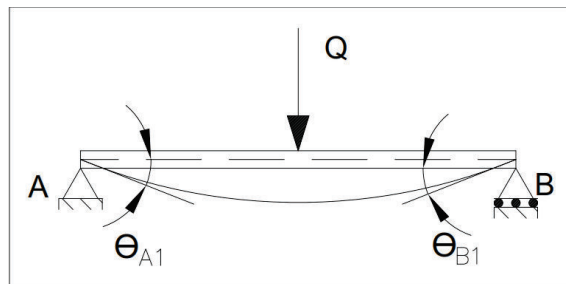


Figura 2.22 Diagrama de desplazamientos en función de la carga Q .

Fuente: Propia

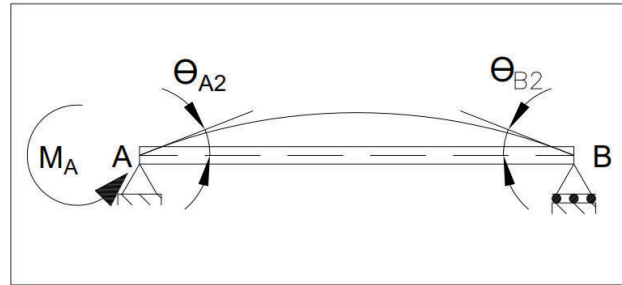


Figura 2.23 Diagrama de desplazamientos del momento M_A .

Fuente: Propia

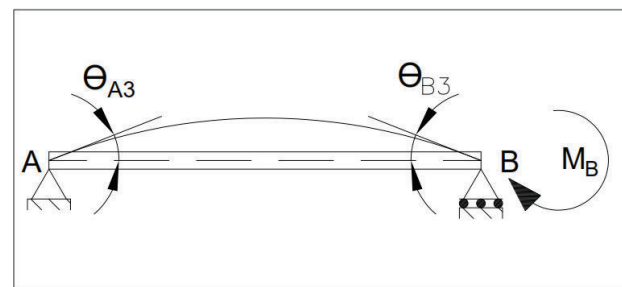


Figura 2.24 Diagrama de desplazamientos del momento M_B .

Fuente: Propia

Ecuaciones de equilibrio:

Las reacciones en los extremos se representan en términos de las redundantes

$$R_A = \frac{Qb}{L} + \frac{M_A}{L} - \frac{M_B}{L} \quad (20)$$

$$R_B = \frac{Qa}{L} - \frac{M_B}{L} + \frac{M_A}{L} \quad (21)$$

Ecuaciones de compatibilidad:

Dado que la rotación en los soportes es cero las ecuaciones de compatibilidad son:

$$\theta_A = \theta_{A1} - \theta_{A2} - \theta_{A3} = 0 \quad (22)$$

$$\theta_B = \theta_{B1} - \theta_{B2} - \theta_{B3} = 0 \quad (23)$$

Relaciones fuerza desplazamiento⁶⁰:

$$\theta_{A1} = \theta_{B1} = \frac{QL^2}{16EI} \quad (24)$$

$$\theta_{A2} = \frac{M_A L}{3EI} \quad (25)$$

$$\theta_{B2} = \frac{M_A L}{6EI} \quad (26)$$

Los ángulos para el momento redundante M_B son:

$$\theta_{A3} = \frac{M_B L}{6EI} \quad (27)$$

$$\theta_{B3} = \frac{M_B L}{3EI} \quad (28)$$

Una vez conocidas las ecuaciones de fuerza desplazamiento se remplazan en las ecuaciones de compatibilidad para así conocer los momentos en los extremos de la viga

$$\begin{aligned} \theta_A &= \frac{QL^2}{16EI} - \frac{M_A L}{3EI} - \frac{M_B L}{6EI} = 0 \\ \frac{QL^2}{16EI} &= \frac{M_A L}{3EI} + \frac{M_B L}{6EI} \\ \frac{QL}{16} &= \frac{M_A}{3} + \frac{M_B}{6} \\ M_A &= \frac{3QL}{16} - \frac{M_B}{2} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \theta_B &= \frac{QL^2}{16EI} - \frac{M_A L}{6EI} - \frac{M_B L}{3EI} = 0 \\ \frac{QL}{16} &= \frac{M_A}{6} + \frac{M_B}{3} \\ M_B &= \frac{3QL}{16} - \frac{M_A}{2} \end{aligned} \quad (30)$$

⁶⁰ (Gere & Goodno, 2009, págs. 909, Tabla G-2)

Resolviendo para M_A y M_B

$$M_A = \frac{3}{16}QL - \frac{1}{2}M_B$$

$$M_A = \frac{3}{16}QL - \frac{1}{2}\left[\frac{3}{16}QL - \frac{1}{2}M_A\right]$$

$$M_A = \frac{3}{16}QL - \frac{3}{32}QL + \frac{1}{4}M_A$$

$$M_A = \frac{QL}{8} \quad (31)$$

$$M_B = \frac{QL}{8} \quad (32)$$

Para conocer las reacciones en los extremos reemplazamos las ecuaciones de los momentos en las ecuaciones de equilibrio y resolvemos para R_A y R_B

$$R_A = \frac{Qb}{L} + \frac{M_A}{L} - \frac{M_B}{L}$$

$$R_A = \frac{Q\left(\frac{L}{2}\right)}{L} + \frac{\frac{QL}{8}}{L} - \frac{\frac{QL}{8}}{L}$$

$$R_A = \frac{Q}{2} \quad (33)$$

$$R_B = \frac{Q}{2} \quad (34)$$

Reemplazando valores se tiene:

$$R_A = 1.1N$$

$$R_B = 1.1N$$

$$M_A = 0.16Nm$$

$$M_B = 0.16Nm$$

Las reacciones y los momentos calculados por este método son iguales a los calculados con el método del análisis de la curva de deflexión con ecuaciones diferenciales.

Una vez determinadas las reacciones para las varillas cilíndricas horizontales, se procede a realizar el diseño estático que permitirá definir el diámetro de las mismas.

Diseño estático de la viga doblemente empotrada

El material seleccionado para estos componentes es el acero plata. Este material se utiliza en la fabricación de herramientas y piezas de precisión, como punzones, guías y vástagos, machos de roscar, fresas, barras de guía, entre otras⁶¹. Se escoge el acero plata debido a sus propiedades mecánicas y a que este es comercializado en la presentación de barras cilíndricas calibradas que evitan la necesidad de un maquinado posterior de los elementos. El acero plata calibrado tiene una resistencia a la fluencia de 580 MPa y una resistencia a la tracción de 770 Mpa.

Para el cálculo del diámetro de las varillas cilíndricas horizontales se emplea la teoría de la energía de la distorsión.

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (35)$$

$$\sigma_x = \frac{32(0.32)}{\pi d^3} = \frac{10.24}{\pi d^3}$$

$$\tau_{zx} = 0 \quad (36)$$

$$\tau_{zx} = \frac{16(0.18)}{\pi d^3} = \frac{2.88}{\pi d^3}$$

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \tau_{zx}^2} \quad (37)$$

$$\sigma' = \frac{S_y}{n} \quad (38)$$

$$\left(\frac{S_y}{n}\right)^2 = \left(\frac{10.24}{\pi d^3}\right)^2 + 0$$

Se calcula el diámetro con un factor de seguridad de 2.5

⁶¹ <http://www.ferrocortes.com.co/barras/acero-plata>

$$\left(\frac{580 * 10^6}{2.5}\right) = \left(\frac{10.24}{\pi d^3}\right)$$

$$(232 * 10^6) = \left(\frac{10.24}{\pi d^3}\right)$$

$$d^3 = \frac{10.24}{\pi * (232 * 10^6)} = 14 * 10^{-9}$$

$$d = 2.41 * 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 2.41 \text{ mm}$$

Los diámetros en los que se comercializa las barras calibradas de acero plata van desde los 2mm hasta los 30mm, por lo que una barra de 3 mm cumpliría con lo requerido hasta este punto. Sin embargo, es necesario determinar adicionalmente la deflexión máxima que tendrán las barras calibradas ya que si este valor es mayor al permisible se tendrán problemas de funcionamiento en el equipo. El valor máximo de deflexión que se aceptará para las barras calibradas es de 1mm.

Calculo de la deflexión de la viga.

Haciendo uso de la ecuación (19) y reemplazando las constantes de integración C_1 , C_2 y C_4 se tiene:

$$EIv = \frac{\left(\frac{Q}{2}\right)x^3}{6} + \frac{\left(-\frac{QL}{8}\right)x^3}{2}$$

$$EIv = \frac{Qx^3}{12} - \frac{QLx^2}{16}$$

$$EIv = \frac{4Qx^3 - 3QLx^2}{48}$$

$$EIv = \frac{Qx^2}{48}(4x - 3L)$$

$$v = -\frac{Qx^2}{48EI}(3L - 4x) \quad (39)$$

Donde:

v = Deflexión

Q = Carga

x = Distancia

E = Modulo de elasticidad

I = Inercia de la viga

L = Longitud de la viga

Analizando para $L/2$, donde se tiene la máxima deflexión de la viga:

$$\begin{aligned}\delta_{m\acute{a}x} &= -v_{x=\frac{L}{2}} = \frac{Q\left(\frac{L}{2}\right)^2}{48EI} \left(3L - 4\left(\frac{L}{2}\right)\right) \\ \delta_{m\acute{a}x} &= -v_{x=\frac{L}{2}} = \frac{QL^2}{48EI} (3L - 2L) \\ \delta_{m\acute{a}x} &= \frac{QL^3}{192EI}\end{aligned}\tag{40}$$

Donde:

$\delta_{m\acute{a}x}$ = Deformación máxima en el punto medio de la viga [m]

Q = Carga concentrada [N]

L = Longitud de la viga [m]

E = Módulo de elasticidad del acero [GPa]

I = Momento de inercia [m²]

Para un diámetro de 3mm se tiene:

$$I = \frac{1}{12}\pi c^4\tag{41}$$

Donde:

c = Radio de la viga

$$\begin{aligned}\delta_{m\acute{a}x} &= \frac{2.2(0.565)^3}{192(190 * 10^9) \left(\frac{1}{12}\pi(1.5 * 10^{-3})^4\right)} \\ &= \frac{0.39}{48.35} \\ \delta_{m\acute{a}x} &= 8.1 * 10^{-3} [m] \\ \delta_{m\acute{a}x} &= \mathbf{8 [mm]}$$

Este valor de deflexi3n supera ampliamente al permitido por lo que se vuelve a realizar el c3lculo para varillas con un di3metro de 6mm.

$$\begin{aligned}\delta_{m\acute{a}x} &= \frac{2.2(0.565)^3}{192(190 * 10^9) \left(\frac{1}{12}\pi(3 * 10^{-3})^4\right)} \\ &= \frac{0.39}{773.58} \\ \delta_{m\acute{a}x} &= 5.04 * 10^{-4} [m] \\ \delta_{m\acute{a}x} &= \mathbf{0.5 [mm]}$$

Un valor de deflexi3n igual a 0.5mm es aceptable para el dise1o por lo que para las varillas cil3ndricas horizontales se decide usar barras calibradas de acero plata de 6mm de di3metro. El factor de seguridad de estas varillas se calcula a continuaci3n.

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sqrt{\sigma_x^2 + \tau_{zx}^2} \\ \sigma' &= \frac{S_y}{n} \\ \frac{580}{n} &= \sqrt{\left(\frac{10.24}{\pi(6 * 10^{-3})^3}\right)^2 + \left(\frac{2.88}{\pi(6 * 10^{-3})^3}\right)^2} \\ n &= \frac{580}{\sqrt{15.1^2 + 4.24^2}} = \frac{580}{15.68} \\ n &= \mathbf{36.98}\end{aligned}$$

2.3.2.3 Rodamientos lineales de desplazamiento horizontal

Los rodamientos lineales de desplazamiento horizontal tienen la función de permitir el movimiento relativo axial del cabezal con respecto a las varillas cilíndricas horizontales. La selección de estos elementos se realiza según la norma DIN ISO 14728. Para el cálculo de la vida se emplean las siguientes formulas:

$$L = \left(\frac{f_H * f_T * f_C}{f_W} * \frac{C}{P_C} \right)^3 * 50 \quad (42)$$

$$L_h = \frac{L * 10^3}{2 * l_s * n_1 * 60} \quad (43)$$

Donde:

L = Duración de vida nominal [km]

L_h = Duración de vida nominal [h]

C = Capacidad de carga dinámica [N]

P_C = Carga calculada en los rodamientos [N]

f_H = Factor de dureza para ejes

f_T = Factor de temperatura

f_C = Factor de contacto

f_W = Factor de carga

l_s = longitud de carrera [m]

n_1 = Frecuencia de ciclo (1 ciclo = 2 carreras) [min^{-1}]

Se considera que la carga que actúa sobre los rodamientos es la misma que se estimó para las varillas cilíndricas horizontales (2.2N) y que esta esta uniformemente distribuida en los dos rodamientos lineales. Por lo tanto la carga calculada para cada rodamiento es de 1.1N.

Los factores requeridos para los cálculos se determinan utilizando los diagramas que se encuentran en el ANEXO A.1.

A partir de la siguiente ecuación calcularemos el factor de seguridad estática:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_c} \quad (44)$$

Del catálogo de rodamientos lineales que se encuentra en el ANEXO A.2 se selecciona el rodamiento lineal de 6mm ya que es el diámetro que tendrán las varillas cilíndricas horizontales según lo calculado en la sección 2.3.2.2. Para este rodamiento se tiene que:

$$L = \left(\frac{1 * 1 * 1}{1} * \frac{332}{1.1} \right)^3 * 50$$

$$L = 1.37 * 10^9 \text{ km}$$

$$L_h = \frac{1.37 * 10^9 * 10^3}{2 * 0.5 * 3.6 * 60}$$

$$L_h = 6.34 * 10^9 h = 724000 \text{ años}$$

$$s_0 = \frac{529}{1.1}$$

$$S_0 = 480.9$$

Los resultados de los cálculos indican que los rodamientos seleccionados funcionarían correctamente en el equipo.

2.3.2.4 Cabezal

El cabezal tiene la función de sujetar el sistema de corte y alojar a los rodamientos lineales de los ejes horizontales.

El cabezal no soporta mayores cargas por lo que su diseño depende de los requerimientos dimensionales y de forma impuestos por sus funciones, y no requiere de cálculos. El material de este elemento será PLA. La forma y las dimensiones principales para el cabezal se muestran en la **Figura 2.25**.

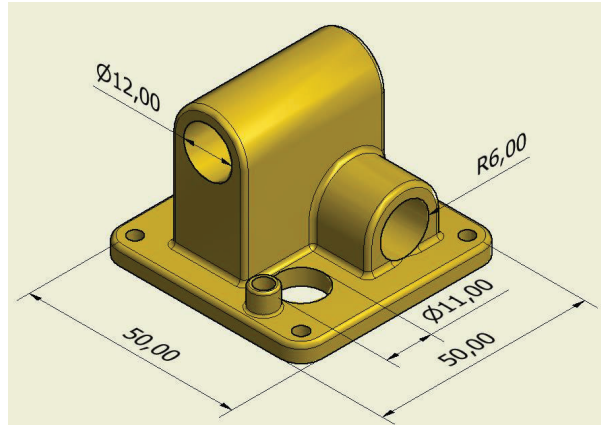


Figura 2.25 Cabezal del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

2.3.2.5 Ejes conductores y conducidos

Los ejes conductores y conducidos tienen la función de soportar y permitir el deslizamiento de los bloques de desplazamiento horizontal que sostienen a su vez a las varillas cilíndricas horizontales. Tienen también la función de transmitir el movimiento circular de las bandas para que se genere el desplazamiento lineal de los bloques de desplazamiento horizontal. Es importante mencionar que aun cuando las longitudes de los ejes conductores y conducidos son distintas, la longitud efectiva donde se aplican las cargas, así como la ubicación de los soportes, son las mismas ya que la longitud adicional de los ejes conductores tiene solamente la función de permitir el acople con los motores “paso a paso” y por lo tanto no ejerce mayores cargas en estos elementos. Por lo mencionado el procedimiento de diseño será el mismo para ambos grupos de ejes.

Para realizar el cálculo de estos ejes se parte del torque que produce el motor “paso a paso” que utiliza el equipo. Dado que los motores “paso a paso” pierden pasos si se sobrecargan, se debe escoger motores del tamaño adecuado y con un relativo sobredimensionamiento para la aplicación⁶². Las especificaciones del motor escogido se muestran en la **Tabla 2.9** y la **Tabla 2.10**.

⁶² (Artsoft USA, págs. 4-7)

Marca: CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS
 Modelo: SY42STH38-1684A

Tabla 2.9 Especificaciones generales del motor “paso a paso”⁶³.

Especificaciones Generales	
Ángulo de paso [°]	1.8
Aumento de temperatura [°C]	80 Máx. (corriente nominal en 2 fases)
Temperatura ambiente [°C]	-20 ± 50
Número de fase	2
Resistencia de aislamiento [MΩ]	100 Mín. (500VDC)
Clase de aislamiento	Clase B
Máx. fuerza radial [N]	28 (20mm del eje)
Máx. fuerza axial [N]	10

Tabla 2.10 Especificaciones eléctricas del motor “paso a paso”⁶⁴.

Especificaciones Eléctricas	
Tension nominal	2.8
Corriente nominal	1.68
Resistencia por fase ($\pm 10\% \Omega$)	1.65
Inductancia por fase ($\pm 20\% \text{ mH}$)	3.2
Torque de mantenimiento [N.cm]	36
Torque de detención [N.cm]	150
Torque del rotor [N.cm]	54
Peso [kg]	0.28

Conocido el torque del motor se procede a diseñar los ejes que van acoplados al motor. La **Figura 2.26 y 2.27** muestran la configuración de los ejes horizontales, y las fuerzas y reacciones que soportara el eje respectivamente.

⁶³ https://www.pololu.com/file/download/SY42STH38-1684A.pdf?file_id=0J714

⁶⁴ https://www.pololu.com/file/download/SY42STH38-1684A.pdf?file_id=0J714

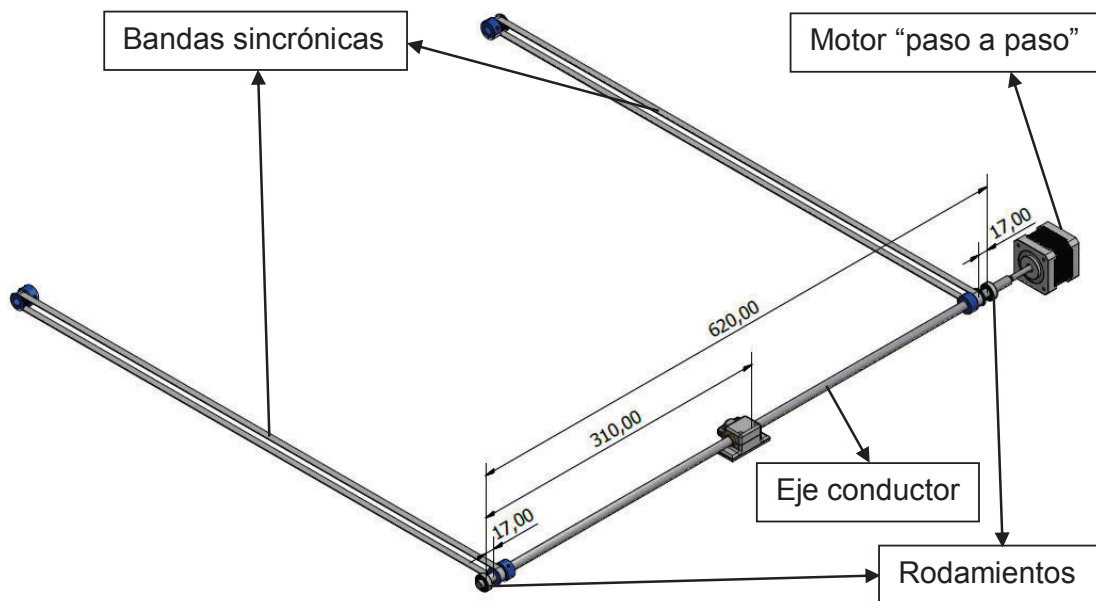


Figura 2.26 Configuración de los ejes horizontales del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

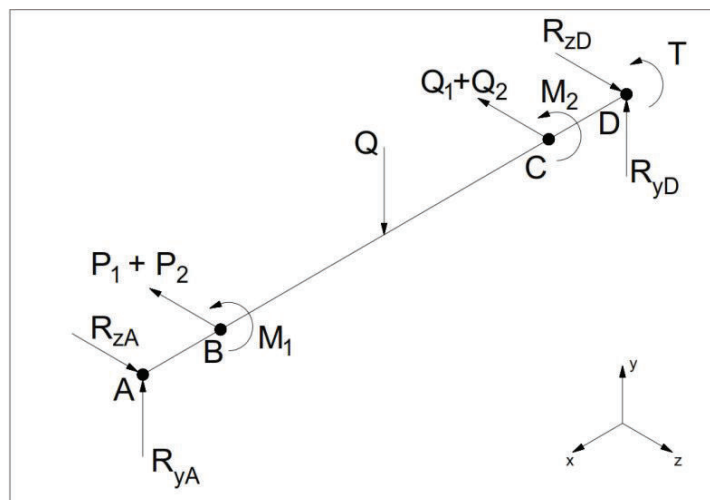


Figura 2.27 Diagrama de cuerpo libre de los ejes horizontales.

Fuente: Propia

Dado que el acople entre el motor y el eje es directo la relación de transmisión es de 1:1, el factor de fricción entre la polea de aluminio y la banda es de 0.22⁶⁵, y el peso que soporta el eje es de:

$$Q = \frac{\left(P_c + P_b + \frac{P_{cabezal}}{4}\right)}{1000} * 9.8 \quad (45)$$

Donde:

P_c = Masa del bloque de desplazamiento [g]

P_b = Masa del casquillo [g]

$P_{cabezal}$ = Masa del cabezal [g]

Q = Carga concentrada [N]

$$Q = \frac{\left(15 + 15 + \frac{100}{4}\right)}{1000} * 9.8$$

$$\mathbf{Q = 0.54 N}$$

Plano x – y

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{yD} + R_{yA} = Q \quad (46)$$

$$R_{yD} + R_{yA} = 0.54$$

$$\sum M_A = 0$$

$$0.54 \left(\frac{620}{2}\right) = R_{yD} (620)$$

$$\mathbf{R_{yD} = 0.27 N}$$

$$\mathbf{R_{yA} = 0.27 N}$$

Plano x – z

⁶⁵ (Velasategui, 2012, pág. 10)

$$\sum F_z = 0$$

$$R_{zA} + R_{zD} = (P_1 + P_2) + (Q_1 + Q_2) \quad (47)$$

$$M_1 = (P_1 - P_2) * r_p \quad (48)$$

$$M_2 = (Q_1 - Q_2) * r_p \quad (49)$$

$$P_1 = P_2 * e^{f\beta} \quad (50)$$

Donde:

β = Relación de transmisión en este caso es igual a π puesto que la relación de transmisión es 1:1

f = es el factor de fricción entre la correa y la polea

M_1, M_2 = Momentos

T = Torque del motor “paso a paso”

P_1, P_2, Q_1, Q_2 = Fuerzas de tensión en las bandas

r_p = Radio de las poleas

R_{zA}, R_{zD} = Reacciones

$$P_1 = P_2 * e^{0.22\pi}$$

$$P_1 = 2P_2 \quad (51)$$

$$Q_1 = 2Q_2 \quad (52)$$

Plano y – z

$$M_1 + M_2 = 0$$

$$M_1 = M_2$$

$$M_1 = M_2 = T$$

Con un radio de polea igual a 6 mm y con un torque del motor “paso a paso” de 36 N.cm se tiene:

$$(Q_1 - Q_2) * r_p = (P_1 - P_2) * r_p = T$$

$$(P_1 - P_2) = \frac{T}{r_p}$$

$$P_1 - P_2 = \frac{36}{0.6} = 60 \text{ N}$$

$$2P_2 - P_2 = 60 \text{ N}$$

$$P_2 = 60 \text{ N}; P_1 = 120 \text{ N}$$

$$Q_2 = 60 \text{ N}; Q_1 = 120 \text{ N}$$

$$R_{zA} + R_{zD} = (120 + 60) * 2$$

$$R_{zA} + R_{zD} = 360 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$(P_1 + P_2) * 1.7 + (Q_1 + Q_2) * 60.3 = R_{zD} * 62$$

$$180 * 1.7 + 180 * 60.3 = 62 * R_{zD}$$

$$R_{zD} = 180 \text{ N}$$

$$R_{zA} = 180 \text{ N}$$

Conocidas todas las reacciones se procede a calcular los momentos, y graficar los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante (**Figura 2.28, 2.29 y 2.30**). Para el cálculo de los momentos se emplea el método de las áreas:

Plano x – y

$$M = 0.27 * 30.9$$

$$M = 8.34[\text{Ncm}]$$

Plano x – z

$$M = 1.7 * 180 + 36$$

$$M = 342[\text{Ncm}]$$

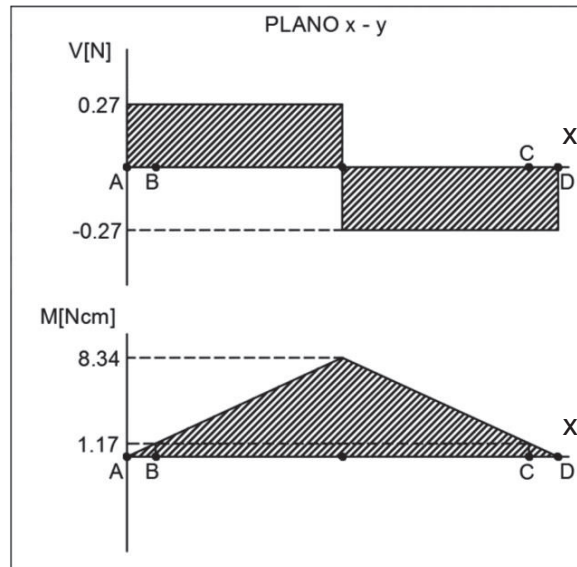


Figura 2.28 Diagrama fuerza cortante y momento flector plano x – y para los ejes.

Fuente: Propia

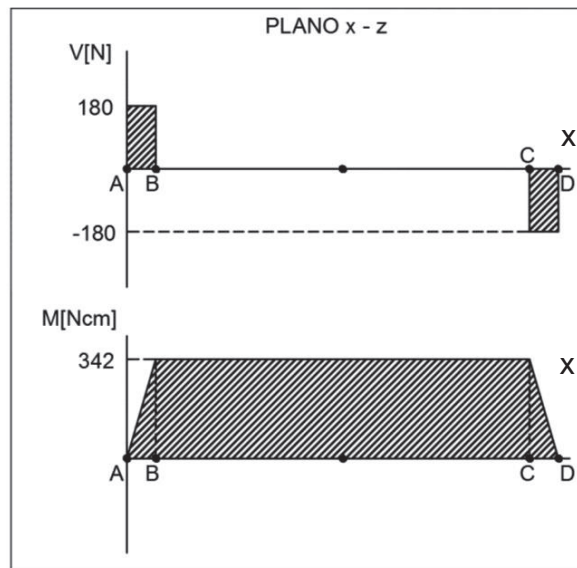


Figura 2.29 Diagrama fuerza cortante y momento flector plano x – z para los ejes.

Fuente: Propia

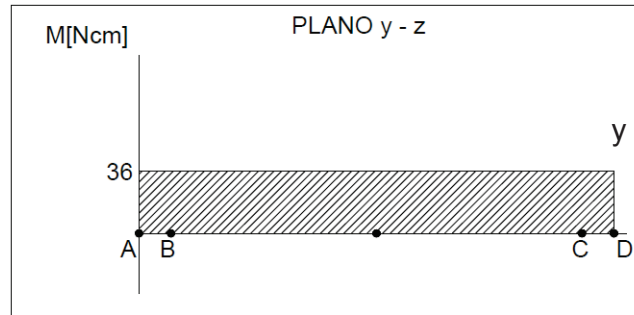


Figura 2.30 Diagrama de momento flector plano y - z para los ejes.

Fuente: Propia

Ahora se calcula el momento máximo que soporta el eje.

Punto A:

$$M_A = 36 \text{ Ncm}$$

Punto B:

$$M_B = \sqrt{1.17^2 + 342^2 + 36^2}$$

$$M_B = 349.5 \text{ Ncm}$$

Punto C:

$$M_c = \sqrt{1.17^2 + 342^2 + 36^2}$$

$$M_c = 344 \text{ Ncm}$$

Punto D:

$$M_c = 36 \text{ Ncm}$$

Punto medio:

$$M = \sqrt{8.34^2 + 342^2 + 36^2}$$

$$M = 349.6 \text{ Ncm} = 3.5 \text{ Nm}$$

El momento máximo está ubicado en la mitad del eje y tiene un valor de 349.6 Ncm o 3.5 Nm.

Límite de resistencia a la fatiga.

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (53)$$

El material elegido para los ejes tiene un S_{ut} de 770 MPa por lo cual se debe usar la primera expresión.

$$\begin{aligned} S'_e &= 0.5S_{ut} & (54) \\ S'_e &= 0.5 * 770 \\ S'_e &= \mathbf{385 \text{ MPa}} \end{aligned}$$

Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (55)$$

Donde:

k_a = factor de modificación de la condición superficial.

k_b = factor de modificación del tamaño.

k_c = factor de modificación de la carga.

k_d = factor de modificación de la temperatura.

k_e = factor de confiabilidad.

k_f = factor de modificación de efectos varios.

S'_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de la máquina en la geometría y condición de uso.

Factor de superficie k_a

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (56)$$

Donde

S_{ut} = Resistencia mínima a la tensión

a, b = Valores que se encuentran en el tabla 6 – 2 del ANEXO A.3

$$k_a = aS_{ut}^b = 57.7(770)^{-0.718}$$

$$k_a = 0.488$$

Factor de tamaño k_b

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (57)$$

Puesto que desconocemos el diámetro del eje usaremos $k_b = 1$

Factor de carga k_c

$$k_c \begin{cases} 1 & \text{Flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases} \quad (58)$$

Se tomara $k_c = 1$ puesto que el eje estará sometido constantemente a cargas de flexión

Factor de temperatura k_d

Este factor se toma de la tabla 6 – 4 del ANEXO A.3 en función de la temperatura a la cual va a estar sometido el material. La temperatura de trabajo del eje será la temperatura ambiente por lo que se tiene un factor $k_d = 1$

Factor de confiabilidad k_e

$$k_e = 1 - 0.08z_a \quad (59)$$

Trabajaremos con una confiabilidad del 90% y, de la tabla 6 – 5 del ANEXO A.3, se obtiene el factor $k_e = 0.897$

Límite de resistencia a la fatiga S_e

$$S_e = 0.48 * 1 * 1 * 1 * 0.897 * 385$$

$$S_e = 169MPa$$

Para el cálculo del diámetro del eje se utiliza el método de la Energía de Distorsión de Goodman:

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (60)$$

Resolviendo para el diámetro se tiene:

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (61)$$

Dado que las fuerzas que soportara el eje no son muy altas se establece un factor de seguridad de 2, con $M_m = T_a = 0$ y debido a la configuración del eje en el equipo K_f y k_{fs} son iguales a 1.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (62)$$

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_{ut}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{16(2)}{\pi} \left\{ \left[4 \left(\frac{1(3.5 * 1000)}{169} \right)^2 + 3 \left(\frac{1(0.36 * 1000)}{770} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(10.2 \left\{ [4(428.9) + 3(0.22)]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 7.5 \text{ mm}$$

Se selecciona un eje de diámetro de 8 y se vuelve a realizar el cálculo puesto que en el anterior se tomó el factor de tamaño $k_b = 1$.

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{0.3} \right)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ \left(\frac{d}{7.62} \right)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

El diámetro del eje se encuentra entre valores de 2.79 y 51 mm entonces la expresión que permite calcular el factor k_b es:

$$k_b = 1.24d^{-0.107} = 1.24(8)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.99$$

Repitiendo el cálculo de S_e e incorporando el valor de k_b

$$S_e = 0.48 * 0.99 * 1 * 1 * 0.897 * 385$$

$$S_e = 164.1 \text{ MPa}$$

Conocido el diámetro del eje se calcula el factor de seguridad.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[+3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_{ut}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi (8)^3} \left\{ \left[4 \left(\frac{3.5 * 1000}{164.1} \right)^2 + 3 \left(\frac{0.36 * 1000}{770} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = 9.9 * 10^{-3} \left\{ [4(454.9) + 3(0.22)]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = 0.42$$

$$n = 2.4$$

Finalmente se debe calcular la deflexión máxima que sufrirán los ejes y comprobar que esta sea menor a la máxima deflexión permisible (1mm). Este cálculo se realiza haciendo uso del caso 4 y el caso 6 de la Tabla G.2 que se encuentra en el Anexo A.3.

Plano x – y

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{QL^3}{48EI} \quad (63)$$

Donde:

$\delta_{m\acute{a}x}$ = Deflexión máxima [m]

Q = Carga [N]

L = Longitud [m]

E = Modulo de elasticidad [GPa]

I = Inercia [m⁴]

$$I = \frac{1}{12} \pi c^4$$

Donde:

I = Inercia [m⁴]

c = Radio del eje

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{0.54 * (0.62)^3}{48 * 190 * 10^9 * \frac{1}{12} \pi * (4 * 10^{-3})^4}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{0.128}{611.228}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 2.1 * 10^{-4} [m]$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \mathbf{0.21 [mm]}$$

Un valor de deflexi3n calculado es menor al máximo permisible por lo que para los ejes conductores y conducidos se decide utilizar barras calibradas de acero plata de 8mm.

2.3.2.6 Casquillos horizontales

Los casquillos horizontales tienen la funci3n de permitir el deslizamiento de los bloques de desplazamiento en los ejes horizontales.

El diseño de estos componentes se realiza en funci3n del diámetro del eje en el que irán colocados, en este caso 8mm. El material escogido para este componente es el bronce debido a su bajo coeficiente de rozamiento con el acero. La forma y las dimensiones principales de los casquillos se muestran en la **Figura 2.31**.

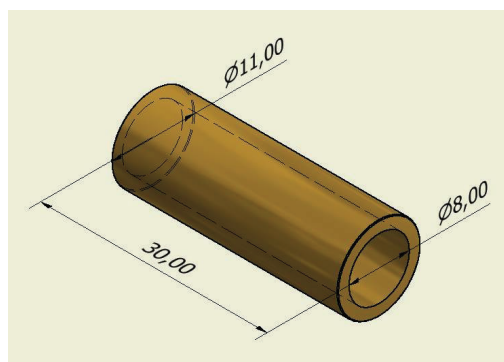


Figura 2.31 Casquillos horizontales.

Fuente: Propia

2.3.2.7 Bloques de desplazamiento horizontal

Los bloques de desplazamiento horizontal tienen la función soportar a las varillas cilíndricas horizontales y alojar a los casquillos horizontales que están ubicados en los ejes horizontales. Estos elementos están también acoplados con las bandas de distribución para que cuando estas se muevan linealmente, debido al giro de los ejes, los bloques se deslicen en los ejes y con estos se muevan las varillas cilíndricas que mueven el cabezal y consecuentemente el sistema de corte.

Estos componentes no soportan mayores solicitaciones mecánicas por lo que su diseño depende de las dimensiones y formas requeridas para cumplir sus funciones. Los bloques de desplazamiento horizontal están compuestos por tres piezas y se debe considerar que dos de los bloques cumplen adicionalmente con la función de presionar los sensores de posición por lo que estos tienen un diseño distinto. El material de estos componentes será PLA. Las formas y las dimensiones principales de los bloques de desplazamiento horizontal se muestran en la **Figura 2.32**.

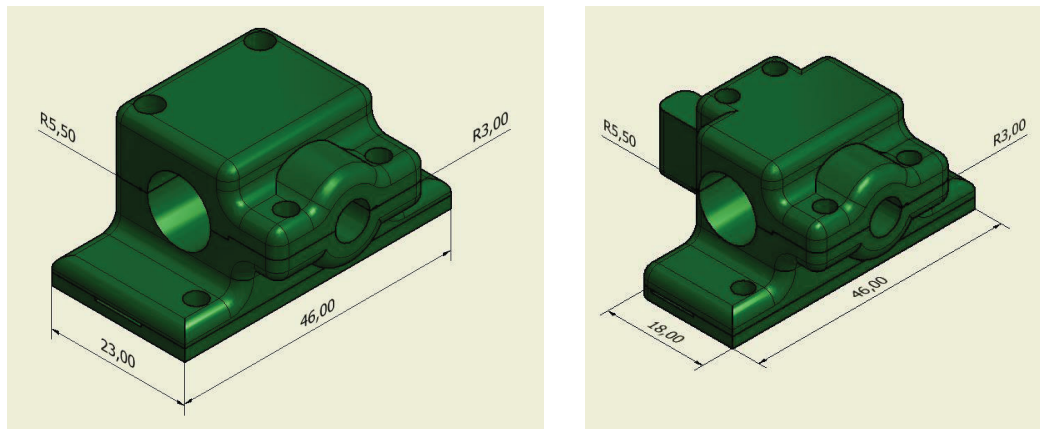


Figura 2.32 Bloques de desplazamiento horizontal para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

2.3.2.8 Rodamientos de los ejes horizontales

Los rodamientos son los elementos encargados de limitar el movimiento relativo a un movimiento de rotación libre alrededor de un eje fijo y de minimizar la fricción entre las partes móviles. Los rodamientos de los ejes horizontales cumplen la función de fijar axialmente y radialmente los ejes a la estructura, y de permitir el movimiento de rotación generado por los motores “paso a paso”.

Existe varios tipos de rodamientos y cada uno de ellos tiene características particulares que los hacen más o menos adecuados para una aplicación. La selección del tipo de rodamiento adecuado para el equipo se realizó tomando en consideración el cuadro del ANEXO A.4 en el cual se muestran los tipos de rodamientos y sus características según el catalogo FAG. Los rodamientos de los ejes horizontales requieren funcionar bajo las siguientes características:

- Cargas principalmente radiales.
- Bajo rozamiento.
- Funcionamiento silencioso.

Considerando estas características, junto con la facilidad de adquisición y costos relativos con respecto a otros tipos de rodamientos, se decide utilizar los rodamientos rígidos de bolas. Este tipo de rodamientos soportan cargas axiales y radiales, se usan para altas revoluciones, no son despiezables y tienen una mala adaptabilidad angular, los rodamientos de bolas obturados (con sus caras selladas) no necesitan mantenimiento y son usados para construcciones sencillas, tienen un bajo costo de comercialización y por ello son los más usados entre los tipos de rodamientos⁶⁶.

Una vez que se seleccionó el tipo de rodamientos que se emplearan se debe llevar a cabo los cálculos que permitirán seleccionar el rodamiento adecuado para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

⁶⁶ (FAG, pág. 147)

2.3.2.8.1 Selección de los rodamientos según el catálogo FAG

Rodamientos solicitados estáticamente

Se debe calcular el factor de esfuerzos estáticos para saber si el rodamiento resistirá la carga, el valor del factor de esfuerzos estáticos es tomado como un valor de seguridad contra las deformaciones elevadas en los puntos de contacto.

$$f_s = \frac{C_0}{P_0} \quad (64)$$

Donde:

f_s Factor de esfuerzos estáticos

C_0 Capacidad de carga estática [kN]

P_0 Carga estática equivalente [kN]

Según el catalogo el valor de f_s debe estar entre los siguientes valores:

$f_s = 1.5 - 2.5$ para exigencias elevadas

$f_s = 1.0 - 1.5$ para exigencias normales

$f_s = 0.7 - 1.0$ para exigencias reducidas

La capacidad de carga estática (C_0) se encuentra en tablas para cada rodamiento, la carga estática (P_0) es un valor teórico y se la obtiene a partir de la siguiente formula:

$$P_0 = X_0 * F_r + Y_0 * F_a \quad (65)$$

Donde:

X_0 = Factor radial

F_r = Carga radial [kN]

Y_0 = Factor axial

F_a = Carga axial [kN]

Los valores de X_0 se encuentran en las tablas de cada rodamiento (**Figura 2.33**) al igual que los valores de Y_0

$$P_0 = X_0 * F_r$$

▼ Factores radiales y axiales de los rodamientos rígidos de bolas															
$\frac{t_0 \cdot F_a}{C_0}$	Juego normal de rodamiento				Juego de rodamiento C3				Juego de rodamiento C4						
	e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		e	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$	
		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
0.3	0.22	1	0	0.56	2	0.32	1	0	0.46	1.7	0.4	1	0	0.44	1.4
0.5	0.24	1	0	0.56	1.8	0.35	1	0	0.46	1.56	0.43	1	0	0.44	1.31
0.9	0.28	1	0	0.56	1.58	0.39	1	0	0.46	1.41	0.45	1	0	0.44	1.23
1.6	0.32	1	0	0.56	1.4	0.43	1	0	0.46	1.27	0.48	1	0	0.44	1.16
3	0.36	1	0	0.56	1.2	0.48	1	0	0.46	1.14	0.52	1	0	0.44	1.08
6	0.43	1	0	0.56	1	0.54	1	0	0.46	1	0.56	1	0	0.44	1

Figura 2.33 Factores radiales y axiales de los rodamientos rígidos de bolas⁶⁷

Para $\frac{F_a}{F_r} \leq 0.8$

$$P_0 = F_r$$

Del ANEXO A.5, para un rodamiento de diámetro interior de 8 mm se tiene $C = 3.25$ [kN] y $C_0 = 1.37$ [kN], $d = 8$ mm, la fuerza radial máxima que soporta cada uno de nuestros ejes en sus apoyos se de **180 N**

$$P_0 = 180 * 10^{-3} [kN]$$

$$f_s = \frac{1.37}{180 * 10^{-3}} = 7.61$$

Rodamientos solicitados dinámicamente

El catalogo usa el método DIN/ISO 281, para el cálculo de la vida del rodamiento tenemos:

$$L_{10} = L = \left(\frac{C}{P}\right)^p [10^6 \text{revoluciones}] \quad (66)$$

⁶⁷. (Rodamientos FAG, pág. 148)

Donde:

$L_{10} = L$ Vida nominal [10^6 revoluciones]

C = Capacidad de carga dinámica [kN]

P = Carga dinámica equivalente [kN]

p = exponente de vida

L_{10} Vida nominal alcanzada por el 90% de un gran lote de rodamientos en millones de revoluciones

Se debe calcular una carga dinámica equivalente P y este es un valor teórico que se lo obtiene con el uso de la siguiente formula:

$$P = X * F_r + Y * F_a \quad (67)$$

Donde:

P = Carga Dinámica equivalente [kN]

X = Factor radial

F_r = Carga radial [kN]

Y = Factor axial

F_a = Carga axial [kN]

Los valores de los factores X , Y se encuentran en tablas para cada rodamiento. El exponente de vida p es distinto para los rodamientos de bolas y de rodillos siendo de 3 para los rodamientos de bolas y de $10/3$ para los rodamientos de rodillos.

Para una velocidad constante, la duración del rodamiento puede expresarse en horas.

$$L_{h10} = L_h = \frac{L * 10^6}{n * 60} [h] \quad (68)$$

Donde:

$L_{h10} = L_h$ Vida nominal

L = Vida nominal [10^6 revoluciones]

n = Velocidad (revoluciones por minuto) [min^{-1}]

Se procede a calcular la carga dinámica equivalente y la vida nominal para la carga dinámica $C = 3.25 \text{ [kN]}$, un factor $p = 3$ para rodamientos de bolas y una velocidad de $n = 90 \text{ min}^{-1}$

$$P = XF_r$$

$$P = 1.80 * 10^{-3} \text{ [kN]}$$

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ [10}^6\text{revoluciones]}$$

$$L = \left(\frac{3.25}{1.80 * 10^{-3}}\right)^3 \text{ [10}^6\text{revoluciones]}$$

$$L = 5886.2 \text{ [10}^6\text{revoluciones]}$$

Calculando la vida nominal a partir de

$$L_h = \frac{L * 10^6}{n * 60} \text{ [h]}$$

$$L_h = \frac{5886.2 * 10^6}{90 * 60}$$

$$L_h = 1090037 \text{ [h]}$$

El rodamiento seleccionado es el FAG 608.2Z tiene las características indicadas por la **Figura 2.34** y la **Tabla 2.11**.

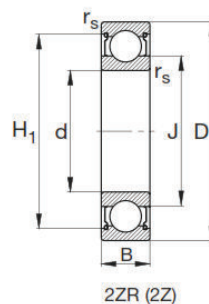


Figura 2.34 Esquema de los rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera⁶⁸.

⁶⁸ (FAG, pág. 152)

Tabla 2.11 Especificaciones del rodamiento FAG 608.2Z⁶⁹.

Eje [mm]	d [mm]	D [mm]	B [mm]	Peso [kg]	Denominación abreviada FAG
8	8	22	7	0.011	608.2Z

Adicionalmente se realiza la selección de los rodamientos de los ejes horizontales según el catalogo SKF con el objetivo de evaluar alternativas de distintos fabricantes.

2.3.2.8.2 Selección del rodamiento según el catalogo SKF

Selección estática

$$s_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad (70)$$

Donde:

s_0 = Factor de seguridad estático

C_0 = Capacidad de carga estática en [kN]

P_0 = Carga estática equivalente [kN]

La capacidad de carga, obtenida del Anexo A.6, para un rodamiento SKF 628/8 – 2Z es de 0.57 kN

$$s_0 = \frac{0.57}{180 * 10^{-3}}$$

$$s_0 = 3.17$$

⁶⁹ (FAG, pág. 152)

Selección dinámica

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (71)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad (72)$$

Donde:

L_{10} = Vida nominal (al 90% de fiabilidad), millón de revoluciones

L_{10h} = Vida nominal (al 90% de fiabilidad), horas de funcionamiento

C = Capacidad de carga dinámica [kN]

P = Carga dinámica equivalente [kN]

n = Velocidad rotacional [rev/min]

p = exponente de la ecuación de la vida, 3 para rodamientos de bolas y 10/3 para rodamientos de rodillos.

$$L_{10} = \left(\frac{1.33}{180 * 10^{-3}}\right)^3$$

$$L_{10} = 403.4$$

$$L_{10h} = \frac{(403.4) * 10^6}{60 * 90}$$

$$L_{10h} = 74703.9[h]$$

Las características del rodamiento SKF 628/8 - 2Z están indicadas por la **Figura 2.35** y la **Tabla 2.12**.

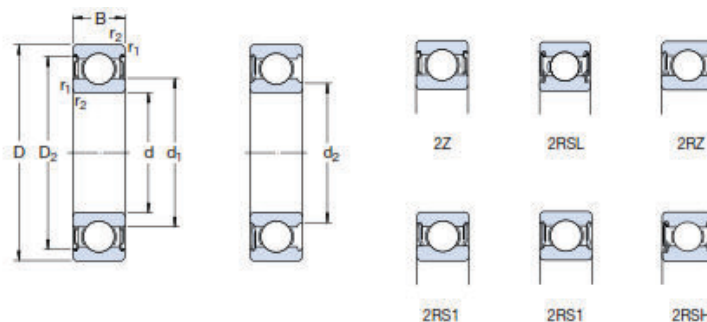


Figura 2.35 Esquema de los rodamientos SKF⁷⁰.

Tabla 2.12 Especificaciones del rodamiento SKF 628/8 – 2Z⁷¹.

d[mm]	D[mm]	B[mm]	Peso [kg]	Designación SKF
8	16	5	0.0036	628/8 – 2Z

Finalmente se decide usar los rodamientos SKF ya que soportan las cargas a las que son sometidos, tienen un tiempo de vida aceptable, y tienen un menor tamaño y peso que los rodamientos FAG.

2.3.2.9 Selección de poleas y bandas de distribución

La polea que se ajusta a las necesidades electrónicas y al grado de precisión deseado para el equipo, es una de 20 dientes con un paso de 2 mm, diámetro interior de 8 mm, 17 mm de diámetro exterior, 12 mm de diámetro interior de acople a la polea y 17.5 mm de largo. A partir de las características mencionadas anteriormente se calcula el desplazamiento producirán los motores por cada pulso.

$$l = \frac{\pi * D * \theta_s}{360} \quad (73)$$

Donde:

l = Longitud recorrida por pulso [mm]

D = Diámetro de la polea en [mm]

θ_s = Pulso (1.8°)

⁷⁰ (SKF, 2003, pág. 326)

⁷¹ (SKF, 2003, pág. 326)

$$l = \frac{\pi * 12 * 1.8}{360}$$

$$l = 0.18 \text{ mm}$$

El desplazamiento calculado representa que el equipo tendrá una buena precisión al realizar los desplazamientos del cabezal.

La banda que se va a utilizar es una banda sincrónica. Las bandas sincrónicas no se deslizan ni se estiran, lo que resulta en una transmisión de potencia constante, no se requiere de una tensión inicial, funcionan en un amplio rango de velocidades, y su eficiencia esta entre el 97% y el 99%⁷²

Para la selección de las bandas se siguen los pasos indicados en la guía del ANEXO A.7 y se utilizan las condiciones indicadas en la **Tabla 2.13**.

Tabla 2.13 Condiciones de diseño para las bandas sincrónicas.

1	Tipo de Máquina	CNC
2	Transmisión de Potencia	Motor paso a paso (2.3 [W])
3	Cargas	180 [N]
4	Funcionamiento/Día	7 – 8 [h]
5	Velocidad de rotación de poleas	60 rpm
6	Relación de rotación	1
7	Distancia del centro del eje	6.25 [mm]
8	Diámetro máx. Polea	17 [mm]
9	Otras condiciones de uso	Paso 2 [mm]

Fuente: Propia

Calculo de potencia de diseño

$$P_d = P_t * k_s \quad (74)$$

⁷² (Budynas & Nisbett, 2008, págs. 886, 887)

Donde:

P_d = Potencia de diseño

P_t = Transmisión de potencia

k_s = Factor de sobrecarga

$$k_s = k_0 + k_i + k_r + k_h \quad (75)$$

Donde:

k_s = Factor de sobrecarga

k_0 = Factor de corrección de sobrecarga

k_r = Factor de corrección de relación de rotación

k_i = Factor de corrección I

k_h = Factor de tiempo de funcionamiento

$$P_t = \frac{2\pi nT}{60} \quad (76)$$

$$P_t = \frac{2\pi(60)(0.36)}{60}$$

$$P_t = 2.3W$$

Los factores de corrección se los obtienen de las tablas 8, 9, 10 y 11 del ANEXO A.7.

$$k_s = 1.4 + 0.1 + 0.1 + 0$$

$$k_s = 1.7$$

$$P_d = P_t * k_s$$

$$P_d = 2.3 * 1.7$$

$$P_d = 3.8W$$

Selección temporal de la banda

Se decide utilizar una banda sincrónica tipo 2GT en base a la tabla 23 del ANEXO A.7. Para determinar el ancho de banda, se escoge un valor de ancho nominal y se comprueba que la potencia de diseño satisfaga la inecuación (77). Se escoge un ancho de banda de 6mm.

$$P_d < P_s * k_m * k_b * k_L \quad (77)$$

Donde:

P_d = Potencia de diseño [W]

P_s = Capacidad de transmisión de referencia (Tabla 50 ANEXO A.7)

k_m = Capacidad de corrección (Tabla 26 ANEXO A.7)

k_b = Coeficiente de corrección (Tabla 28 ANEXO A.7)

k_L = Coeficiente de corrección de longitud (Tabla 29 ANEXO A.7)

$$3.8 < 2.1 * 1 * 1.67 * 1.2$$

$$3.8 < 4.2$$

De lo anterior se tiene una banda 2GT de 6 mm de ancho es capaz de transmitir la potencia del motor paso a paso por lo que esta es la seleccionada.

2.3.2.10 Tensores para las bandas sincrónicas

Estos componentes tienen la función de tensar las bandas para que estas no pierdan pasos durante el funcionamiento del equipo.

Los tensores están formados por dos cuerpos que permitirán el ajuste de la tensión para cada banda del equipo. Los tensores no soportan mayores cargas por lo que su diseño depende de los requerimientos dimensionales y de forma impuestos por sus funciones. El material de estos componentes será PLA. La forma y las dimensiones principales de los tensores se muestran en la **Figura 2.36**.

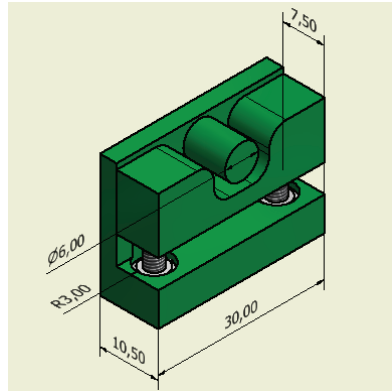


Figura 2.36 Tensor para las bandas de distribución.

Fuente: Propia

2.3.2.11 Tornillo de potencia

Un tornillo de potencia es un elemento mecánico que es usado para transformar un movimiento rotatorio el uno lineal, esta transformación de movimiento se la hace mediante el uso de una rosca, la rosca y el tornillo de potencia se relacionan mediante su paso, algunas de las aplicaciones de los tornillos son la elevación de cargas, en prensas y en máquinas herramientas. Las roscas que se usan para la transmisión de potencia son las roscas cuadradas y las trapezoidales⁷³ (**Figura 2.37**). Las roscas cuadradas son adecuadas para transmitir las cargas en dirección casi paralela al eje. Mientras que las roscas trapezoidales son utilizadas para dirigir la fuerza en una sola dirección.

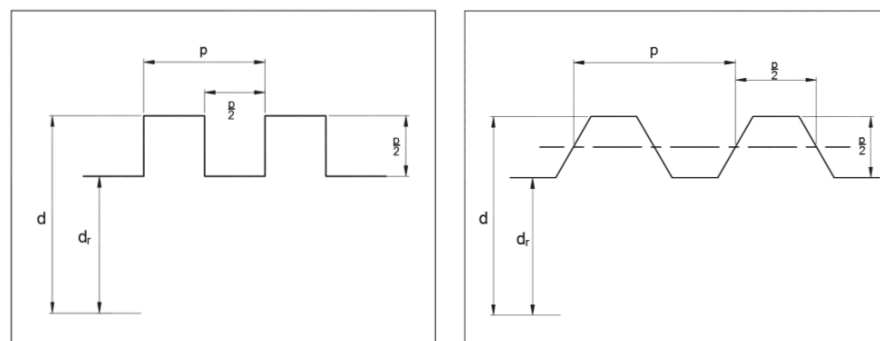


Figura 2.37 Esquema de una rosca cuadrada y una rosca trapezoidal.

Fuente: Propia

⁷³ (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 398)

Cálculo del tornillo de potencia

Para justificar el conjunto tuerca – tornillo de potencia que se va a utilizar en el equipo, se debe realizar los cálculos que permitan comprobar que el torque requerido para elevar y bajar la carga con los elementos seleccionados sea menor que el torque que entrega el motor “paso a paso”.

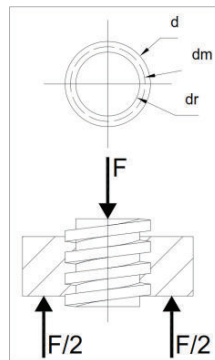


Figura 2.38 Esquema conjunto tuerca – tornillo de potencia.

Fuente: Propia

Para elevar la carga:

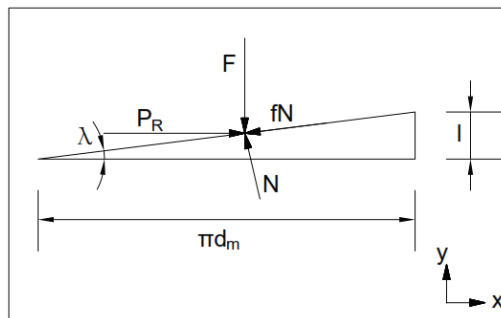


Figura 2.39 Diagrama de fuerzas para elevar la carga.

Fuente: Propia

$$\sum F_x = P_R - N \operatorname{sen} \lambda - f N \operatorname{cos} \lambda = 0$$

$$\sum F_y = F + f N \operatorname{sen} \lambda - N \operatorname{cos} \lambda = 0$$

Como la fuerza normal N no es motivo de análisis la eliminamos de las expresiones anteriores:

$$N = \frac{P_R}{\text{sen}\lambda + f\text{cos}\lambda}$$

$$N = \frac{F}{\text{cos}\lambda - f\text{sen}\lambda}$$

$$P_R = \frac{F(\text{sen}\lambda + f\text{cos}\lambda)}{\text{cos}\lambda - f\text{sen}\lambda}$$

Dividiendo la ecuación anterior para el $\text{cos}\lambda$ y reemplazando $\tan\lambda = \frac{l}{\pi d_m}$ se tiene:

$$P_R = \frac{F \left[\left(\frac{l}{\pi d_m} \right) + f \right]}{1 - \left(\frac{fl}{\pi d_m} \right)} \quad (78)$$

Para obtener el par de torsión se multiplica lo anterior por $\frac{d_m}{2}$

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - fl} \right) \quad (79)$$

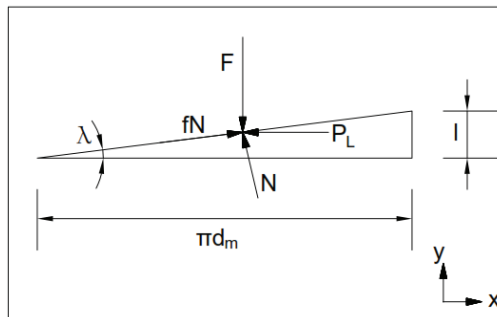


Figura 2.40 Diagrama de fuerzas para bajar la carga.

Fuente: Propia

Para bajar la carga:

$$\sum F_x = -P_L - N\text{sen}\lambda + fN\text{cos}\lambda = 0$$

$$\sum F_y = F - fN \operatorname{sen} \lambda - N \operatorname{cos} \lambda = 0$$

$$P_L = \frac{F \left(f - \frac{l}{\pi d_m} \right)}{1 + \left(\frac{fl}{\pi d_m} \right)} \quad (80)$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + fl} \right) \quad (81)$$

En general se utiliza un cojinete de empuje o collarín de empuje entre los elementos rotatorio y estacionario, se supone que la carga está concentrada en el diámetro medio del collarín d_c y tomando a f_c como el coeficiente de fricción el par de torsión requerido es:

$$T_c = \frac{F f_c d_c}{2} \quad (82)$$

El tornillo de potencia del equipo debe desplazar la carga una distancia vertical de 100mm, no se necesita de un paso pequeño pues el desplazamiento es efectuado para el posicionamiento de la plancha de poliestireno, en conjunto el tornillo deberá elevar una carga de 1kg.

Se considera utilizar un tornillo y tuerca de potencia con un paso de 3mm un diámetro nominal de 12, el material del tornillo es acero y el de la tuerca es de bronce y es necesario que este sea capaz de elevar una carga de 1kg, con las características anteriores vamos a calcular el torque necesario para elevar y bajar la carga que este tornillo necesita para funcionar.

$$F = 1 * 9.8$$

$$F = 9.8N$$

$$\frac{F}{2} = 4.9N$$

$$d_m = d - \frac{p}{2}$$

$$d_m = 12 - \frac{3}{2}$$

$$\mathbf{d_m = 10.5 mm}$$

$$d_r = d - p$$

$$d_r = 12 - 3$$

$$\mathbf{d_r = 9mm}$$

$$l = np$$

Donde:

l = Avance [mm]

n = Número de entradas

p = Paso [mm]

$$l = 1 * 3$$

$$\mathbf{l = 3 mm}$$

Para elevar la carga:

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2}$$

Donde:

T_R = Torque necesario para elevar la carga

F = Carga ($9.8 * 10^{-3}$ kN)

d_m = Diámetro medio (10.5mm)

l = Avance (3mm)

f = Rozamiento entre la tuerca y el tornillo (0.23 entre bronce y acero)

f_c = Rozamiento entre el tornillo y el collarín (0.23 entre bronce y acero)

d_c = Diámetro del collarín (25 mm)

$$T_R = \frac{(9.8 * 10^{-3})(10.5)}{2} \left(\frac{3 + \pi(0.23)(10.5)}{\pi(10.5) - (0.23)(3)} \right) + \frac{(9.8 * 10^{-3})(0.23)(25)}{2}$$

$$T_R = (0.051) \left(\frac{10.59}{32.29} \right) + 0.028$$

$$T_R = \mathbf{0.045 Nm}$$

$$T_R = \mathbf{4.5 Ncm}$$

Para bajar la carga:

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{\pi f d_m - I}{\pi d_m + f I} \right) + \frac{F f d_c}{2}$$

$$T_L = \frac{(9.8 * 10^{-3})(10.5)}{2} \left(\frac{\pi(0.23)(10.5) - 3}{\pi(10.5) + (0.23)(3)} \right) + \frac{(9.8 * 10^{-3})(0.23)(10.5)}{2}$$

$$T_L = 0.051 \left(\frac{4.58}{36.22} \right) + 0.028$$

$$T_L = \mathbf{0.034 Nm}$$

$$T_L = \mathbf{3.4 Ncm}$$

Considerando que los motores “paso a paso” entregan 36Ncm, el conjunto tuerca – tornillo de potencia seleccionado es adecuado para el equipo.

2.3.2.12 Varillas cilíndricas verticales (guías)

Las varillas cilíndricas verticales servirán de guías para el desplazamiento provocado por tornillo de potencia y evitaran que el bloque de desplazamiento vertical tenga movimientos alrededor del tornillo de potencia. Para el diámetro de las guías se toma como referencia el diámetro del tornillo de potencia. Las guías no soportan cargas considerables y su longitud está restringida por la distancia entre los alojamientos sobre las cuales deben montarse. El material para las guías será acero plata. La forma y las dimensiones principales de las varillas cilíndricas verticales se muestran en la **Figura 2.41**.

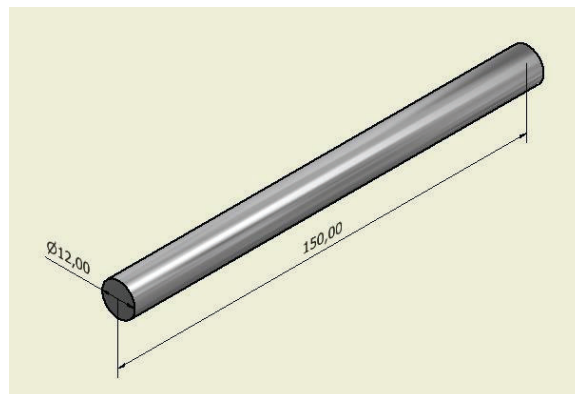


Figura 2.41 Guía vertical para el sistema de movimiento en el eje Z.

Fuente: Propia

2.3.2.13 Rodamientos lineales verticales

Estos rodamientos lineales complementan la función de las varillas guía reduciendo la fricción y asegurando que el bloque de desplazamiento suba y baje sin desalinearse. Adicionalmente evitan que se creen otras fuerzas en el conjunto tuerca – tornillo de potencia.

La selección de estos elementos se realiza en base al diámetro interno de las guías verticales por lo que el rodamiento seleccionado tiene un diámetro interior de 12mm. Se debe comprobar que estos rodamientos soportarán los esfuerzos a los que estarán sometidos. Para realizar los cálculos del factor de seguridad se estima que la carga que soportarán los rodamientos es igual a la carga que soporta el tornillo de potencia y es de 4.9N y se utilizan las características de los rodamientos que se encuentran en el ANEXO A.2.

$$L = \left(\frac{1 * 1 * 1}{1} * \frac{657}{4.9} \right)^3 * 50$$

$$L = 120.53 * 10^6 km$$

$$L_h = \frac{120.53 * 10^6 * 10^3}{2 * 0.1 * 200 * 60}$$

$$L_h = 50.22 * 10^6 h = 5732 años$$

$$s_0 = \frac{1200}{4.9}$$

$$S_0 = 244.9$$

Los resultados de los cálculos indican que los rodamientos seleccionados funcionarían correctamente en el equipo.

2.3.2.14 Bloque de desplazamiento vertical

Es elemento cumple la función de transmitir el movimiento vertical a los perfiles de soporte que sostienen a las láminas de EPS. Para cumplir su función, el bloque está conectado a la tuerca del tornillo de potencia, que sube o baja al moverse el motor “paso a paso”; y a los rodamientos lineales de desplazamiento vertical, que se deslizan sobre las varillas cilíndricas verticales que sirven de guía en el movimiento vertical.

Las cargas que soporta el bloque de desplazamiento vertical no son considerables por lo que su diseño depende de los requerimientos dimensionales y de forma impuestos por sus funciones, y no requiere de cálculos. El material para el bloque de desplazamiento vertical será madera debido a su bajo peso y facilidad de adquisición. La forma del bloque de desplazamiento vertical se muestra en la **Figura 2.42**.

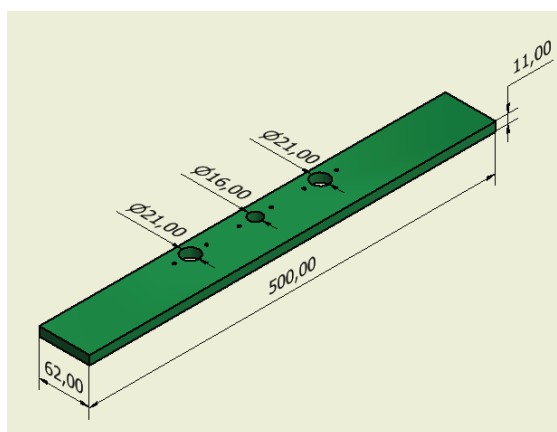


Figura 2.42 Bloque de desplazamiento vertical.

Fuente: Propia

2.3.2.15 Perfiles de soporte

Los perfiles de soporte cumplen la función de sostener las láminas de EPS mientras se lleva a cabo el proceso de corte, y se encuentran fijados al bloque de desplazamiento vertical.

Estos elementos no soportan una carga considerable por lo que su diseño depende de los requerimientos dimensionales y de forma impuestos por sus funciones, y no requiere de cálculos. Se decide utilizar perfiles L de aluminio de 10x10x1mm y con una longitud de 400mm.

2.3.2.16 Acoplamiento del equipo

La función principal de los acoples es la de conectar y transmitir la potencia de un eje conductor a un eje conducido. La selección de estos elementos se realiza en función de las potencias que se transmiten y del diámetro de los ejes que se quieren acoplar.

Existen varios tipos y diseño de acoples pero, de manera general, estos se agrupan en dos categorías: los acoples rígidos y los acoples flexibles. Los acoples rígidos se emplean en aplicaciones donde los ejes que se están conectando son totalmente coaxiales; mientras que los acoples flexibles se utilizan en aplicaciones donde se requiere compensar alguna posible desalineación angular y/o excéntrica, o algún movimiento axial. Estos desalineamientos se presentan cuando no se puede asegurar la coaxialidad entre los ejes acoplados o cuando existe la posibilidad de golpes en la transmisión.

En el caso del equipo de manufactura aditiva, los acoples que conectan los motores “paso a paso” a los ejes conductores y al tornillo de potencia serán de tipo rígido ya que los ejes acoplados son coaxiales.

El torque transmitido por los motores no es lo suficientemente alto como para considerarlo un parámetro de diseño de los acoples por lo que el único parámetro

de diseño serán las dimensiones de los ejes que se van a acoplar. Los motores tienen un eje de salida con un diámetro de 5mm mientras que el eje conductor tiene un diámetro de 8mm.

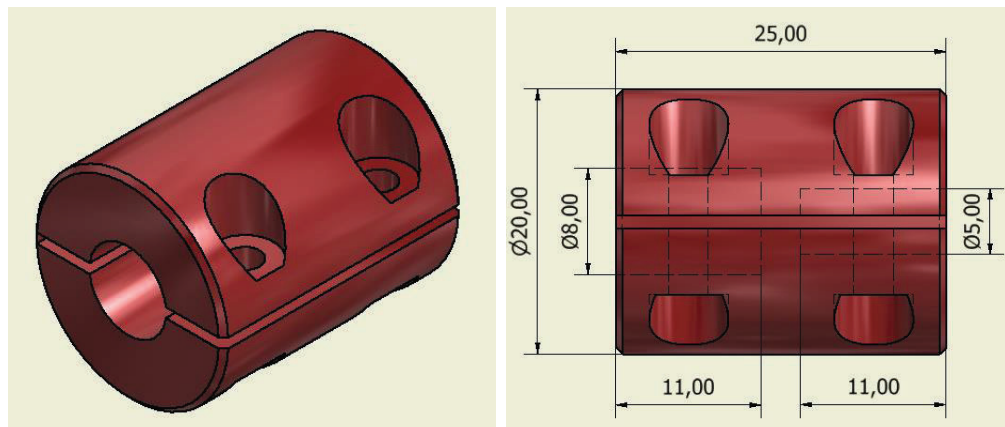


Figura 2.43 Acople motor eje horizontal – ejes conductores.

Fuente: Propia

En el caso de la conexión entre los motores de desplazamiento horizontal y los ejes conductores se decide emplear acoples tipo pinza que realizan el ajuste de los ejes mediante tornillos que cierran el lado libre de los acoples. El material de los conectores será PLA. La forma y las dimensiones principales se muestran en la **Figura 2.43**.

Para conectar el motor de desplazamiento vertical y el tornillo de potencia, se utiliza un acople que se ajusta a los ejes mediante prisioneros. El material de este acoplamiento será aluminio. La forma y las dimensiones principales se muestran en la **Figura 2.44**.

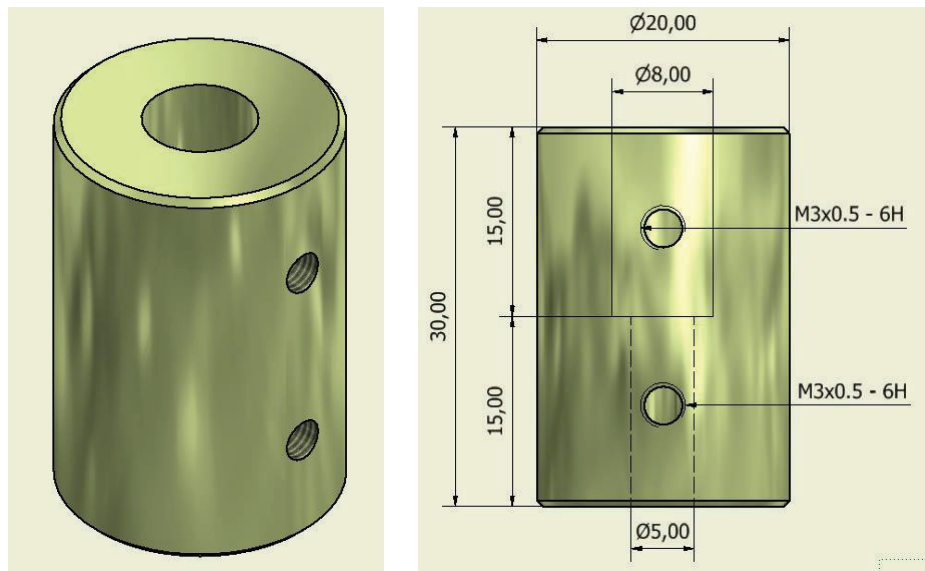


Figura 2.44 Acople motor eje vertical – tornillo de potencia.

Fuente: Propia

2.3.2.17 Conectores del equipo

Los conectores son las piezas del equipo que permiten unir a los componentes que requieren de accesorios específicos de unión. Los conectores motor – estructura (**Figura 2.45 y 2.46**) se emplean para ubicar los motores en la estructura y unirlos a esta última. El conector tuerca – bloque de desplazamiento vertical (**Figura 2.47**) permite unir estos elementos para que el bloque se mueva conjuntamente con la tuerca. Los conectores rodamiento lineal – varillas cilíndricas verticales (**Figura 2.48**) se usan para fijar los rodamientos al bloque de desplazamiento y de esta manera permitir que el bloque se deslice en las varillas y sea guiado por ellas.

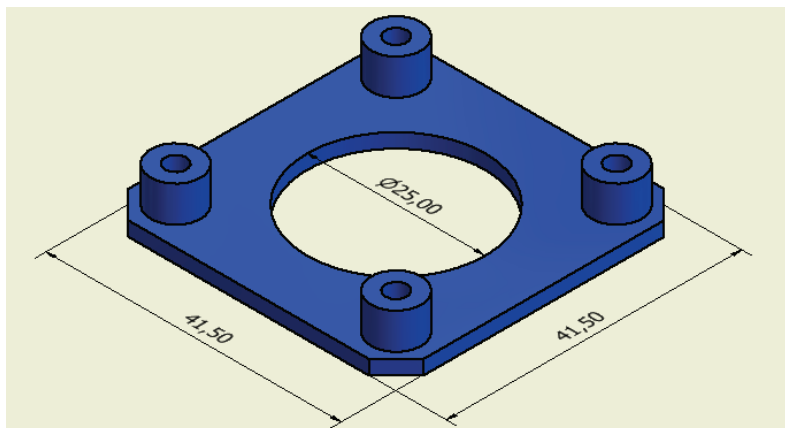


Figura 2.45 Conector motor eje vertical – estructura.

Fuente: Propia

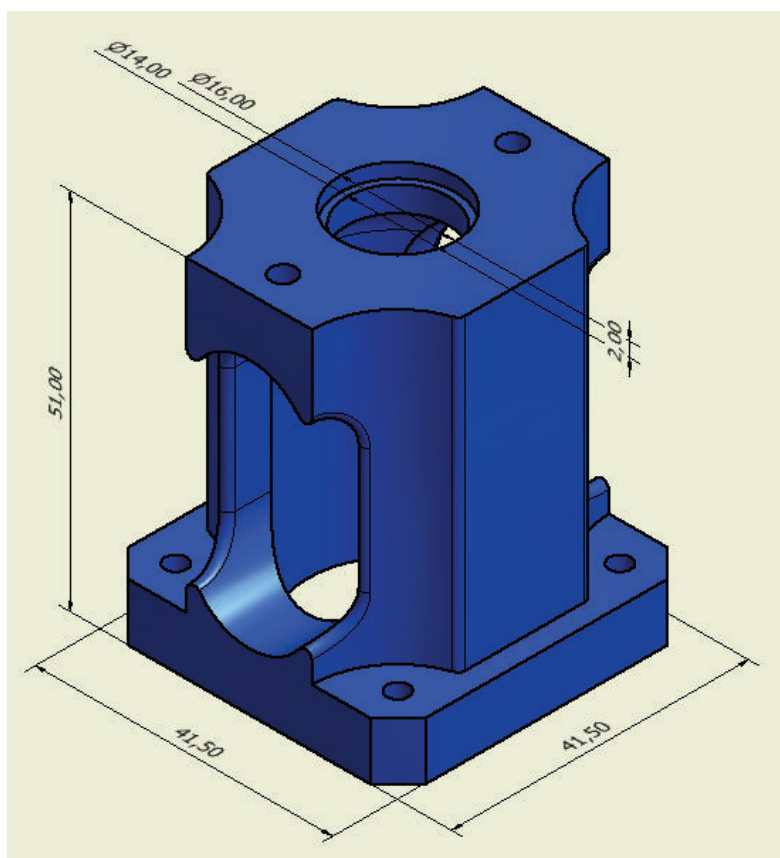


Figura 2.46 Conector motor eje horizontal – estructura.

Fuente: Propia

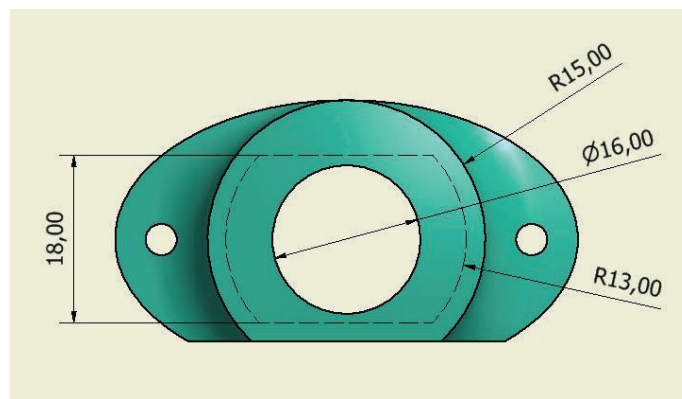
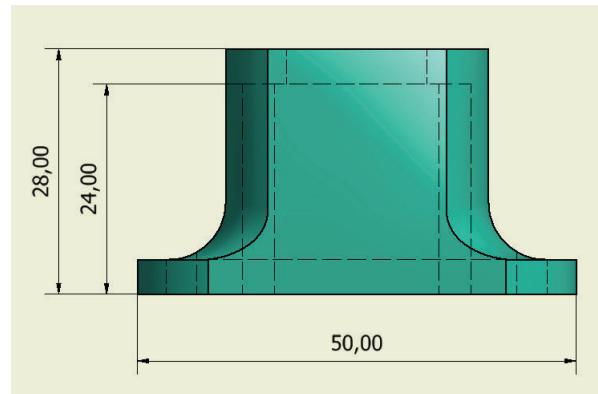


Figura 2.47 Conector tuerca – bloque de desplazamiento vertical.

Fuente: Propia

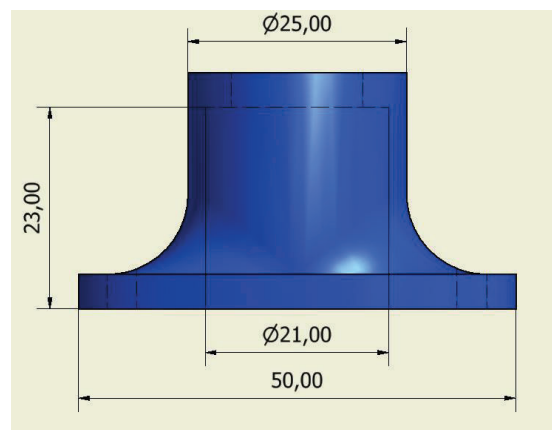


Figura 2.48 Conector rodamiento lineal – bloque de desplazamiento vertical.

Fuente: Propia

Ninguna de los conectores soporta cargas considerables por lo que su diseño es geométrico y en base a las funciones que cumplen. Todos los conectores serán

fabricados en PLA. Las formas y las dimensiones principales de cada uno de ellos se muestran en las siguientes figuras.

2.3.2.18 Tapas del equipo

Estos elementos cumplen con la función de fijar la posición de otros componentes en el equipo. Las tapas externas (**Figura 2.49**), internas (**Figura 2.50**) e internas con extensión (**Figura 2.51**) fijan los rodamientos de los ejes horizontales en la estructura, sin embargo, las tapas internas con extensión tienen la función adicional de alojar a los interruptores de fin de carrera. Las tapas inferiores para las varillas cilíndricas verticales fijan a estas últimas a la estructura e impiden que estas se deslicen verticalmente.

Ninguna de las tapas soporta mayores solicitaciones mecánicas por lo que su diseño es geométrico y en base a las funciones que cumplen. Todas las tapas serán fabricadas en PLA. Las formas y las dimensiones principales de cada uno de ellas se muestran en las siguientes figuras.

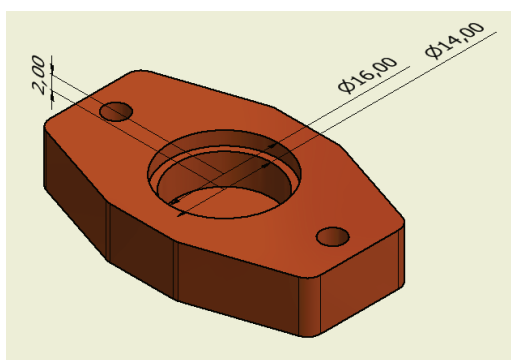


Figura 2.49 Tapa externa de los rodamientos.

Fuente: Propia

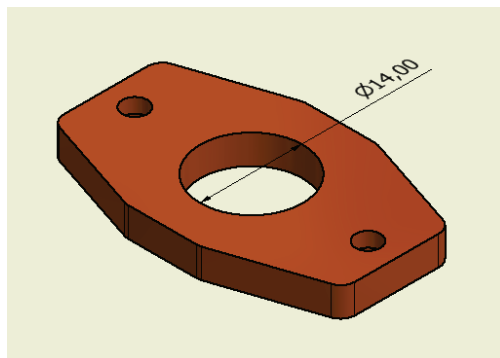


Figura 2.50 Tapa interna de los rodamientos.

Fuente: Propia

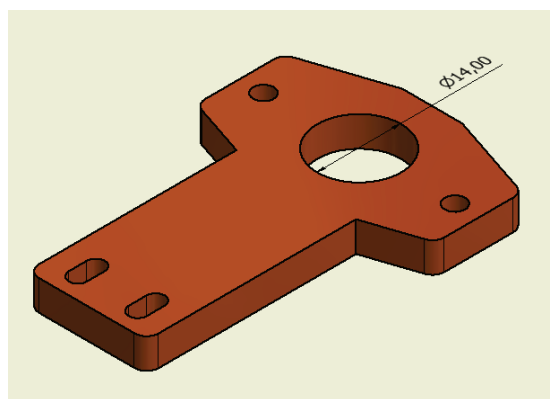


Figura 2.51 Tapa interna de los rodamientos con extensión para sensor de posición.

Fuente: Propia

2.3.2.19 Estructura

La estructura tiene la función de alojar y soportar a todos los componentes del equipo.

Las cargas que ejercen los componentes en la estructura no son considerables por lo que el diseño de los perfiles de la estructura depende de los requerimientos de ubicación y dimensionales de los elementos del equipo, y no requiere de cálculos.

La estructura está formada por trece perfiles L de aluminio y las dimensiones específicas de cada uno de ellos se muestra en los planos del ANEXO B

El plano de conjunto resultante de esta etapa de diseño se encuentra en el ANEXO B.

El diseño del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS con todos sus componentes, excepto los del sistema electrónico, realizado en el programa CAD Autodesk Inventor y según las formas y dimensiones definidas en el diseño y selección de los componentes del equipo se muestra en el esquema de la **Figura 2.52**.

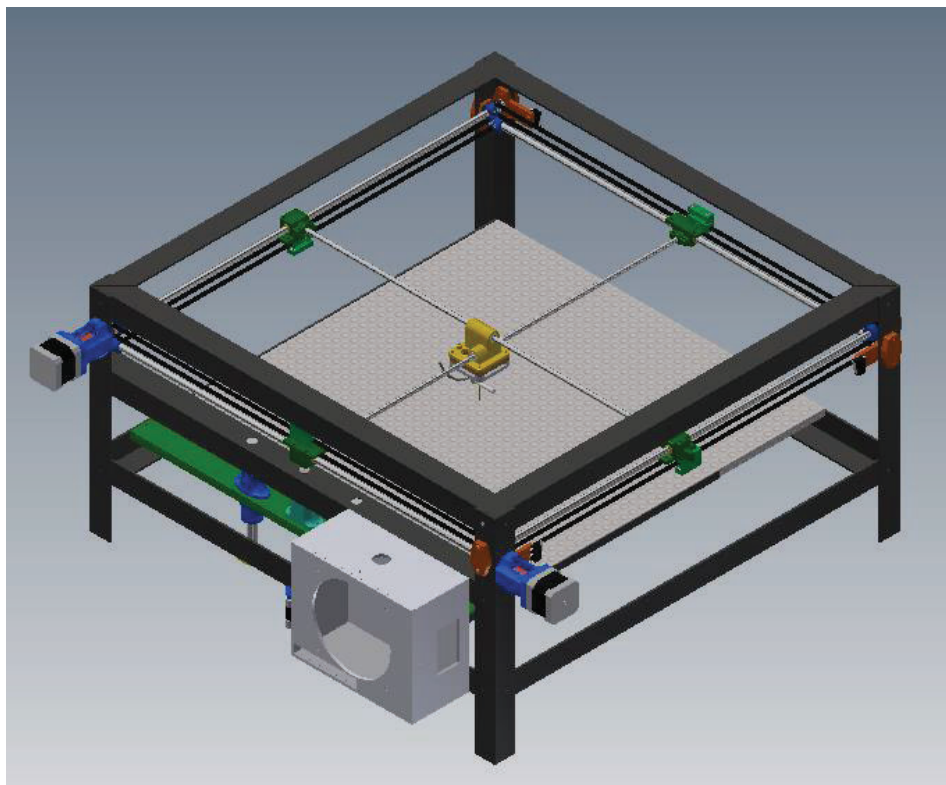


Figura 2.52 Diseño en Inventor del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

2.4 DISEÑO DE DETALLE

“El diseño de detalle (última etapa del proceso de diseño) tiene como objetivo fundamental, a partir de los planos de conjunto, completar la determinación de las piezas y preparar la documentación del producto destinada a la fabricación. Los

resultados de esta actividad se dan por medio de los planos de piezas, de los listados de componentes y de los esquemas de montaje”⁷⁴.

Para completar la determinación de los componentes del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS se debe realizar las siguientes actividades:

- Fijar las formas y dimensiones complementarias a las definidas en el diseño de materialización.
- Determinar las cadenas de cotas que cubren las diferentes funciones esenciales para el buen del equipo.
- Definir los radios de acuerdo y chaflanes.

El resultado de las actividades llevadas a cabo en esta etapa se muestra en los planos de parte de cada una de las piezas diseñadas que se encuentran en el ANEXO B.

Una vez que se adquirieron y fabricaron todos los componentes del equipo, se comprobó que sus pesos son menores o iguales a los estimados en los cálculos.

⁷⁴ (Riba Romeva, 2002, pág. 116)

CAPITULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

En el presente capítulo se detalla la construcción y ensamble de los componentes diseñados y seleccionados previamente en el capítulo 2. Como se mencionó al final de la sección 2.3.1, en la fabricación de varios elementos del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS se utilizó una técnica de manufactura y prototipado rápido por manufactura aditiva conocida generalmente como impresión 3D por lo que a continuación se explicará este procedimiento.

3.1 FABRICACIÓN DE COMPONENTES POR IMPRESIÓN 3D

Las técnicas de manufactura y prototipado rápido, como se describió en la sección 1.3.2, tienen entre sus aplicaciones a la fabricación de elementos que pueden ser usados como partes funcionales, o elementos para ajuste y montaje; los cuales son de gran utilidad en la construcción de prototipos de máquinas o máquinas únicas. Considerando esta aplicación se decidió utilizar la manufactura rápida por impresión 3D para fabricar los componentes del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS que deben tener formas específicas y cumplen funciones de ajuste y montaje. Estos componentes son:

- Cabezal.
- Bloques de desplazamiento horizontal.
- Acoplamientos motor eje horizontal – eje conductor.
- Acoplamiento motor eje vertical – tornillo de potencia.
- Conector tuerca – bloque de desplazamiento vertical.
- Conector rodamiento lineal – bloque de desplazamiento vertical.
- Conector motor eje horizontal – estructura.
- Conector motor eje vertical – estructura.
- Tapas externas para los rodamientos de los ejes horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos de los ejes horizontales.
- Tapas internas para los rodamientos de los ejes horizontales con extensión para los interruptores de fin de carrera.

- Tapas inferiores para las varillas cilíndricas verticales.
- Tensores para las bandas de distribución.

Para fabricar los componentes del equipo mencionados se utilizó la impresión 3D mediante el proceso de modelado por deposición fundida (FDM). Este método consiste en fundir un polímero termoplástico y depositarlo capa por capa para formar los cuerpos 3D. El depósito de las capas es numéricamente controlada por un computador en base a un diseño CAD. Esto permitirá fabricar de una manera rápida y relativamente barata la mayoría de partes de la presente tesis. Además, permitirá una rápida corrección de errores de diseño sin la necesidad de crear un nuevo proceso de producción. Únicamente modificando el diseño CAD y volviendo a generar el elemento deseado.

Tabla 3.1 Propiedades típicas del PLA⁷⁵.

Propiedades @ 23°C	Valor nominal	Unidad	Método de prueba
Densidad	1,24	g/cm ³	ASTM D792
Módulo de tracción	2 - 3,5	GPa	ASTM D638
Resistencia a la tracción	60,9 - 65,5	MPa	ASTM D638
Deformación a la tracción	9,8 - 10	%	ASTM D638
Módulo de flexión	2,39 - 4,93	GPa	ASTM D790
Resistencia a la flexión	47,91 - 110,32	MPa	ASTM D790

Específicamente, el equipo utilizado tiene la capacidad de generar objetos con una resolución de 0.1mm utilizando inyección de polímeros PLA o ABS. La velocidad de inyección está en el rango de 150 a 300mm/s. La principal restricción que se tiene al utilizar el equipo de manufactura aditiva por extrusión de polímeros es el tamaño del elemento a fabricar. El máximo tamaño de impresión es de 200mm x 200mm x 200mm. Sin embargo, la mayoría de los elementos a ser fabricados en la presente tesis no sobrepasa este límite. Además, en caso de requerirse imprimir partes de mayor tamaño o complejidad se puede considerar imprimirlas por partes a ser ensambladas posteriormente.

⁷⁵ <http://plastics.ulprospector.com/generics/34/c/t/poly-lactic-acid-pla-properties-processing>

El material utilizado para la fabricación de los elementos del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS fue el políácido láctico (PLA). Las propiedades típicas del PLA se observan en la **Tabla 3.1**.

La **Figura 3.1** muestra el proceso de fabricación de uno de los componentes del equipo.

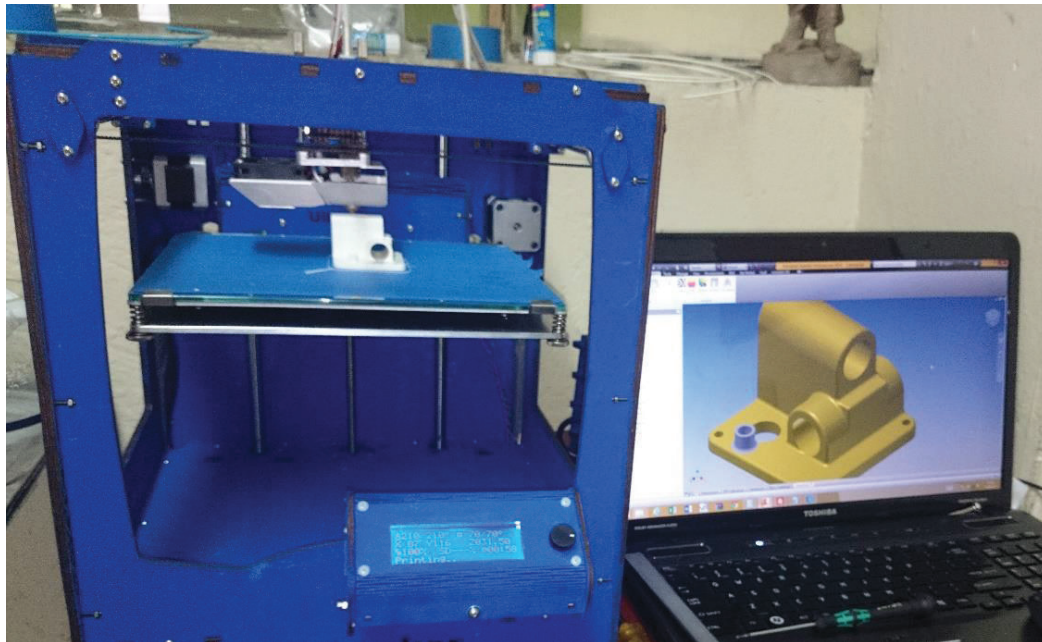


Figura 3.1 Fabricación de un componente mediante el método de impresión 3D FDM.



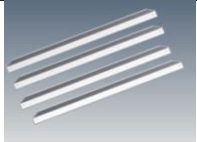
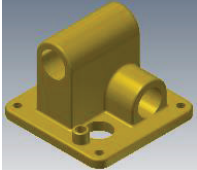
Fuente: Propia

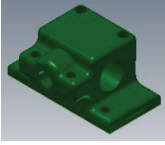
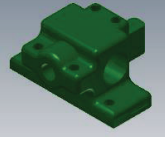
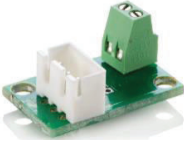
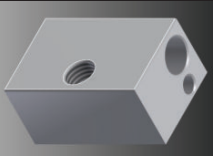

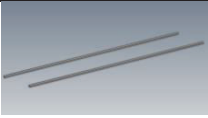
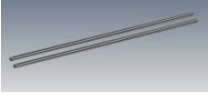

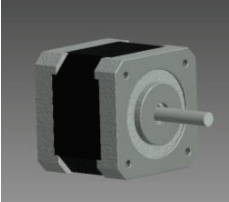
3.2 LISTA DE MATERIALES

En la **Tabla 3.2** se presenta una lista de todos los elementos, con sus respectivos materiales o especificación, que se necesitaron para el montaje del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.




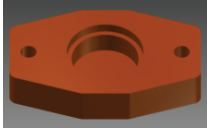

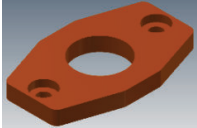
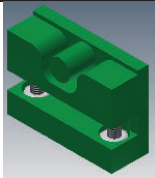


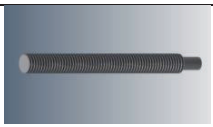
Tabla 3.2 Lista de elementos y materiales utilizados en la construcción del equipo.

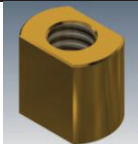


N°	Denominación	Grafico	Material y/o especificación	Cant.
1	Acople motor – eje		PLA	2
2	Acople motor – tornillo		Aluminio	1
3	Elemento aislante y conector con el bloque calefactor		PEEK y bronce	1
4	Conector tuerca – bloque		PLA	1
5	Boquilla sujetadora del sistema de corte		Bronce	1
6	Conector motor Z		PLA	1
7	Conector motores XY		PLA	2
8	Tapa interior para rodamiento e interruptor		PLA	4

9	Conector rodamiento – bloque eje Z		PLA	4
10	Perfil L 32x32x3mm con perforaciones para las guías verticales y tornillo de potencia.		Longitud 614mm – Aluminio	2
11	Perfil L 32x32x3mm.		Longitud 325mm – Aluminio	4
12	Perfil L 32x32x3mm.		Longitud 614mm – esquinas a 45° – Aluminio	4
13	Perfil L 32x32x3mm.		Longitud 614mm – esquinas cuadradas – Aluminio	3
14	Perfil L 13x13x1mm para soporte del EPS		Longitud 400mm – Aluminio	2
15	Bandas sincrónicas		2GT - 1200mm de longitud - 6mm de ancho	4
16	Casquillos		Bronce	4
17	Cabezal		PLA	1
18	Caja para tarjeta electrónica		Plástica	1

19	Bloques XY		PLA	2
20	Bloques XY para interruptor		PLA	2
21	Transmisor de la termocupla		AD597	1
22	Bloque calefactor		Aluminio	1
23	Guías verticales		Diámetro 12mm – Longitud 150mm – Acero plata	2
24	Varillas cilíndricas horizontales		Diámetro 6mm – Longitud 565mm – Acero plata	2
25	Ejes conducidos		Diámetro 8mm – Longitud 634mm – Acero plata	2
26	Ejes conductores		Diámetro 8mm – Longitud 650mm – Acero plata	2
27	Motores “paso a paso”		Marca: CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS Modelo: SY42STH38- 1684A	3

28	Fuente de poder		Output 18.5V – 6.5A	1
29	Galgas de calibración		PLA	2
30	Sujetador del sistema de calentamiento al cabezal		Aluminio	1
31	Separador de madera		Madera	1
32	Bloque eje Z		Madera	1
33	Poleas sincrónicas		2GT – 20 dientes - Aluminio	8
34	Prisioneros		M3	8
35	Cartucho de calentamiento		18 V – 40W – diámetro 6mm – longitud 30mm	1
36	Rodamientos		THK LM6L	2
37	Rodamientos		THK LM12L	2
38	Rodamientos		SKF 628 – 2Z	8

39	Interruptores cable azul		Modelo: KW11-3Z 5A – 250VAC	2
40	Interruptores cable rojo		Modelo: KW11-3Z 5A – 250VAC	2
41	Interruptores cable negro		Modelo: KW11-3Z 5A – 250VAC	2
42	Tapas exteriores rodamientos		PLA	6
43	Tapas inferiores para las guías		PLA	2
44	Tapas interiores rodamientos		PLA	4
45	Tensores para las bandas		PLA	4
46	Tarjeta electrónica		Arduino mega ultimaker shield 1.5.7	1
47	Termocupla		Tipo K – diámetro 3mm – longitud 20mm	1
48	Tornillo de potencia		Rosca trapezoidal – diámetro nominal 12mm – paso 3mm	1

49	Tuerca de potencia		Rosca trapezoidal – diámetro nominal 12mm – paso 3mm	1
50	Tornillos y tuercas		M3 – varias longitudes	-
51	Ventilador		Marca: YST Modelo: QH12025SE 12VDC – 0.2A	1

Fuente: Propia

3.3 MONTAJE DEL EQUIPO

El procedimiento de montaje se realizó siguiendo el procedimiento que se indica en las siguientes secciones. Las fotografías del procedimiento de montaje se encuentran en el ANEXO C.

3.3.1 MONTAJE DE LA ESTRUCTURA

Para el montaje de la estructura se usa pernos M3 de 20 mm de longitud con sus respectivas tuercas. Antes de armar la estructura se deben comprobar las longitudes y los diámetros de los alojamientos para los rodamientos en base a los planos incluidos en el Anexo B, una vez hecha la comprobación se procede de acuerdo a la siguiente descripción:

1. Tomar los perfiles de soporte vertical y emparejarlos de acuerdo al alineamiento de los alojamientos de los rodamientos (**Figura 3.2**).
2. Los perfiles emparejados se unen con los perfiles horizontales que tienen un bisel a 45° en sus extremos mediante los tornillos y tuercas pero sin apretar la tuerca (**Figura 3.3**).

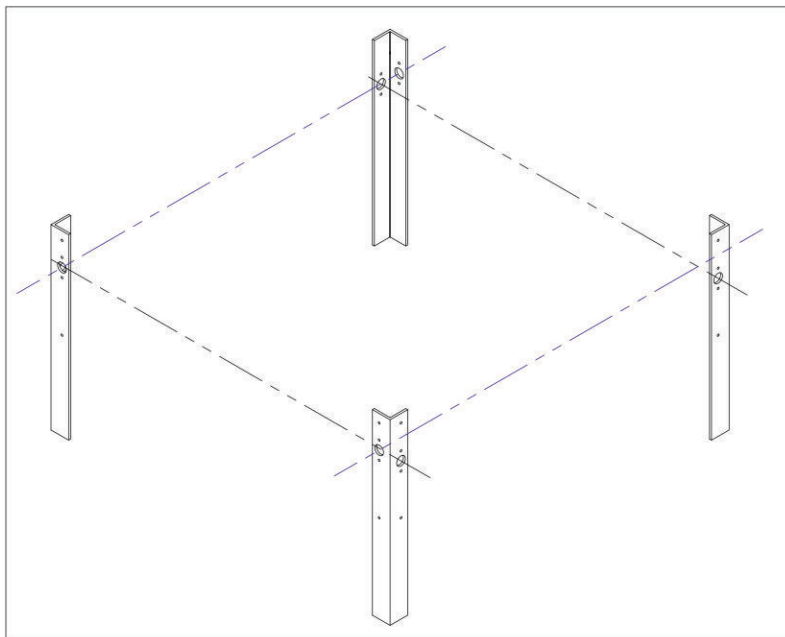


Figura 3.2 Esquema de la ubicación de los perfiles verticales de la estructura.

Fuente: Propia

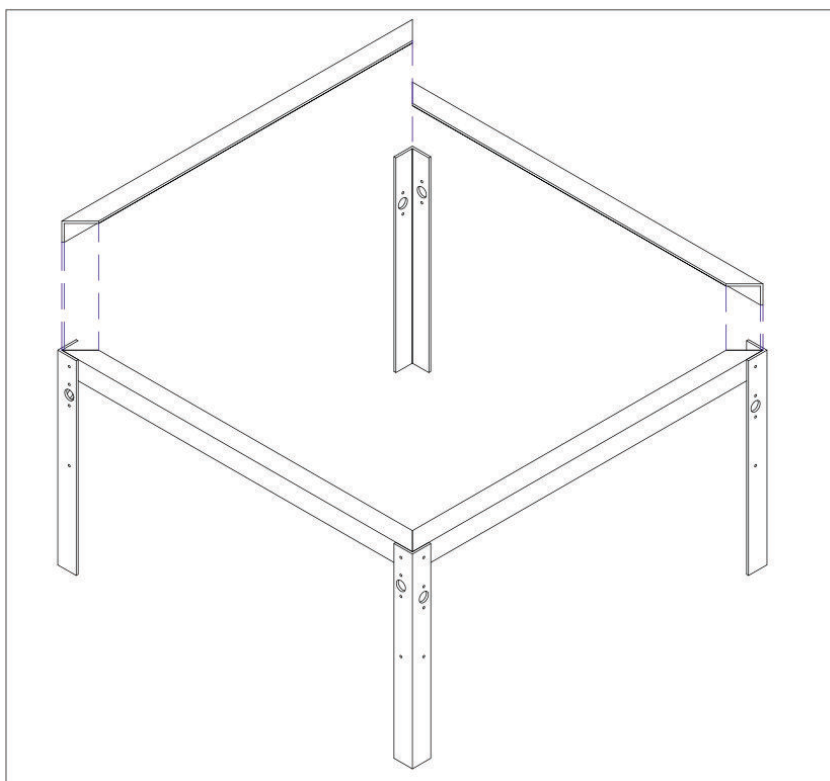


Figura 3.3 Esquema del procedimiento de montaje de los perfiles horizontales superiores de la estructura.

Fuente: Propia

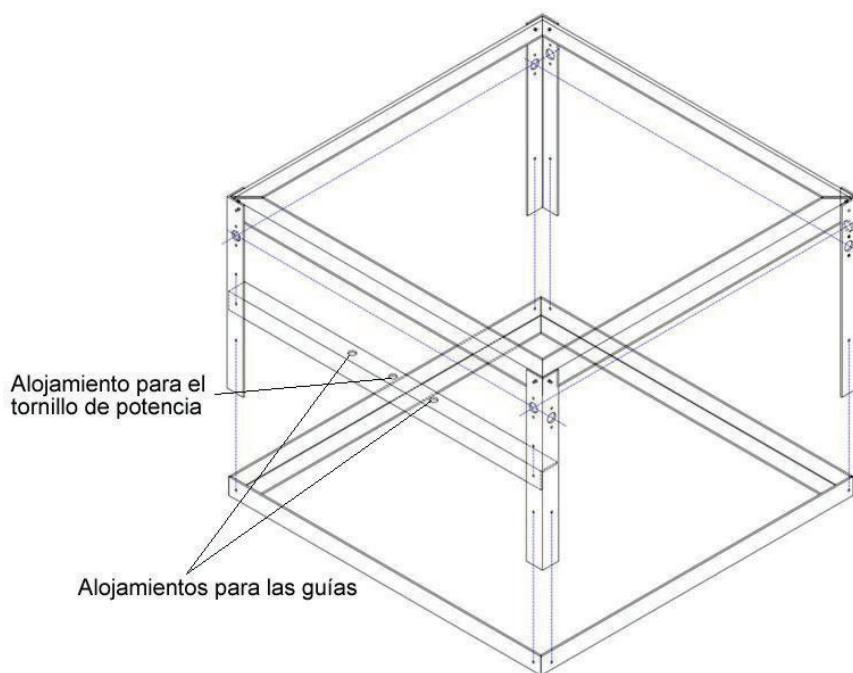


Figura 3.4 Esquema del procedimiento de montaje de los perfiles horizontales inferiores de la estructura.

Fuente: Propia

3. Se ubica el perfil superior que tiene los alojamientos para el tornillo de potencia y sus guías (**Figura 3.4**).
4. Finalmente ubicar los perfiles inferiores y cuando ya están colocados en sus respectivas posiciones los perfiles se ajustan las tuercas de cada tornillo M3

De aquí en adelante se considerará como el lado posterior de la máquina al que tiene los perfiles perforados para el sistema de desplazamiento vertical.

3.3.2 MONTAJE DE LOS EJES CONDUCTORES

Para realizar el montaje de los ejes que se acoplan al motor X, Y se sigue el siguiente procedimiento:

1. Colocar un rodamiento SKF 628 – 2Z en el alojamiento para rodamiento lateral posterior derecho.

2. Tomar un eje de 8 mm de diámetro y 650 mm de largo, y hacerlo pasar por el alojamiento para rodamiento lateral posterior izquierdo hasta la mitad de su longitud.
3. Con el eje en la posición indicada tomar los siguientes elementos:
 - I. Tapa interior para rodamiento e interruptor (8).
 - II. Polea sincrónica, con su respectivo prisionero (33).
 - III. Un casquillo (16).
 - IV. Polea sincrónica, con su respectivo prisionero (33).
 - V. Tapa interior para rodamiento (44).
4. Introducir los elementos por el lado del eje que se encuentra en el interior del equipo, en el mismo orden que se listaron y según la posición que se indica en la **Figura 3.5**.

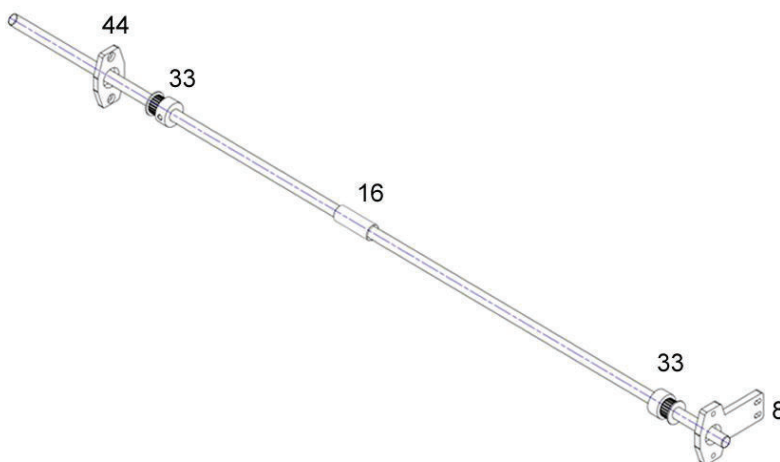


Figura 3.5 Esquema de la ubicación de los elementos del equipo en el eje conductor.

Fuente: Propia

5. Pasar el eje por el rodamiento lateral posterior derecho procurando que el eje sobresalga 4mm.
6. Colocar la tapa exterior para el rodamiento ya instalado, y atornillarla con la estructura y la tapa interior.

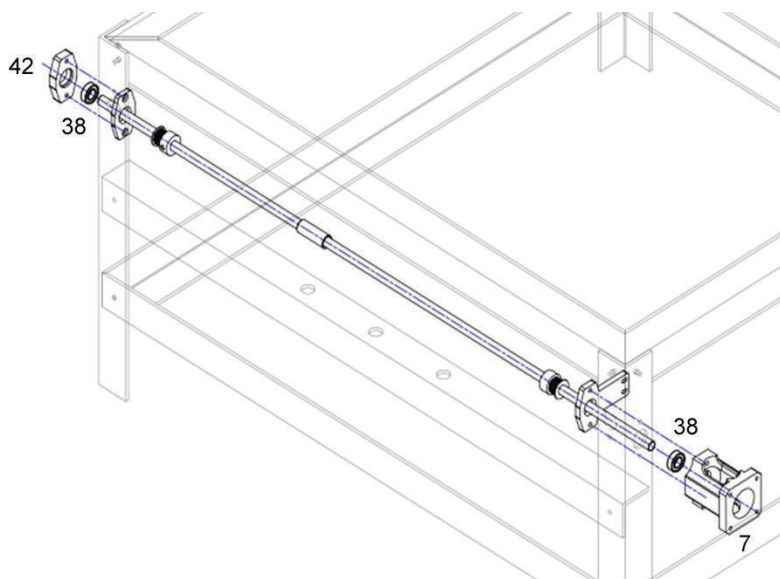


Figura 3.6 Esquema del procedimiento de montaje del primer eje conductor en el equipo.

Fuente: Propia

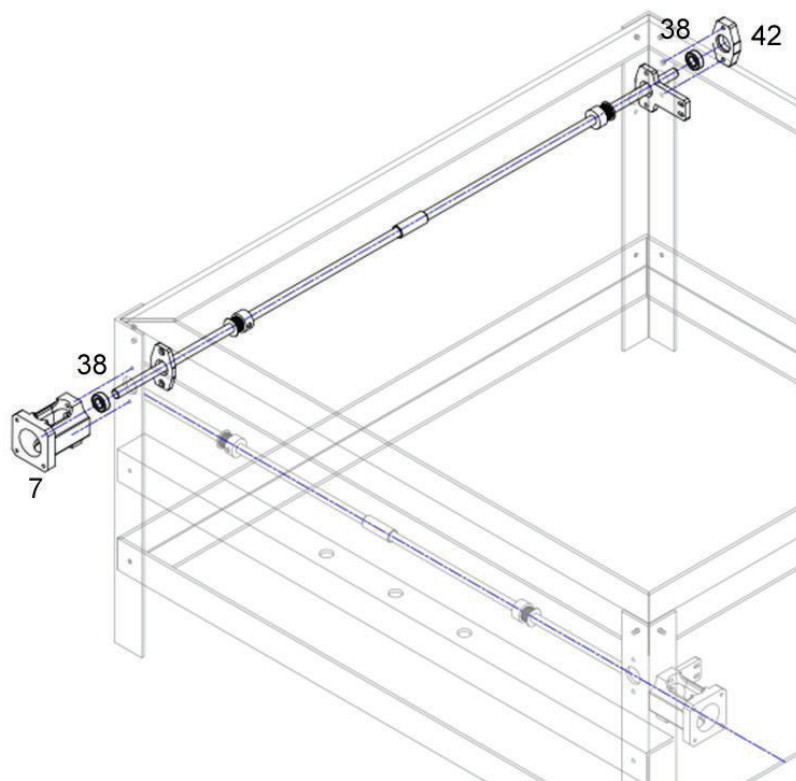


Figura 3.7 Esquema del procedimiento de montaje del segundo eje conductor en el equipo.

Fuente: Propia

7. Por el extremo libre del eje, colocar un rodamiento SKF 628 – 2Z hasta que quede fijo en el alojamiento correspondiente.
8. Colocar el conector de los motores XY y atornillarlo con la estructura y la tapa interior para rodamiento e interruptor como indica la **Figura 3.6**.
9. Colocar un rodamiento SKF 628 – 2Z en el alojamiento que corresponde al extremo libre del eje que se está montando.
10. Tomar un eje de 8mm y 650mm de largo, y hacerlo pasar por el alojamiento para rodamiento frontal derecho hasta la mitad de su longitud.
11. Repetir los pasos 3 y 4.
12. Pasar el eje por el rodamiento posterior derecho procurando que el eje sobresalga 4mm.
13. Repetir los paso 6 y 7.
14. Colocar el conector de los motores XY y atornillarlo con la estructura y la tapa interior para rodamiento e interruptor como indica la **Figura 3.7**.

3.3.3 MONTAJE DE LOS EJES CONDUCIDOS

1. Colocar un rodamiento SKF 628 – 2Z en el alojamiento para rodamiento posterior izquierdo.
2. Tomar un eje de 8 mm de diámetro y 632 mm de largo, y hacerlo pasar por el alojamiento para rodamiento frontal izquierdo hasta alcanzar la mitad de su longitud.
3. Repetir los pasos 3 y 4 de la sección 3.2.2.
4. Pasar el eje por el rodamiento posterior izquierdo procurando que el eje sobresalga 4mm.
5. Repetir los paso 6 y 7 de la sección 3.2.2.
6. Colocar la tapa exterior para rodamiento faltante, y atornillarlo con la estructura y la tapa interior como indica la **Figura 3.8**.

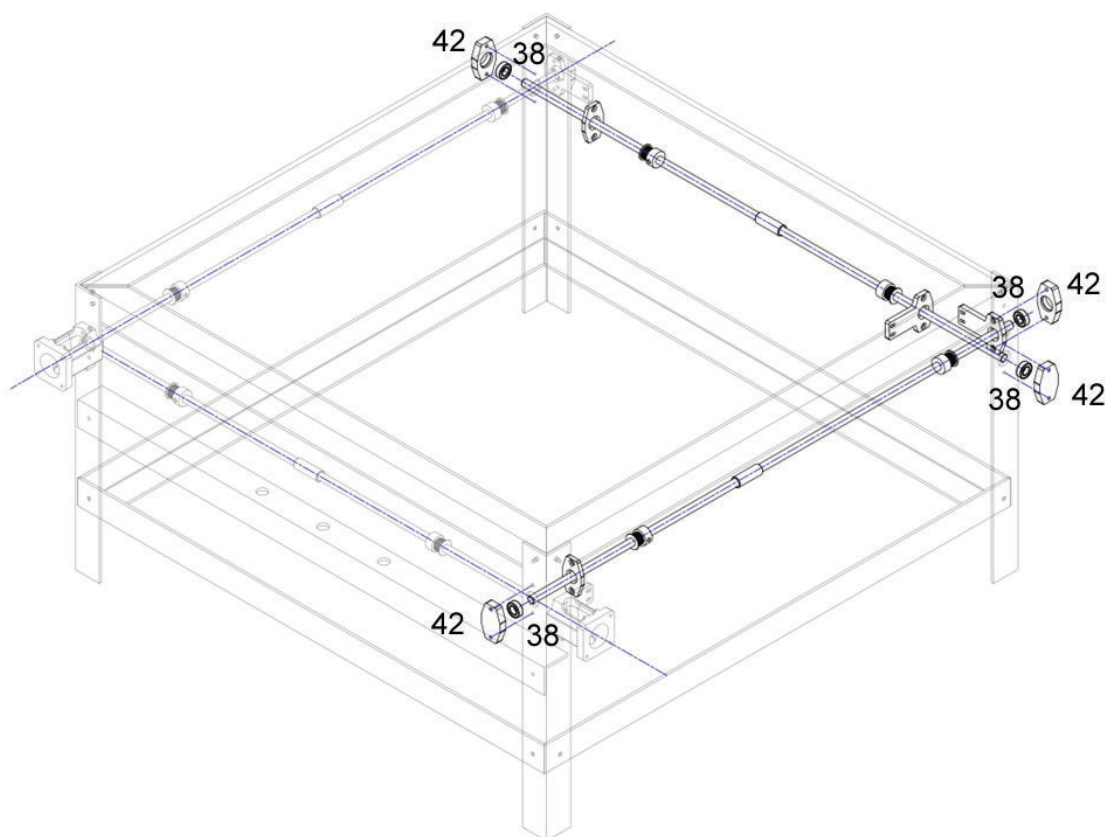


Figura 3.8 Esquema del procedimiento de montaje de los ejes conducidos del equipo.

Fuente: Propia

7. Colocar un rodamiento SKF 628 – 2Z en el alojamiento para rodamiento lateral frontal derecho.
8. Tomar un eje de 8 mm de diámetro y 632 mm de largo, y hacerlo pasar por el alojamiento para rodamiento lateral frontal izquierdo hasta alcanzar la mitad de su longitud.
9. Repetir los pasos 3 y 4 de la sección 3.2.2.
10. Pasar el eje por el rodamiento lateral frontal derecho procurando que el eje sobresalga 4mm.
11. Repetir los pasos 6 y 7 de la sección 3.2.2.
12. Colocar la tapa exterior para rodamiento faltante, y atornillarlo con la estructura y la tapa interior como indica la **Figura 3.8**.

3.3.4 MONTAJE DE LOS MOTORES Y SENSORES XY

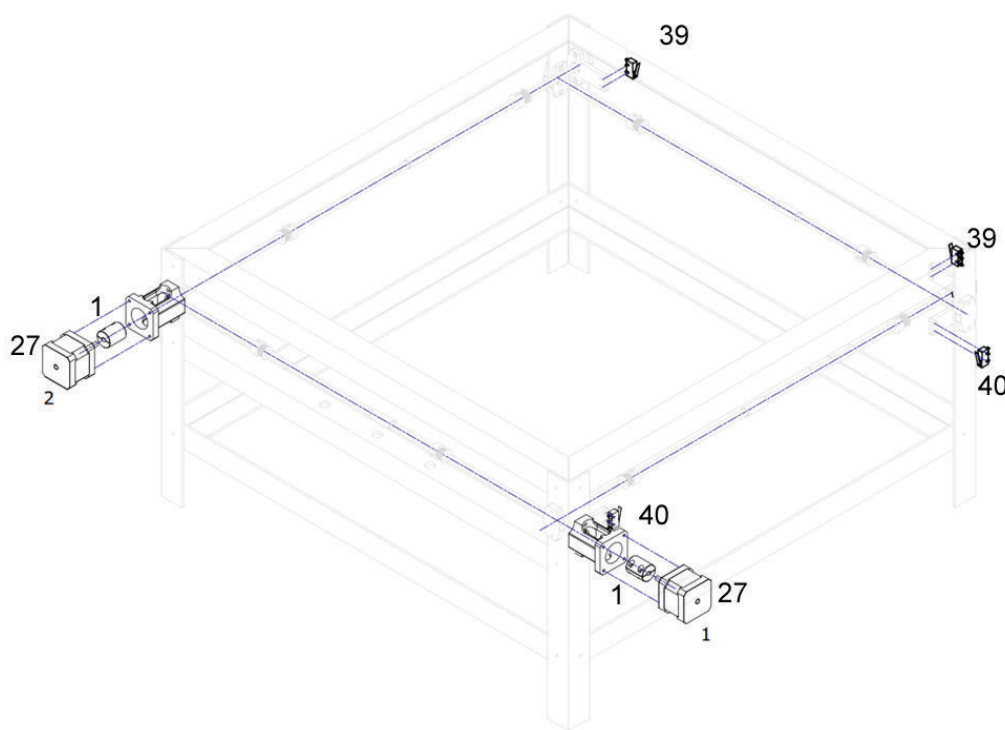


Figura 3.9 Esquema del procedimiento de montaje de los motores y sensores XY.

Fuente: Propia

1. Introducir el eje del motor 1 en el acople motor – eje.
2. Colocar el conjunto acople – motor 1 en el extremo saliente del eje conductor posterior.
3. Unir el motor 1 con el conector utilizando tornillos.
4. Colocar y ajustar los tornillos del acople motor – eje 1.
5. Repetir los pasos 1, 2, 3 y 4 para el motor 2.
6. Colocar los interruptores que tienen los cables rojos en las tapas para rodamiento e interruptor, ubicadas en el lado izquierdo del equipo.
7. Colocar los interruptores que tienen los cables azules en las tapas para rodamiento e interruptor, ubicadas en el lado frontal del equipo.

3.3.5 MONTAJE DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO VERTICAL

1. Ubicar los rodamientos LM12L en las perforaciones correspondientes del bloque de desplazamiento vertical.
2. Colocar los conectores para rodamientos LM12L sobre los rodamientos y ajustarlos con tornillos al bloque de desplazamiento vertical.

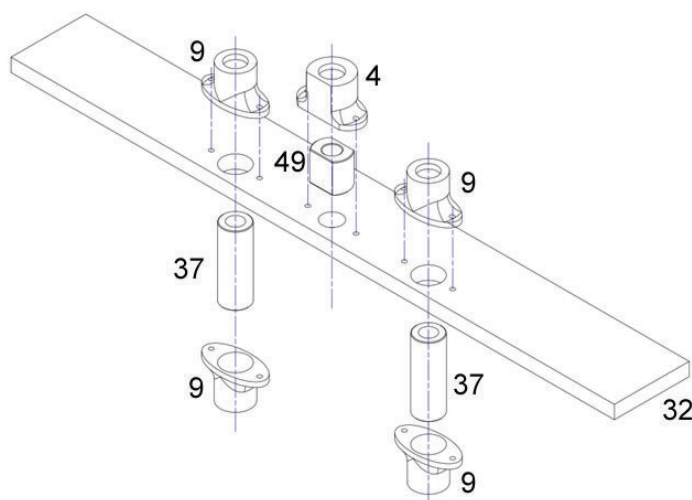


Figura 3.10 Esquema del procedimiento de montaje del conjunto de desplazamiento vertical.

Fuente: Propia

3. Introducir la tuerca en su conector y ajustar el conjunto al bloque vertical mediante tronillos.
4. Ubicar el conjunto de desplazamiento vertical en el perfil que servirá de alojamiento para las guías y el tornillo de potencia.
5. Posicionar las guías en la parte inferior de la estructura y hacerlas pasar por los alojamientos correspondientes del perfil inferior, los rodamientos LM12L y los alojamientos correspondientes del perfil superior.
6. Colocar las tapas inferiores para las guías.
7. Pasar el tornillo por el alojamiento correspondiente del perfil inferior, a través de la tuerca y por el alojamiento correspondiente del perfil superior.
8. Ubicar el acople tornillo – motor en el extremo inferior del tornillo de potencia y ajustar el prisionero superior.

9. Ajustar el conector motor Z al motor mediante tornillos.
10. Ubicar el eje del motor en el acople tornillo – motor y fijar el conjunto del motor Z al perfil inferior utilizando tronillos.
11. Ajustar el prisionero inferior del acople tornillo – motor.
12. Ajustar los perfiles de soporte al bloque de desplazamiento vertical utilizando tornillos.
13. Fijar los interruptores Z en las caras verticales internas de los perfiles que tienen los alojamientos para las guías.

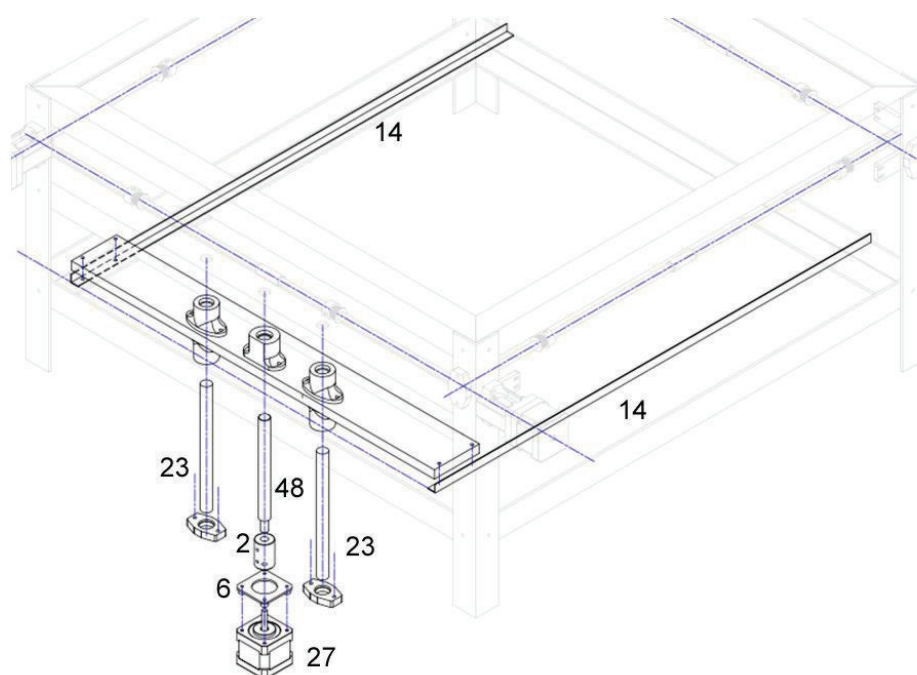


Figura 3.11 Esquema del procedimiento de montaje del sistema de movimiento vertical.

Fuente: Propia

3.3.6 MONTAJE DE LOS BLOQUES DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL, VARILLAS HORIZONTALES Y CABEZAL DE CORTE

1. El primer paso de esta etapa de montaje consiste en colocar los rodamientos LM6UU en el cabezal y ensamblar el conjunto como indica la **Figura 3.12**.

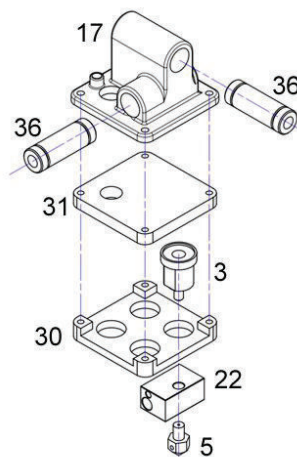


Figura 3.12 Esquema del procedimiento de montaje del cabezal de corte.

Fuente: Propia

2. El siguiente paso consiste en montar los bloques de desplazamiento horizontal sobre los casquillos de los ejes horizontales (**Figura 3.13**). Los bloques horizontales para interruptor se deben ubicar en el eje lateral izquierdo y en el eje frontal. El ajuste completo de los tornillos se debe realizar después de montar el cabezal de corte en las varillas horizontales y ubicar estas últimas en los bloques de desplazamiento horizontal.

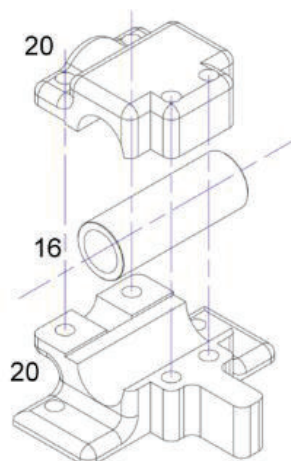


Figura 3.13 Esquema del procedimiento de montaje de los bloques de desplazamiento horizontal.

Fuente: Propia

3. Pasar las barrilas horizontales por los rodamientos LM6L.
4. Posicionar las varillas horizontales de acuerdo a la disposición de los bloques y montarlas en los bloques horizontales como se muestra en la **Figura 3.14**.
5. Ajustar los tornillos de los bloques de desplazamiento horizontal que sujetan a las varillas horizontales.
6. Hacer pasar el cartucho de calentamiento y la termocupla por el agujero del cabezal.
7. Introducir el cartucho de calentamiento en el alojamiento de mayor diámetro del bloque calefactor y la termocupla en el agujero de menor diámetro.
8. Ajustar el cartucho de calentamiento mediante el tornillo M3 que se ubica en el último agujero del bloque calefactor.

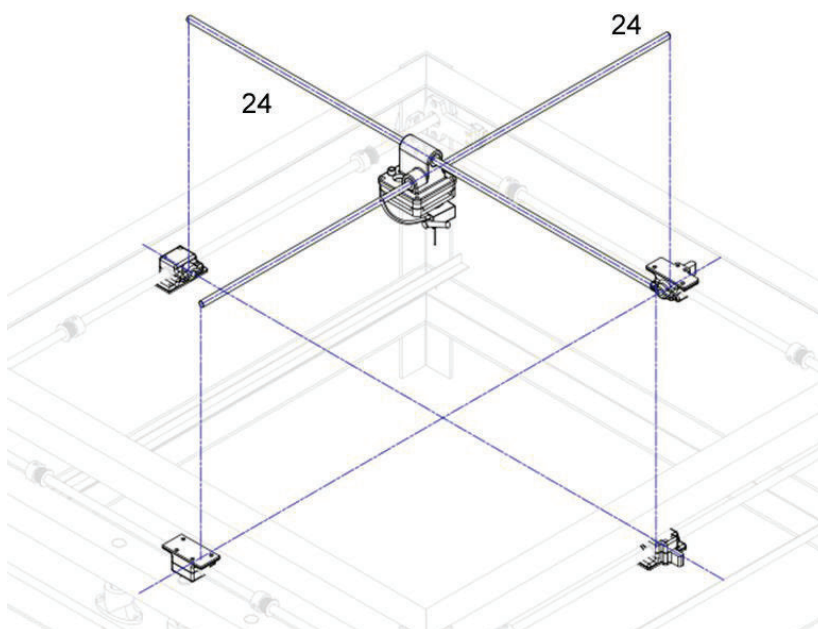


Figura 3.14 Esquema del procedimiento de montaje de las varillas horizontales.

Fuente: Propia

3.3.7 MONTAJE DE LAS BANDAS Y ALINEACIÓN DE LAS VARILLAS HORIZONTALES

El procedimiento de montaje y tensión es el mismo para las cuatro bandas que se usan en la máquina y se describe a continuación:

1. Tomar ambos extremos de la banda y hacerlos pasar por las poleas correspondientes.
2. Introducir los extremos en el bloque de desplazamiento horizontal.
3. Tensar los extremos hacia el interior del bloque y ajustar los tornillos de modo que los extremos de la banda queden fijos en el bloque.
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 para montar las tres bandas restantes.

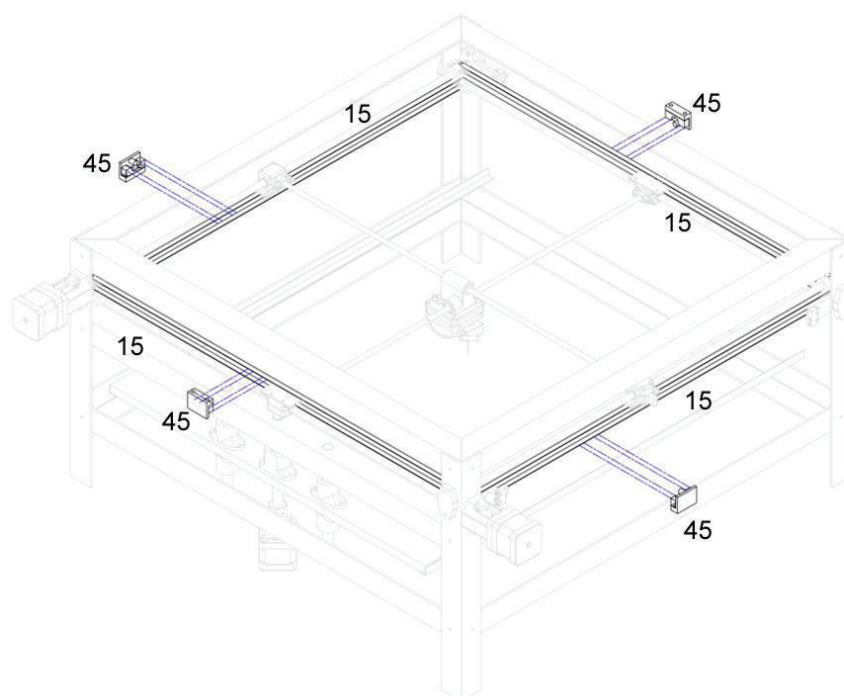


Figura 3.15 Esquema del procedimiento de montaje y tensión de las bandas.

Fuente: Propia

Para el procedimiento de tensión, se coloca un tensor en la banda como se muestra en la **Figura 3.15** y utilizando los tornillos de los tensores se aumenta la tensión en las bandas. Los tornillos deben ser ajustados una vuelta a la vez, es decir se da una vuelta a un tornillo y enseguida se da una vuelta en el otro, hasta conseguir la tensión necesaria. Este procedimiento se realiza en todas las bandas.

Para el procedimiento de alineación de las varillas horizontales se usan las galgas de calibración y se siguen los siguientes pasos:

1. Colocar cada galga en un extremo opuesto de un eje de 8mm.
2. Acercar la varilla horizontal que sea paralela el eje donde se colocaron las galgas.
3. Colocar uno de los dientes de la galga en la varilla horizontal y fijarse a que número de diente corresponde.
4. Colocar la otra galga sobre la varilla horizontal y verificar si uno de los dientes calza en la misma. En el caso de que un diente de la segunda galga calce en la varilla horizontal se debe comprobar que el número de diente sea igual en ambas galgas.
5. Repetir el paso anterior con la segunda galga haciendo coincidir el número de diente con la viga.
6. Asegurar que ambos números de las galgas coinciden con la viga de 6mm de diámetro y sin sacar las galgas de su posición ajustar los prisioneros de las poleas sincrónicas al eje de 8mm de diámetro.
7. El proceso se repite para alinear los ejes de 8 mm restantes.

3.3.8 UBICACIÓN DE LA CAJA Y DE LA TARJETA ELECTRONICA

1. Colocar la tarjeta al interior de la caja y ajustarla mediante tornillos.
2. Ubicar la caja de acuerdo a como se muestra en la figura y atornillarla a la estructura del equipo

Nota: El ventilador será colocado después de hacer las conexiones de los motores, sensores, termocupla y cartucho de calentamiento.

3.3.9 CONEXIÓN DE LA TARJETA ELECTRONICA

1. Comenzar identificando los motores X, Y, Z, el motor Z es el más fácil de identificar puesto que es el que esta acoplado al tornillo de potencia, el motor Y es el motor 1 que identificamos en Montaje de motores y sensores X, Y. El motor X es el motor 2 que se identificó en el mismo paso.
2. Conectar los motores a la tarjeta de acuerdo a la identificación que esta tiene en los puertos.

3. Identificar los puertos para los sensores en la tarjeta, estos se encuentran en la parte inferior de la tarjeta, son seis puertos colocados juntos, los sensores de cable rojo son conectados en los puertos de la mitad, al lado derecho de estos se conectan los sensores de cable negro y al lado izquierdo se conectan los sensores de cable azul.
4. La el cartucho de calentamiento se conecta en el primer puerto en el que se indica en la figura.
5. El cable de la termocupla se conecta en el puerto TEMP1.
6. El cable del otro extremo de la termocupla se conecta al chip.
7. Los cables de la termocupla que están libres (son los cables que salen del cubo de aluminio) se conectan en el puerto de color verde que está en el chip.
8. Por ultimo colocar el ventilador, este va a ubicarse en un extremo de la caja de forma que quede sobre la tarjeta (este ventilador es uno de 12V por lo cual necesita una fuente extra para funcionar, la cual está ubicada bajo la caja que contiene a la tarjeta y se conecta por medio de cables la ventilador).

CAPITULO 4. PRUEBAS, CALIBRACIÓN Y CREACIÓN DE OBJETOS 3D

Una vez que el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS ha sido construido y ajustado mecánicamente es necesario realizar las pruebas y calibración del mismo. Para llevar a cabo estas tareas primero se deben configurar los parámetros del sistema de control y determinar el método de obtención para los modelos 3D que se van a fabricar.

4.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

La configuración del sistema de control se realiza en el software de control Cura versión 15.02.1. Al abrir el software se presenta la pantalla de inicio, en esta se encuentran las herramientas y opciones básicas que permiten controlar el programa y consecuentemente el equipo. En la **Figura 4.1** se puede identificar cada una de las herramientas y opciones que se describen a continuación:

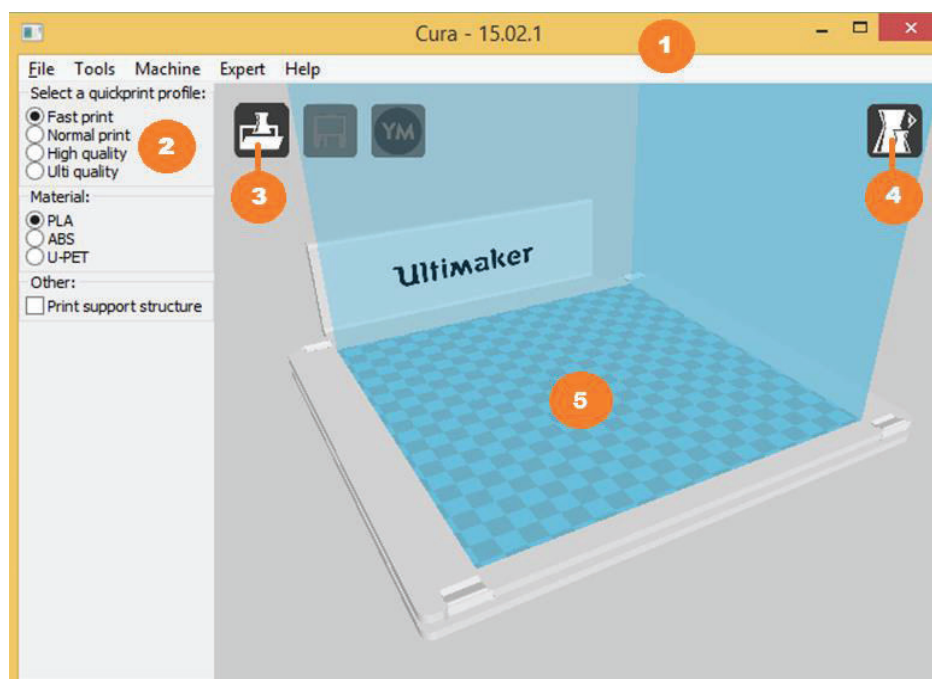


Figura 4.1 Pantalla de inicio del software de control Cura.

Fuente: Propia

1. La barra de menús es donde se cargan y guardan los archivos que se utilizan en el programa, y donde se pueden realizar cambios en los ajustes, configuración, máquinas, entre otros.
2. Área de configuraciones rápidas para realizar una impresión 3D.
3. Acceso rápido para cargar archivos.
4. Acceso a los distintos modos de visualización de los objetos.
5. Área de trabajo del equipo.

Antes de realizar la configuración del sistema de control del equipo, se debe crear una nueva máquina en software de control. Para esto se selecciona la opción **Machine** en la barra de menús y **Add new machine** en el menú desplegado, con lo que se abre al asistente de instalación. En la primera pantalla del asistente se selecciona **Next** y se continúa con la pantalla de selección de la máquina que se quiere agregar (**Figura 4.2**). En esta pantalla se selecciona **Other** y **Next**, y en la siguiente pantalla se selecciona **Custom**. En la siguiente pantalla se ingresa el nombre que se le va a dar al equipo y las dimensiones del mismo (**Figura 4.3**). Una vez definidos estos parámetros se selecciona **Finish** y se presenta una pantalla similar a la de la **Figura 4.1**. En este punto es necesario realizar una serie de configuraciones que permitan adaptar el programa a las condiciones del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

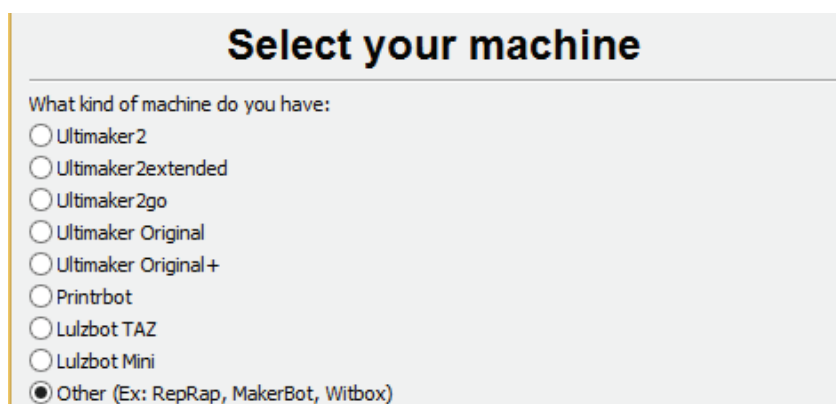


Figura 4.2 Pantalla de selección para agregar máquinas en el software de control Cura.

Fuente: Propia

Custom RepRap information

RepRap machines can be vastly different, so here you can set your own settings.
Be sure to review the default profile before running it on your machine.
If you like a default profile for your machine added,
then make an issue on github.

You will have to manually install Marlin or Sprinter firmware.

Machine name	<input type="text" value="manufactura aditiva EPS"/>
Machine width X (mm)	<input type="text" value="550"/>
Machine depth Y (mm)	<input type="text" value="550"/>
Machine height Z (mm)	<input type="text" value="80"/>
Nozzle size (mm)	<input type="text" value="0"/>
Heated bed	<input type="checkbox"/>
Bed center is 0,0,0 (RoStock)	<input type="checkbox"/>

Figura 4.3 Pantalla de ajustes para máquinas del software Cura.

Fuente: Propia

La configuración del sistema de control del equipo se inicia ingresando a la ventana de ajustes de máquina (**Figura 4.4**), para la cual se selecciona la opción **Machine** en la barra de menús y **Machine settings** en el menú desplegado. En la ventana de ajustes de máquina se encuentra pestañas con los nombres de todas las máquinas que se han instalado y al seleccionarlás se muestran los ajustes que tienen cada una de ellas. Si es la primera vez que se instala una máquina se mostrara solamente la máquina instalada en la etapa anterior con su respectivo nombre. Al seleccionar el equipo de manufactura aditiva EPS se debe tener los valores mostrados en la **Figura 4.4**.

Machine settings ✕

Ultimaker Original | Ultimaker Original+ | Prueba Ultimaker | Prueba 2 | Manufactura Aditiva Eps

Machine settings		Printer head size	
E-Steps per 1mm filament	<input type="text" value="0"/>	Head size towards X min (mm)	<input type="text" value="0"/>
Maximum width (mm)	<input type="text" value="550"/>	Head size towards Y min (mm)	<input type="text" value="0"/>
Maximum depth (mm)	<input type="text" value="550"/>	Head size towards X max (mm)	<input type="text" value="0"/>
Maximum height (mm)	<input type="text" value="80"/>	Head size towards Y max (mm)	<input type="text" value="0"/>
Extruder count	<input type="text" value="1"/>	Printer gantry height (mm)	<input type="text" value="0"/>
Heated bed	<input type="checkbox"/>	Communication settings	
Machine center 0,0	<input type="checkbox"/>	Serial port	<input type="text" value="AUTO"/>
Build area shape	<input type="text" value="Square"/>	Baudrate	<input type="text" value="AUTO"/>
GCode Flavor	<input type="text" value="RepRap (Marlin/Sprinter)"/>		

Figura 4.4 Ventana de ajustes para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS.

Fuente: Propia

El siguiente paso en la configuración del sistema de control del equipo consiste en modificar las opciones avanzadas del programa ya que sus configuraciones por defecto están hechas para controlar impresoras 3D. Para modificar la interface del programa y se poder llevar a cabo las configuraciones necesarias para el equipo se selecciona la opción **Expert** en la barra de menús y **Switch to full settings** en el menú desplegado. Esta interface se muestra en la **Figura 4.5**.

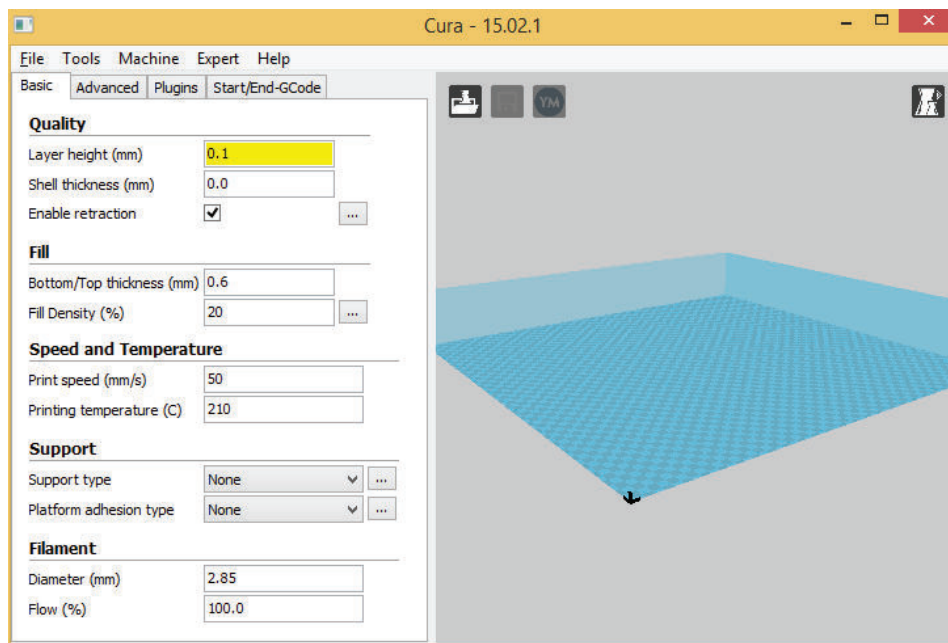


Figura 4.5 Interface con ajustes completos del software de control Cura.

Fuente: Propia

Antes de realizar alguna modificación en la interface de ajustes completos se debe configurar los ajustes de experto. Para ingresar a esta ventana se selecciona la opción **Expert** en la barra de menús y **Open expert settings** en el menú desplegado. En la ventana de ajustes de experto (**Figura 4.6**) se deben realizar dos cambios:

- En la sección **Skirt** se debe colocar el valor 0 en **Line count**. Esta opción hace que el equipo realice el número indicado de líneas de contorno a una distancia dada alrededor del objeto que se va a fabricar y dado que en el equipo de manufactura aditiva no se requiere realizar esta operación se asigna el valor 0.

- En la sección **Black magic** se debe seleccionar la opción **Only follow mesh Surface**. Al seleccionar esta opción se le indica al programa que solo genere las rutas correspondientes a las líneas de contorno del objeto que se va a cortar y no las líneas de relleno que se generan cuando se van a realizar impresiones 3D.

The image shows the 'Expert config' window in Cura software, which is used for fine-tuning print settings. The window is divided into several sections, each with its own set of parameters and controls.

Section	Parameter	Value
Retraction	Minimum travel (mm)	1.5
	Enable combing	All
	Minimal extrusion before retracting (mm)	0.02
	Z hop when retracting (mm)	0.0
Skirt	Line count	0
	Start distance (mm)	3.0
	Minimal length (mm)	150.0
Cool	Fan full on at height (mm)	0.5
	Fan speed min (%)	100
	Fan speed max (%)	100
	Minimum speed (mm/s)	10
	Cool head lift	<input type="checkbox"/>
Infill	Solid infill top	<input checked="" type="checkbox"/>
	Solid infill bottom	<input checked="" type="checkbox"/>
	Infill overlap (%)	15
Support	Structure type	Lines
	Overhang angle for support (deg)	60
	Fill amount (%)	15
	Distance X/Y (mm)	0.7
	Distance Z (mm)	0.15
Black Magic	Spiralize the outer contour	<input type="checkbox"/>
	Only follow mesh surface	<input checked="" type="checkbox"/>
Brim	Brim line amount	20
Raft	Extra margin (mm)	5.0
	Line spacing (mm)	3.0
	Base thickness (mm)	0.3
	Base line width (mm)	1.0
	Interface thickness (mm)	0.27
	Interface line width (mm)	0.4
	Airgap	0.0
	First Layer Airgap	0.22
Surface layers	Surface layers	2
	Surface layer thickness (mm)	0.27
	Surface layer line width (mm)	0.4
Fix horrible	Combine everything (Type-A)	<input type="checkbox"/>
	Combine everything (Type-B)	<input type="checkbox"/>
	Keep open faces	<input type="checkbox"/>
	Extensive stitching	<input type="checkbox"/>

At the bottom of the window, there is an 'Ok' button.

Figura 4.6 Ventana de ajustes de experto del software de control Cura.

Fuente: Propia

Con los ajustes de experto realizados se procede a cambiar la configuración que se encuentra en la interface de ajustes completos (**Figura 4.5**). Esta interface tiene

4 pestañas: Basic, Advanced, Plugins y Start/End-Gcode. En cada una de estas pestañas se encuentran configuraciones que se deben modificar para ser adaptadas a lo requerido por el equipo de manufactura aditiva. Es importante mencionar que muchos de los parámetros que se encuentran en las pestañas no son de utilidad para el control del equipo de manufactura por lo que no necesitan ser modificados.

En la pestaña **Basic** se debe modificar los valores de **Layer height, printing speed y printing temperature**. En el valor de **Layer height** se debe ingresar el espesor de la capa que se va a cortar. Por otro lado, la velocidad y temperatura son los valores que definen la velocidad con la que se moverá el cabezal en posición de corte y la temperatura que deberá alcanzar el sistema de calentamiento. Estos parámetros deben variarse hasta encontrar las condiciones óptimas de corte a medida que se realizan las pruebas. Los valores de los demás parámetros se deben cambiar por 0 y se debe desactivar la opción **Enable retraction** para que estos no afecten el funcionamiento del equipo.

En la pestaña **Advanced** encontramos varios parámetros pero el único que involucra al equipo de manufactura aditiva es el de **Travel speed**. Este parámetro define la velocidad con la que se moverá el cabezal de corte en posición de desplazamiento y no incide en el proceso de corte propiamente dicho. Con el objetivo de reducir los tiempos utilizados en el desplazamiento se define un valor de 30mm/s para este parámetro. El resto de valores deben ser remplazados por el mismo valor que se defina en **Printing temperature** y se debe desmarcar la casilla **Enable cooling fan**.

La pestaña de **Plugins** contiene distintos complementos para realizar una impresión 3D pero para el equipo de manufactura aditiva no son de utilidad.

La pestaña **Star/End-Gcode** contiene el conjunto de instrucciones que debe cumplir el equipo antes y después de realizar los movimientos de corte. Las instrucciones que se encuentran programadas por defecto son las requeridas por una impresora 3d por lo que estas deben ser modificadas y adaptadas a las que

debe llevar a cabo el equipo de manufactura aditiva. Para realizar la modificación de estas instrucciones es necesario entender que es el Gcode, para que es utilizado y como se escribe.

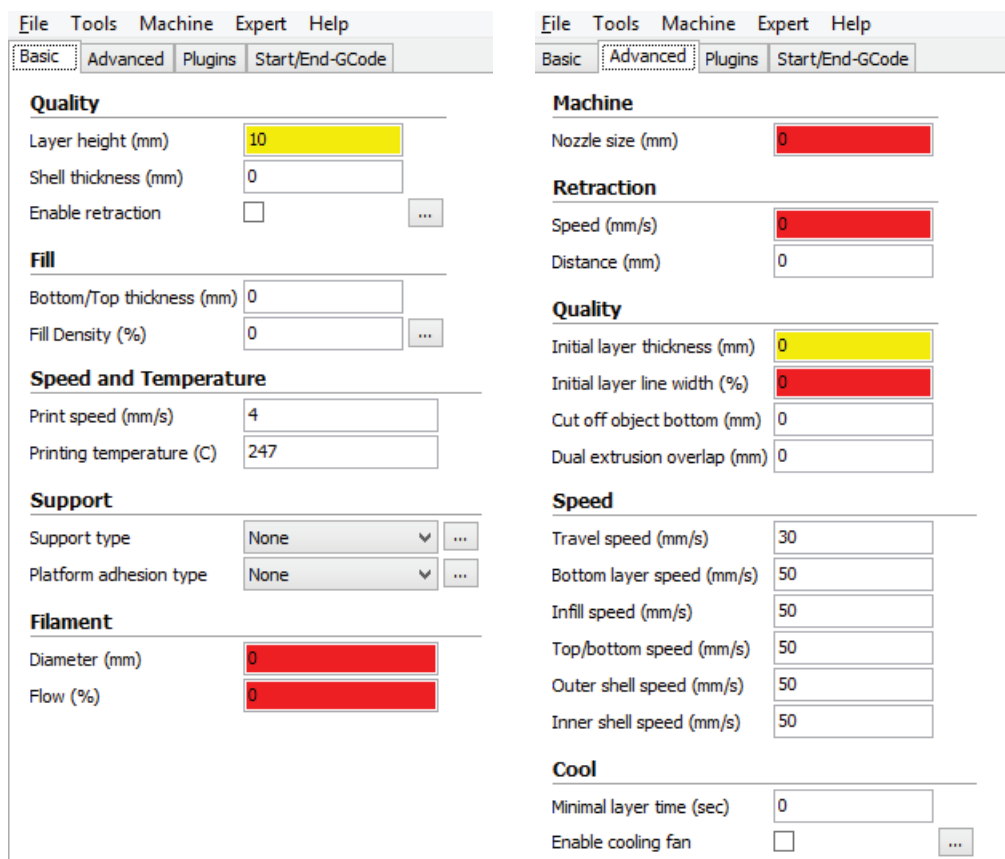


Figura 4.7 Configuraciones iniciales en la interface de ajustes completos del software de control Cura.

Fuente: Propia

Finalmente, es recomendable cambiar el tipo de ventana que se mostrara al momento de imprimir. Para realizar este cambio se selecciona la opción **File** en la barra de menús y **Preferences** en el menú desplegado. En la ventana que aparece se debe cambiar la opción de **Printing window type** de Basic a Pronterface UI (**Figura 4.8**). Esta ventana de impresión permitirá tener una mejor visualización del proceso de corte e identificar algún error rápidamente.

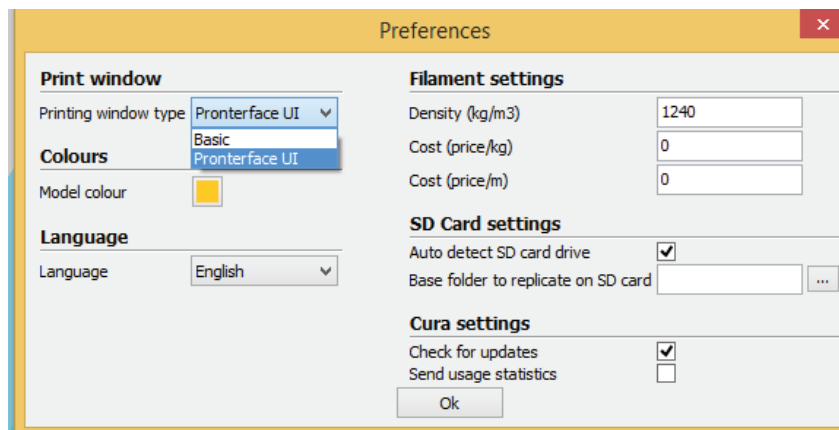


Figura 4.8 Ventana de preferencias del software de control Cura.

Fuente: Propia

4.1.1 GCODE

Gcode o código G es el nombre general para el lenguaje de programación más usado para controlar máquinas CNC alrededor del mundo. Este lenguaje permite generar los archivos que contienen la secuencia de operaciones (movimientos, velocidades, activación y desactivación de componentes) que un equipo CNC debe llevar a cabo para fabricar un elemento. Los archivos generados utilizando el lenguaje Gcode se conocen como programas de parte y pueden ser escritos manualmente o con la ayuda de un programa CAM. Los programas de parte están compuestos por líneas de programación llamados bloques. Cada bloque está compuesto por varios comandos y representa un conjunto de instrucciones que se deben llevar a cabo para cumplir una determinada operación.

Cada software de control tiene su forma particular de organizar los bloques de programación y en el caso del software Cura, utilizando el firmware Marlin, los bloques están compuestos de la siguiente manera:

```
G00 F240.0 X10.0 Y20.0 Z5.0 E3.0 M00 S0000
```


La descripción de cada uno de los elementos se presenta a continuación:

G00 → Comando preparatorio.

F240.0 → Comando de velocidad.

X10.0 → Posición absoluta o relativa en el eje X.

Y20.0 → Posición absoluta o relativa en el eje Y.

Z5.0 → Posición absoluta o relativa en el eje Z.

E3.0 → Longitud a extruir en mm

M00 → Comando misceláneo.

S0000 → Comando de temperatura.

Los comandos preparatorios, llamados códigos G, se utilizan para definir la forma en la que se llevaran a cabo los movimientos el equipo y las condiciones de funcionamiento bajo las que operara el equipo (unidades de medida utilizadas, posicionamiento relativo, posicionamiento absoluto, entre otros).

El comando de velocidad representa la velocidad a la que se realizaran los movimientos del equipo. Si se usa el comando G20 las unidades son in/min y si se usa el comando G21 las unidades son mm/min.

Los comandos misceláneos, llamados códigos M, son los encargados de activar o desactivar las funciones del equipo, como por ejemplo el calentamiento del cabezal y el funcionamiento del ventilador.

El comando de temperatura indica el valor que deberá alcanzar el sistema de calentamiento en °C.

Existe una gran cantidad de códigos G y M como para realizar una explicación detallada de todos ellos por lo que, en la **Tabla 4.1**, se muestran los códigos principales que utiliza el software Cura con la operación que representan cada uno de ellos. Todos los códigos adicionales se pueden encontrar explicados detalladamente accediendo al siguiente enlace: <http://reprap.org/wiki/G-code/es>.

Tabla 4.1 Códigos principales del software de control Cura⁷⁶.

Código	Operación
G0 y G1	Mueve los componentes del equipo a la posición que indican los valores de posición X, Y y/o Z.
G20	Establece las unidades en pulgadas.
G21	Establece las unidades en milímetros.
G90	Establece que las indicaciones de posición son absolutas.
G91	Establece que las indicaciones de posición son relativas.
G28	Mueve los componentes del equipo al origen de cada eje.
G92	Establece un nuevo origen absoluto para los ejes.
M107	Apaga el ventilador asignado.
M109	Establece la temperatura del sistema de calentamiento en °C y espera hasta que el sistema la alcance.
M117	Muestra el mensaje indicado en una pantalla LCD.
M190	Establece la temperatura de la base calentada (en el caso de tenerla) en °C y espera hasta que el sistema la alcance.
M104	Establece la temperatura del sistema de calentamiento en °C y continua con la siguiente operación.
M140	Establece la temperatura de la base calentada (en el caso de tenerla) en °C y continua con la siguiente operación.

Una vez que se ha explicado que es, para que sirve, y como se escribe un Gcode se procede con la modificación del **Start/End-Gcode** del software de control Cura.

```

;Sliced at: {day} {date} {time}
;Basic settings: Layer height: {layer_height} Walls: {wall_thickness} Fill: {fill_density}
;Print time: {print_time}
;Filament used: {filament_amount}m {filament_weight}g
;Filament cost: {filament_cost}
;M190 S{print_bed_temperature} ;Uncomment to add your own bed temperature line
;M109 S{print_temperature} ;Uncomment to add your own temperature line
G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M82 ;set extruder to absolute mode
M107 ;start with the fan off
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
G28 Z0 ;move Z to min endstops
G1 Z15.0 F{travel_speed} ;move the platform down 15mm
G92 E0 ;zero the extruded length
G1 F200 E3 ;extrude 3mm of feed stock
G92 E0 ;zero the extruded length again
G1 F{travel_speed}
;Put printing message on LCD screen
M117 Printing...

```

Figura 4.9 Start Gcode por defecto del software de control Cura.

Fuente: Propia

⁷⁶ <http://reprap.org/wiki/G-code/es>

En el caso del Start Gcode (**Figura 4.9**) se eliminan los bloques que contienen el comando E, y se modifica la distancia que baja el bloque de desplazamiento vertical. La modificación de la distancia que baja el bloque de desplazamiento vertical depende del espesor del material que se vaya a cortar y para el caso de una lámina de 10mm de espesor este debe ser de 40mm.

```

;Basic settings: Layer height: {layer_height} Walls: {wall_thickness} Fill: {fill_density}
;Print time: {print_time}
;Filament used: {filament_amount}m {filament_weight}g
;Filament cost: {filament_cost}
;M190 S{print_bed_temperature} ;Uncomment to add your own bed temperature line
;M109 S{print_temperature} ;Uncomment to add your own temperature line
G21 ;metric values
G90 ;absolute positioning
M107 ;start with the fan off
G28 X0 Y0 ;move X/Y to min endstops
G28 Z0 ;move Z to min endstops
G1 Z40.0 F{travel_speed} ;move the platform down 40mm
G1 F{travel_speed}
;Put printing message on LCD screen
M117 Printing...

```

Figura 4.10 Start Gcode modificado para el equipo de manufactura aditiva.

Fuente: Propia

En el End Gcode (**Figura 4.11**) se deben eliminar los bloques que contienen el comando E y se debe aumentar un bloque que introduzca la operación de bajar el bloque de desplazamiento vertical antes de que el cabezal se desplace hacia los interruptores de fin de carrera. El bloque agregado tiene la función de evitar que el elemento de corte choque con los componentes del bloque de desplazamiento vertical y que atraviese la lámina de EPS en lugares no deseados. Al igual que en el caso del **Start Gcode**, el valor que debe bajar el bloque de desplazamiento depende del espesor de la lámina que se vaya a cortar. Para la lámina de 10mm el valor debe ser de 40mm

```

;End GCode
M104 S0           ;extruder heater off
M140 S0           ;heated bed heater off (if you have it)
G91              ;relative positioning
G1 E-1 F300       ;retract the filament a bit before lifting the nozzle, to
G1 Z+0.5 E-5 X-20 Y-20 F{travel_speed} ;move Z up a bit and retract filament even more
G28 X0 Y0         ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the way
M84              ;steppers off
G90              ;absolute positioning
;{profile_string}

```

Figura 4.11 End Gcode por defecto del software de control Cura.

Fuente: Propia

```

;End GCode
M104 S0           ;extruder heater off
M140 S0           ;heated bed heater off (if you have it)
G91              ;relative positioning
G0 Z40.000        ;move down the plataforma 40mm
G28 X0 Y0         ;move X/Y to min endstops, so the head is out of the way
M84              ;steppers off
G90              ;absolute positioning
;{profile_string}

```

Figura 4.12 End Gcode modificado para el equipo de manufactura aditiva.

Fuente: Propia

Con la modificación del **Start/End-Gcode** (**Figura 4.10 y 4.12**) se termina la configuración del software de control del equipo, sin embargo, este no es el único lugar donde se deberá manejar el Gcode ya que al ingresar un objeto 3D al software Cura, y antes de llevar a cabo el proceso de corte, se debe revisar el Gcode generado por el software para fabricar el objeto y llevar a cabo las modificaciones necesarias.

4.2 CREACIÓN DE MODELOS 3D

El software de control Cura admite archivos 3D con extensiones .STL .OBJ .DAE y .AMF siendo el primero el formato soportado por casi cualquier software de diseño 3D y el de uso standard a nivel industrial. Partiendo de esta consideración se decide trabajar preferentemente con este tipo de archivos.

Los archivos .STL que se utilizaran en el equipo de manufactura aditiva se pueden obtener por dos métodos:

- Descargar los modelos disponibles en librerías online como <http://www.thingiverse.com> o <https://www.youmagine.com/>.
- Crear los modelos utilizando programas de modelado 3D que permitan guardar los archivos en formato .STL.

Hay que considerar que los archivos descargados de librerías deben pasar por un proceso de seccionamiento que permita obtener las capas que formarán el sólido antes de poder ser usados en Cura. Esto se debe al principio de funcionamiento del equipo de manufactura aditiva. El proceso de seccionamiento se lleva a cabo en programas de modelado 3D.

Para llevar a cabo el proceso de creación de modelos 3D existe una gran cantidad de programas de modelado 3D y estos pueden ser agrupados en dos categorías: programas para diseño gráfico (aplicaciones artísticas) y programas para diseño industrial (aplicaciones de ingeniería). El presente trabajo utilizará el programa de modelado 3D Autodesk Inventor 2014 el cual pertenece a los programas para diseño industrial. Sin embargo, se puede utilizar cualquier programa que permita crear archivos .STL. El programa Autodesk Inventor es uno de los más utilizados en la rama de la Ingeniería Mecánica y permite obtener modelos 3D complejos rápidamente. El proceso de creación de modelos 3D es el siguiente:

- Crear un nuevo archivo de parte .ipt en Autodesk Inventor. Se trabajara preferentemente con archivos Standard (mm).ipt.
- Crear los bocetos que nos permitirán construir el sólido.
- Obtener el modelo 3D del objeto que se desee fabricar (**Figura 4.13**).

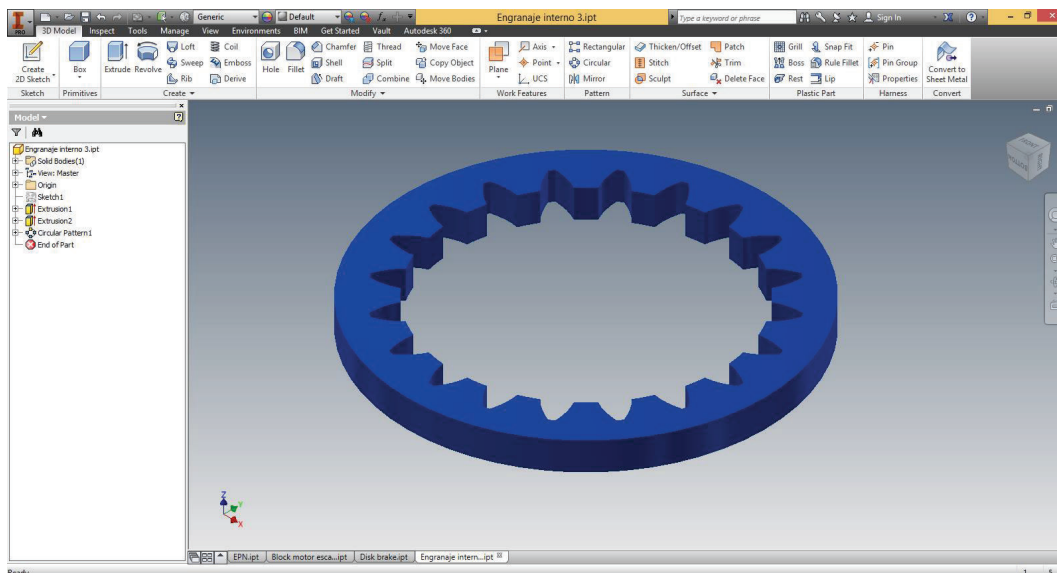


Figura 4.13 Ejemplo de modelo 3D creado en Autodesk Inventor 2014.

Fuente: Propia

4.3 SECCIONAMIENTO DE MODELOS Y GENERACIÓN DEL GCODE

El principio de manufactura aditiva, como se mencionó en la sección 1.3.2, consiste en fabricar objetos mediante la unión de varias capas de material una sobre otra. En el caso del equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS las capas que serán unidas para formar el modelo 3D se obtienen al cortar perfiles en láminas de EPS de un espesor definido. Los perfiles de corte requeridos se obtienen al aplicar un proceso de seccionamiento a los modelos 3D, y las instrucciones que permiten que la máquina siga estos perfiles y realice los cortes en el EPS se obtienen al generar el Gcode correspondiente. Considerando las limitaciones que se presentan al no tener un software específicamente diseñado para el equipo y su principio de funcionamiento, se evaluaron tres métodos de seccionamiento y generación del Gcode empleando distintos paquetes computacionales disponibles. Estos métodos, con sus ventajas y desventajas, se explican a continuación.

4.3.1 SECCIONAMIENTO CON SOFTWARE INVENTOR Y GENERACIÓN CON SOFTWARE CURA

Este método consiste en utilizar las opciones del software Inventor para seccionar modelos 3D, creados en el mismo software o importados de otras fuentes, y el software Cura para generar individualmente el Gcode de las capas obtenidas.

Ventajas

- Permite ubicar las capas obtenidas en un mismo plano, de tal manera que se puedan cortar varias capas utilizando un solo archivo Gcode modificado y una sola lámina de EPS. Esto se traduce en un ahorro de material y optimización del procedimiento de corte. Esta ventaja se puede aprovechar siempre y cuando las capas puedan ser acomodadas dentro de las dimensiones de la lámina (500x500mm).
- Se pueden seccionar modelos 3D con capas de espesor variable.
- No presenta mayores complicaciones al trabajar con capas que tienen perforaciones internas.
- Las capas pueden ser ubicadas y movidas fácilmente en el área de trabajo del software Cura según las necesidades particulares del proceso de corte.

Desventajas

- El seccionamiento consume un tiempo considerable que aún requiere cierto grado de automatización.
- No existen mayores posibilidades de automatización para el proceso de seccionamiento.

El método de seccionamiento con Inventor y generación con Cura es el siguiente:

- Abrir el modelo 3D en Inventor, crear un plano con el comando **Offset from plane** cuya distancia a la base del objeto sea igual al espesor de las láminas de EPS que se van a utilizar.

- Utilizar el comando **Split**.
- Seleccionar la opción **Split solid**.
- Seleccionar el plano creado en el primer paso como **Split tool**.
- Seleccionar **Apply** (Figura 4.14).

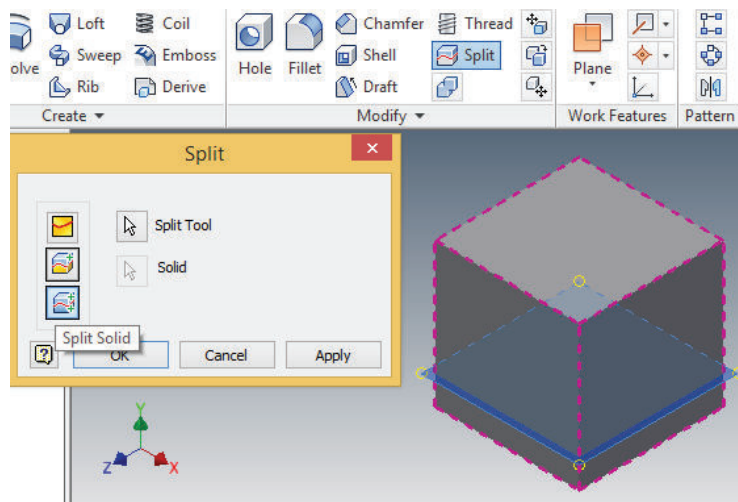


Figura 4.14 Primera etapa del proceso de seccionamiento del modelo 3D en Autodesk Inventor.

Fuente: Propia

Después de seccionar el sólido se debe separar los dos cuerpos obtenidos. Para esto se aplica el siguiente procedimiento:

- Utilizar el comando **Move bodies**.
- Seleccionar el cuerpo de mayor tamaño.
- Ingresar los valores de offset que permitan ubicar el cuerpo a la misma altura que el cuerpo base pero sin interceptarse con el mismo.
- Seleccionar **Apply** (Figura 4.15).

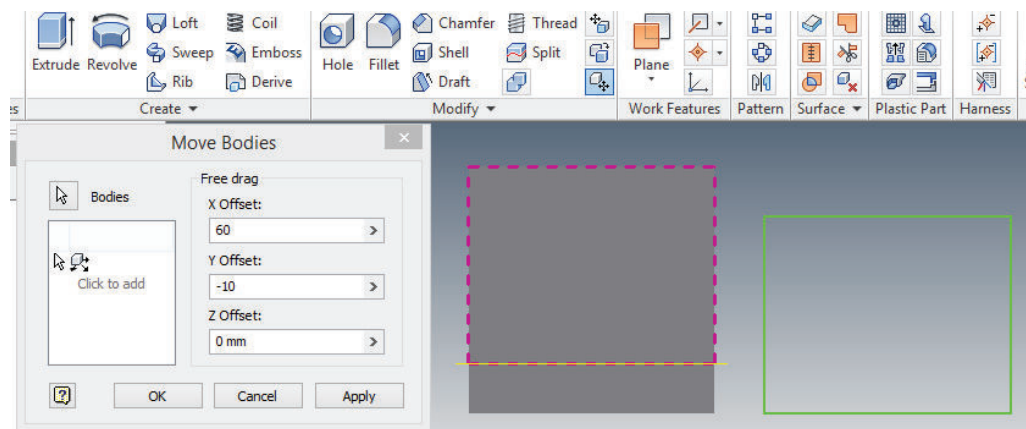


Figura 4.15 Segunda etapa del proceso de seccionamiento del modelo 3D en Autodesk Inventor.

Fuente: Propia

Para continuar el proceso se debe repetir los pasos descritos anteriormente hasta seccionar el objeto completamente y obtener todas las capas del espesor de las láminas de EPS que se van a utilizar en el equipo. La **Figura 4.16** muestra, a manera de ejemplo, las capas obtenidas al seccionar un modelo 3D de un cubo en 5 capas de 10mm de espesor.

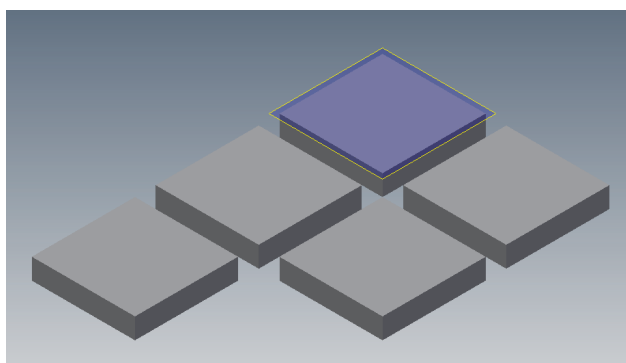


Figura 4.16 Ejemplo de modelo 3D seccionado en 5 capas de 10mm de espesor.

Fuente: Propia

Una vez que el modelo ha sido seccionado, se exporta el archivo a formato .STL seleccionando la opción **Export** en el menú de Inventor y **CAD format** en el menú desplegado. En la ventana que se despliega se debe cambiar el tipo de archivo a **STL Files (*.stl)**, asignar un nombre y ubicación, y finalmente guardar el archivo.

En el caso de obtener varias secciones de gran tamaño que no puedan ser ubicadas en el área de trabajo como un solo archivo (**Figura 4.17**), estas deberán ser guardadas por separado en archivos .STL individuales. Para llevar a cabo este procedimiento se debe definir la sección que se va a exportar a formato STL y deshabilitar la visibilidad del resto de secciones utilizando los comandos de Inventor (**Figura 4.18**). Una vez que se tiene únicamente la sección deseada se sigue el procedimiento de exportación. Este procedimiento se repite para obtener el archivo STL de cada una de las secciones que conforman el modelo 3D.

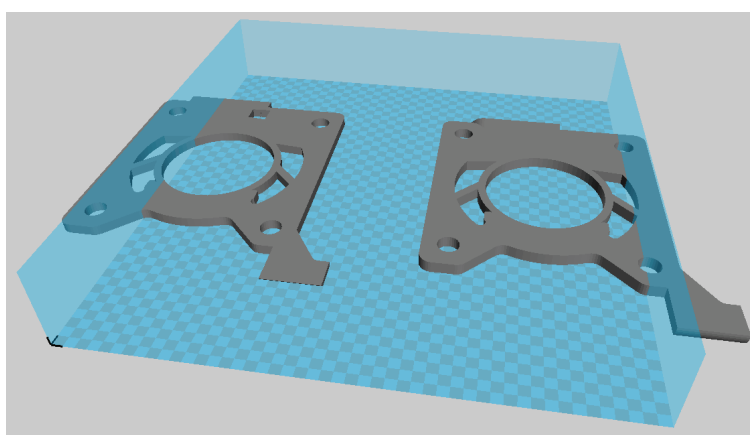


Figura 4.17 Ejemplo de secciones de gran tamaño que no pueden ser cortadas simultáneamente.

Fuente: Propia

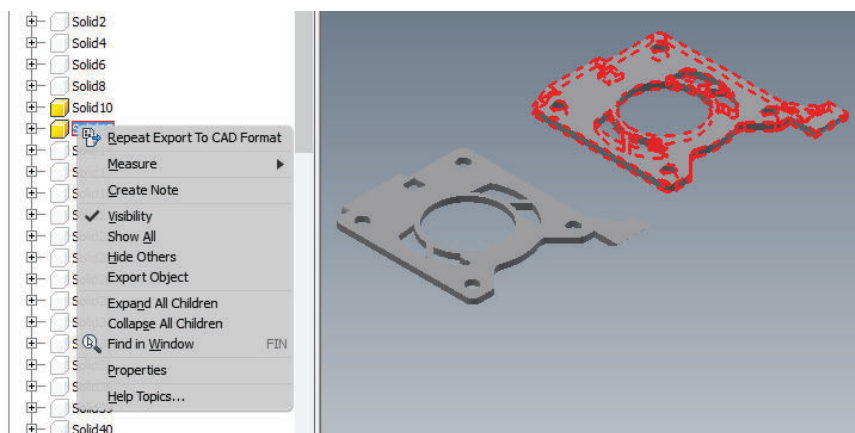


Figura 4.18 Ejemplo del procedimiento de deshabilitación de secciones.

Fuente: Propia

El siguiente paso es abrir el archivo en Cura para así poder generar y modificar el Gcode que se utilizara en el proceso de corte. Al abrir el archivo se observa que el

modelo 3D aparece en el área de trabajo pero no siempre está ubicado en la forma requerida o deseada. Para solucionar este problema se utilizan los comandos de posicionamiento que tienen Cura (**Figura 4.19**). Estos comandos nos permiten girar, escalar y cambiar el sentido del modelo. Adicionalmente se puede mover el modelo sobre el área de trabajo simplemente arrastrándolo con el mouse. Esta función nos permite distribuir los modelos en el caso de que se vaya a trabajar con más de uno a la vez.



Figura 4.19 Iconos para activar los comandos de posicionamiento del software Cura.

Fuente: Propia

Para observar el modelo 3D como sólido se debe tener seleccionado el modo de visualización normal (**Figura 4.20**).



Figura 4.20 Modos de visualización del software Cura.

Fuente: Propia

Con el modelo ubicado en la posición deseada se procede a generar el Gcode (**Figura 4.21**). Para esto se debe seleccionar **File** en la barra de menús y **Save**

Gcode en el menú desplegado. El archivo que se obtiene es de tipo .gcode y puede abrirse utilizando el bloc de notas.

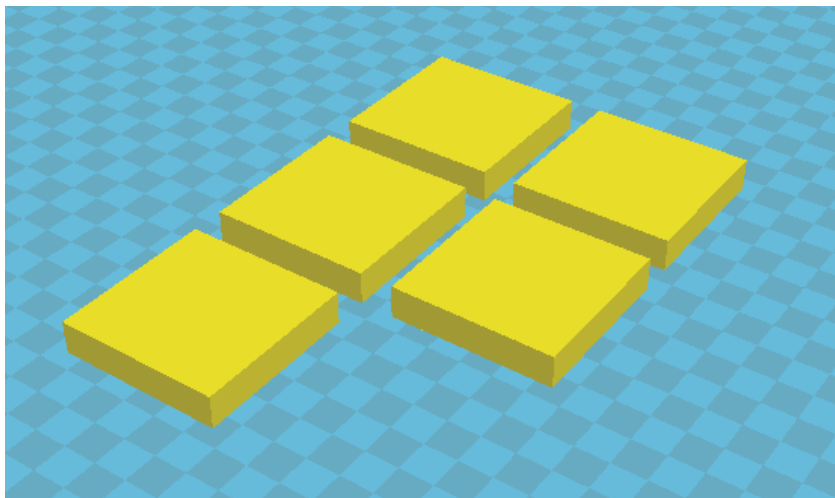


Figura 4.21 Modelo 3D ubicado en el área de trabajo del software Cura.

Fuente: Propia

4.3.2 SECCIONAMIENTO CON SOFTWARE CREATION WORKSHOP Y GENERACIÓN CON SOFTWARE MATLAB

Este método consiste utilizar el software Creation Workshop para seccionar el modelo 3D, y las herramientas de los softwares Matlab y Excel para generar el Gcode.

Ventajas

- Con los conocimientos y el desarrollo adecuado se puede llegar a automatizar completamente el procedimiento de seccionamiento y generación del Gcode.
- El método está orientado a desarrollar un procedimiento de ensamble automático de los modelos.
- Facilidad de generación de los modelos cuyas secciones tienen una forma convexa.

Desventajas

Todas las desventajas que se mencionan a continuación se deben al estado de desarrollo actual de este método y podrían ser superadas al realizar un proyecto de implementación del mismo.

- Consume una gran cantidad de tiempo para generar los Gcode debido a los múltiples programas que se deben utilizar.
- La generación del Gcode requiere una gran intervención del usuario.
- Este procedimiento es aplicable solamente para secciones sin perforaciones.
- El procedimiento es aplicable únicamente para cuerpos cuyas secciones sean convexas.
- Los Gcodes son generados con el mismo origen, lo que es útil para la generación de partes cuyas secciones ocupen toda el área de impresión. Sin embargo, se deberá cambiar constantemente el material para las secciones que ocupen únicamente una parte pequeña de la plancha de corte. El procedimiento es directo para el caso de secciones constantes. Sin embargo, se debe analizar otro procedimiento como el descrito en la sección 4.3.1 para secciones de espesor variable.

El método de seccionamiento con Creation Workshop y generación con Matlab es el siguiente:

- Abrir el modelo 3D, guardado en formato STL, en el software Creation Workshop.
- Configurar las opciones de seccionamiento según lo requerido (**Figura 4.22**).
- Utilizar la herramienta de seccionamiento del software Creation Workshop (**Figura 4.23**).

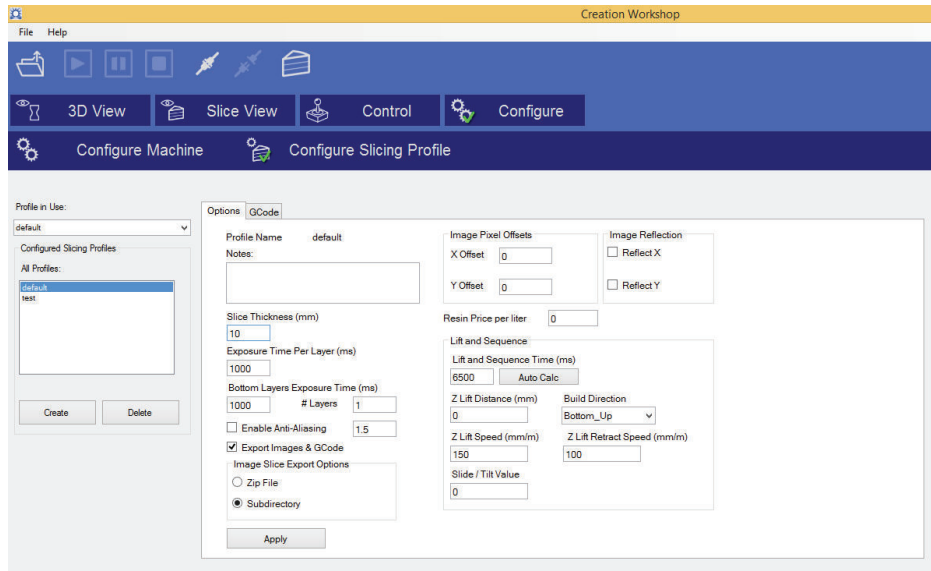


Figura 4.22 Ventana de configuración del software Creation Workshop.

Fuente: Propia

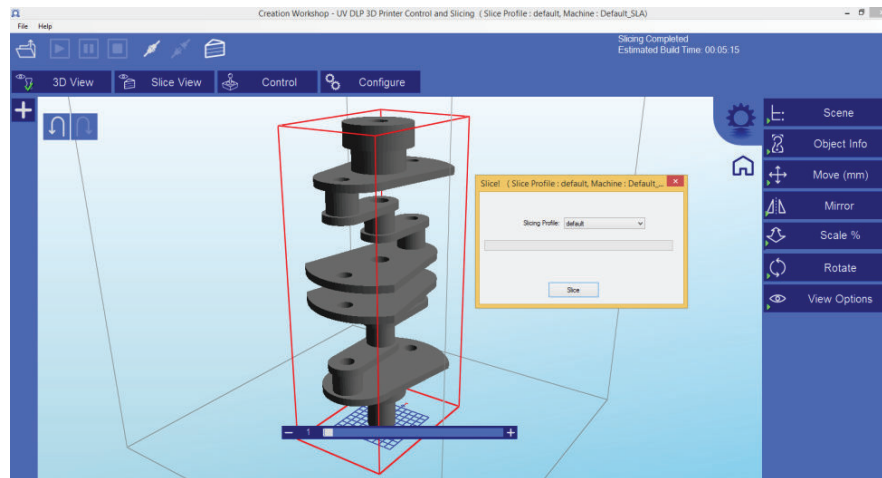


Figura 4.23 Ventana de seccionamiento de un modelo 3D.

Fuente: Propia

Como resultado del proceso de seccionamiento el software Creation Workshop entrega una carpeta que contiene un conjunto de imágenes en blanco y negro, con extensión .PNG, que representan las capas del modelo 3D (Figura 4.24). Las secciones del objeto se presentan en color blanco en un fondo negro.



Figura 4.24 Carpeta con las imágenes de las secciones generadas con el software Creation Workshop.

Fuente: Propia

El siguiente paso consiste en utilizar un programa creado en Matlab para obtener las coordenadas de los puntos que conforman el perfil de cada capa del modelo 3D. Este programa tiene la función de calcular y mostrar los puntos, en forma de coordenadas XY, que conforman el contorno convexo de los objetos encontrados en una imagen binaria⁷⁷. Una imagen binaria es aquella en la que sus píxeles solo tienen un valor de dos posibles, uno para el color blanco y cero para el color negro. De esta manera, los píxeles correspondientes al objeto tomarán el valor de 1 y los del fondo tomarán el valor de cero. Un ejemplo de imágenes binarias son las imágenes en blanco y negro obtenidas del software Creation Workshop.

El procedimiento para la obtención de las coordenadas es el siguiente:

- Ingresar al software Matlab y abrir la carpeta que contiene las imágenes del modelo 3D.
- Abrir la imagen de la primera capa y asignarle un nombre de variable utilizando el comando `imread`. Por ejemplo, el comando siguiente almacena la imagen (`Skyrim0000.png`) como un arreglo de nombre `A` con tres valores para cada

⁷⁷ (Cuevas, Zaldívar, & Pérez, 2010, págs. 422-425)

pixel. Los tres valores se debe a que la imagen no es una imagen binaria y MATLAB utiliza el estándar RGB (red, Green, blue) por defecto.

```
A=imread('Skyrim0000.png');
```

- Transformar la matriz inicial en una matriz que contenga solamente valores de 0 y 1 utilizando el comando `im2bw`. El siguiente comando es un ejemplo que almacena el arreglo `A` con valores 0 y 1 como un arreglo `B`.

```
B=im2bw(A);
```

- Ejecutar en Matlab un programa que nos entregue las coordenadas de los puntos que conforman el contorno de la imagen (**Figura 4.25 y 4.26**). A continuación se muestra un ejemplo del programa mencionado:

```
L=bwlabel(B,8);
idx=max(max(L));
H=regionprops(L,'ConvexHull');
Im=B;
imshow(Im);
hold on
for o=1:idx
x=H(o).ConvexHull(:,1);
y=H(o).ConvexHull(:,2);
plot(x,y,'ob')
end
```

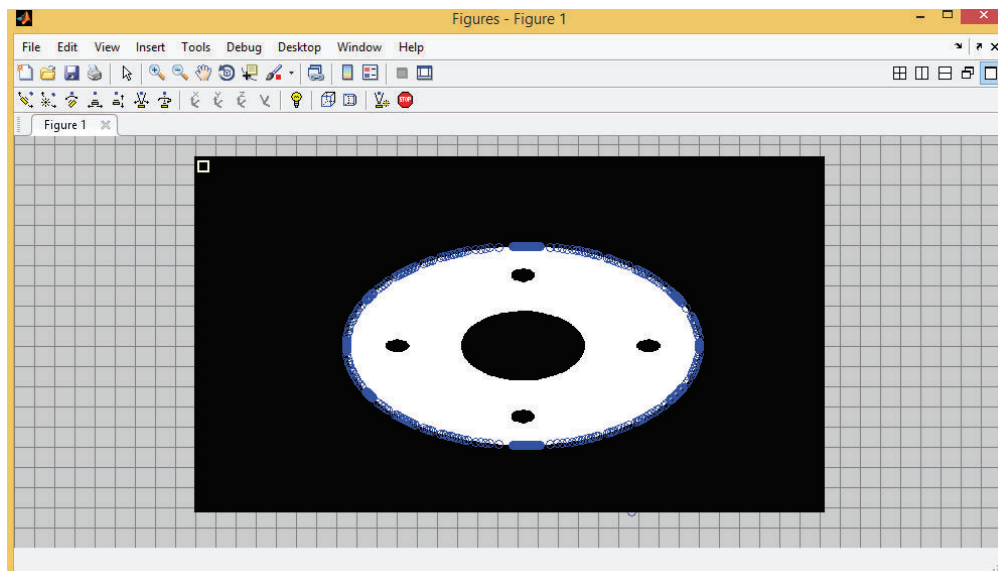


Figura 4.25 Imagen obtenida en Matlab con los puntos de contorno en color azul.

Fuente: Propia

Como resultado se obtiene un archivo que contiene las coordenadas XY ubicadas en dos columnas distintas.

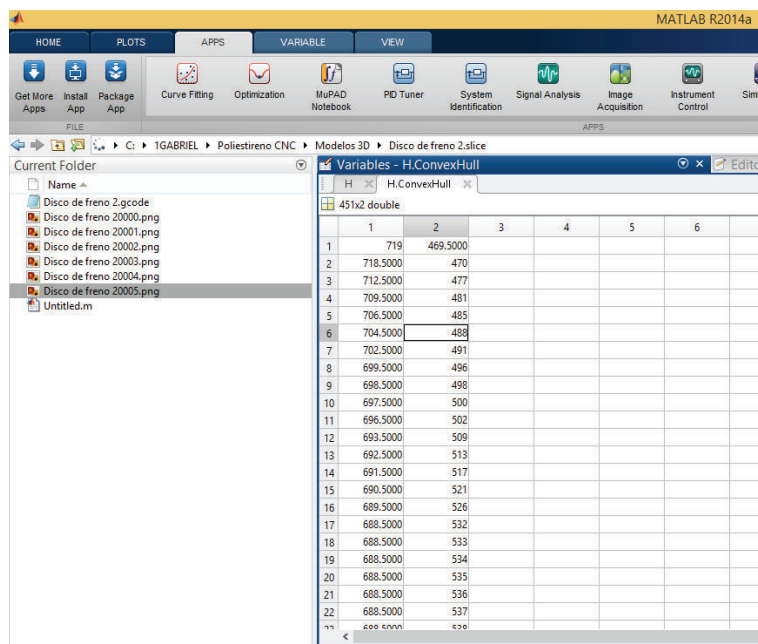


Figura 4.26 Columnas que contienen las coordenadas XY de la capa del modelo 3D.

Fuente: Propia

A continuación se debe utilizar las coordenadas obtenidas en Matlab para crear un archivo Gcode que tenga la forma admitida por el software de control Cura. El procedimiento es el siguiente:

- Copiar las columnas que representan las coordenadas XY del perfil en una hoja de cálculo de Excel.
- Unir las columnas, agregar los comandos de movimiento (G0) y velocidad (Fxxxx), utilizando el comando concatenar; agregar la identificación de coordenadas (X, Y, Z). Posteriormente es necesario incluir el Start Gcode y el End Gcode utilizando las funciones y herramientas de Excel (**Figura 4.27**).

Finalmente se debe copiar el Gcode generado en un archivo de bloc de notas y guardarlo para ser usado en el software de control Cura.

The screenshot shows the Microsoft Excel interface. The formula bar for cell E2 contains the formula: `=CONCATENAR("G0"," ",C2," ","X",A2," ","Y",B2," ",D2)`. The spreadsheet data is as follows:

	A	B	C	D	E
1	X	Y	Velocidad	Desplazamiento vertical	Comandos Gcode
2	719.000	469.500	F1800	Z10,000	G0 F1800 X719 Y469.5 Z10,000
3	718.500	470.000	F240		G0 F240 X718.5 Y470
4	712.500	477.000			G0 X712.5 Y477
5	709.500	481.000			G0 X709.5 Y481
6	706.500	485.000			G0 X706.5 Y485
7	704.500	488.000			G0 X704.5 Y488

Figura 4.27 Generación del Gcode utilizando Excel.

Fuente: Propia

4.3.3 SECCIONAMIENTO Y GENERACIÓN CON SOFTWARE CURA

Este método consiste en realizar el procedimiento de seccionamiento y generación del Gcode simultáneamente utilizando las opciones del software Cura.

Ventajas

- Se utiliza el mismo software para ambos procedimientos.
- El proceso de seccionamiento es más rápido y simple que los anteriores.
- Este método se puede emplear en el desarrollo de un procedimiento de ensamble automático de los modelos.
- Se genera un solo archivo que contiene las instrucciones para la fabricación de todas las capas del modelo 3D.
- Se puede ubicar el modelo 3D en el área de trabajo a conveniencia del usuario.

Desventajas

- Los Gcodes son generados con el mismo origen, lo que es útil para la generación de partes cuyas secciones ocupen toda el área de impresión. Sin

embargo, se deberá cambiar constantemente el material para las secciones que ocupen únicamente una parte pequeña de la plancha de corte.

- Las instrucciones de cada capa se deben separar en archivos individuales y se deben agregar el Start Gcode y End Gcode.
- No se puede obtener secciones de espesor variable en un mismo modelo 3D.

El método de seccionamiento y generación con Cura es el siguiente:

- Abrir el modelo 3D de formato STL en el área de trabajo del software Cura y ubicarlo (**Figura 4.28**).

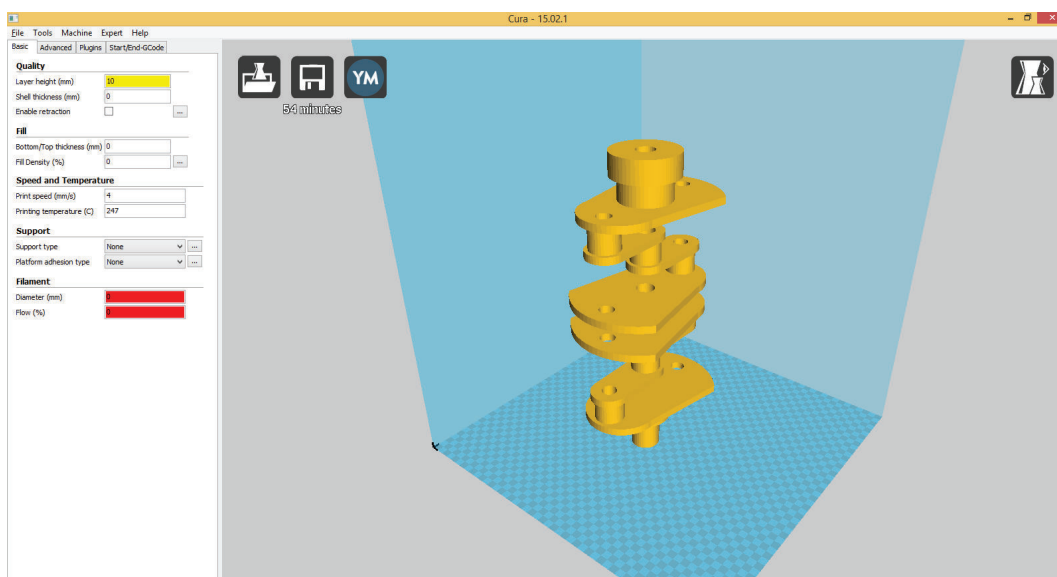


Figura 4.28 Modelo 3D ubicado en el software de control Cura.

Fuente: Propia

- Ingresar a **Machine settings** y cambiar el valor de **Maximum height (mm)** por un valor superior a la altura del modelo 3D.
- Ingresar el valor del espesor de las capas en la opción **Layer height** del software Cura.
- Seleccionar **File** en la barra de menús y **Save Gcode** en el menú desplegado.
- Abrir el Gcode generado utilizando el Block de notas.
- Identificar las distintas capas del modelo 3D. Para esto se debe buscar las líneas que identifican y separan a cada capa con la línea **Layer:** (**Figura 4.29**).

```

G1 Z40.0 F1800 ;move the platform down 40mm
G1 F1800
;Put printing message on LCD screen
M117 Printing...

;Layer count: 43 ;Número de capas totales del modelo 3D
;LAYER:0 ;Identificación de la primera capa del modelo 3D
M107
G0 F1800 X224.680 Y227.145 Z10.000
;TYPE:WALL-OUTER
G0 F240 X222.680 Y230.000
G0 X221.207 Y233.160
G0 X220.304 Y236.528
G0 X220.000 Y240.000
G0 X220.304 Y243.472
G0 X221.207 Y246.840
G0 X222.680 Y250.000
G0 X227.814 Y237.219
G0 X228.738 Y234.577
G0 X230.228 Y232.207
;LAYER:1 ;Identificación de la segunda capa del modelo 3D
G0 F1800 X230.228 Y232.207 Z20.000
;TYPE:WALL-OUTER
G0 F240 X232.207 Y230.228
G0 X232.207 Y230.228

```

Figura 4.29 Ejemplo de Gcode que muestra la identificación de las capas al utilizar el método de seccionamiento y generación con Cura.

Fuente: Propia

- Cortar y pegar las líneas correspondientes a cada capa en un archivo de bloc de notas distinto.
- Agregar el Star Gcode y el End Gcode en todos los archivos creados.
- Guardar los archivos de cada capa.

Debido a las características de ahorro de material y optimización del proceso de corte, así como por su simplicidad, se decidió utilizar el método de seccionamiento con Inventor y generación con Cura para fabricar los modelos del presente trabajo.

4.4 MODIFICACIÓN DEL GCODE

En el caso de los métodos que utilizan Inventor y Cura se requiere efectuar modificaciones a los Gcodes obtenidos. Las modificaciones que se requieren efectuar al Gcode generado son menores y se deben a que este software prepara instrucciones para un procedimiento de impresión 3D y no para un proceso de corte.

Las modificaciones del Gcode consisten en cambiar y agregar ciertos bloques de instrucciones que, de no ser modificados, harían que el elemento de corte pase a través de las láminas de EPS en lugares donde no debe hacerlo. Las modificaciones también son necesarias para permitir al equipo cumpla con la especificación de realizar perforaciones internas sin cortar a través del EPS. La **Figura 4.30** muestra un ejemplo del camino que seguiría el elemento de corte antes de realizar las modificaciones del Gcode. Para acceder a esta vista se debe cambiar el modo de visualización a **Layers**.

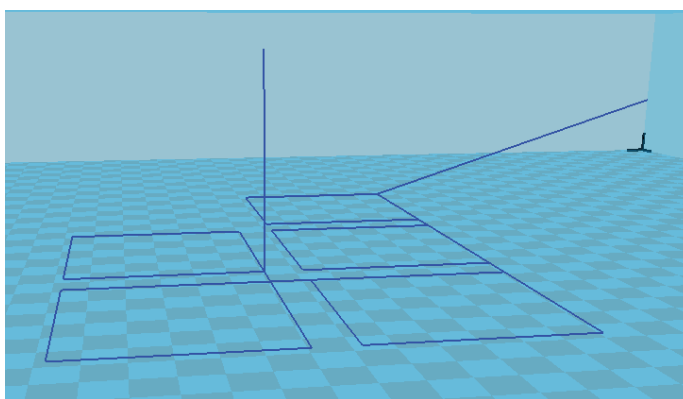


Figura 4.30 Ejemplo de perfil de corte antes de modificar el Gcode.

Fuente: Propia

El procedimiento de modificación empieza por abrir el archivo .gcode generado por Cura y visualizar los bloques de instrucciones del mismo. A continuación se deben encontrar todos los bloques que contienen el código F1800 para lo cual se utiliza la herramienta de búsqueda del block de notas (Presionar **ctrl+B** en el block de notas). Las modificaciones que se debe realizar en estos bloques involucran a los movimientos del equipo en el eje Z y son las siguientes:

- En la primera línea del procedimiento de corte se debe separar el indicador de posición en Z, crear un bloque separado para este movimiento y cambiar el valor de esta coordenada por el valor adecuado (**Figura 4.31**). Este valor depende del espesor de la lámina que se va a utilizar siendo de 8.000 para láminas de 10mm de espesor y de 18.000 para láminas de 20mm de espesor.

<pre> M117 Printing... ;Layer count: 1 ;LAYER:0 M107 G0 F1800 X121.318 Y78.970 Z8.000 ;TYPE:WALL-OUTER G0 F240 X125.933 Y76.220 G0 X130.759 Y73.861 </pre>	<pre> M117 Printing... ;Layer count: 1 ;LAYER:0 M107 G0 F1800 X121.318 Y78.970 G0 F1800 Z8.000 ;TYPE:WALL-OUTER G0 F240 X125.933 Y76.220 G0 X130.759 Y73.861 </pre>
--	---

Figura 4.31 Comparación entre la primera línea del procedimiento de corte original y modificada.

Fuente: Propia

- En cada bloque que se encuentre F1800, excepto el último, se debe crear un bloque antes que lleve a cabo un movimiento a la posición Z40.000 y un bloque después que lleve a cabo un movimiento a la posición Z establecida en la primera línea del procedimiento de corte.

<pre> G0 X112.846 Y85.564 G0 X116.946 Y82.092 G0 X121.318 Y78.970 G0 F1800 X81.705 Y70.926 G0 F240 X82.223 Y70.529 G0 X82.826 Y70.279 G0 X83.473 Y70.194 </pre>	<pre> G0 X116.946 Y82.092 G0 X121.318 Y78.970 G0 F1800 Z40.000 G0 F1800 X81.705 Y70.926 G0 F1800 Z8.000 G0 F240 X82.223 Y70.529 G0 X82.826 Y70.279 </pre>
---	---

Figura 4.32 Comparación entre un bloque original y los bloques modificados.

Fuente: Propia

- Asegurarse de que la última línea del Gcode, antes de empezar el **End Gcode**, contenga una instrucción de movimiento a las mismas coordenadas XY de la penúltima línea y un desplazamiento vertical superior a la posición Z establecida en la primera línea del procedimiento de corte (**Figura 4.33**).

```

G0 X105.461 Y126.540
G0 X105.809 Y126.509
G0 F1800 X105.809 Y126.509 Z435.000
;End GCode
M104 S0 ;extruder heater off
M140 S0 ;heated bed heater off (if you have it)

```

Figura 4.33 Línea final del Gcode que debe ser borrada.

Fuente: Propia

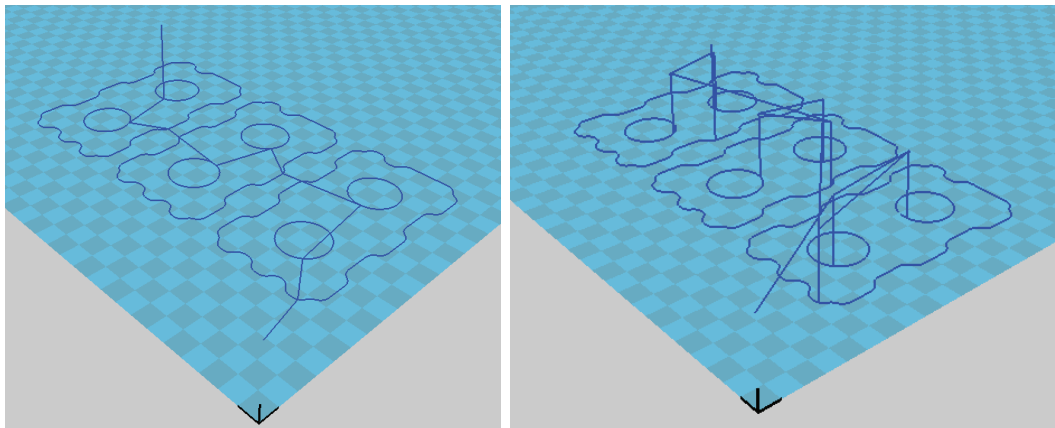


Figura 4.34 Comparación antes y después de las modificaciones para objetos con perforaciones internas.

Fuente: Propia

En el caso de capas que tienen perforaciones internas se debe realizar un cambio adicional. La modificación consiste en identificar las líneas del Gcode que corresponden a las perforaciones internas y moverlas al inicio del código, dejando que los comandos de corte para los perfiles externos sean llevados a cabo después de los perfiles internos. Esta modificación se requiere ya que si se realiza el corte con el Gcode sin modificar, la capa cortada se desprenderá de la lámina antes de realizar los cortes internos.

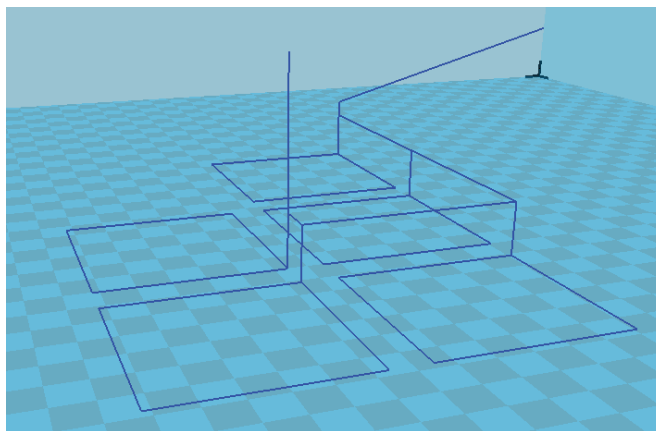


Figura 4.35 Ejemplo de perfil de corte después de modificar el Gcode.

Fuente: Propia

Una vez que se han realizado todas las modificaciones necesarias se guardan los cambios y se tiene el archivo .gcode listo ser abierto en Cura y llevar a cabo el proceso de corte. Es importante que, antes de abrir el archivo .gcode, el área de trabajo no tenga abiertos archivos .STL o .gcode no necesarios. Para dejar limpia el área de trabajo se debe seleccionar la opción **File** en la barra de menús y **Clear platform** en el menú desplegado. La **Figura 4.35** muestra el perfil de corte resultante al modificar el Gcode que se observó en la **Figura 4.30**.

4.5 PRUEBAS Y CALIBRACIÓN

Con el software de control configurado, conociendo como se crean los modelos 3D, y con la explicación de cómo generar y modificar los Gcode para realizar el proceso de corte; el equipo de manufactura aditiva está listo para ser sometido a las pruebas y calibración.

Las pruebas del equipo son las actividades realizadas para comprobar que el equipo cumple con las especificaciones para las cuales fue diseñado (**Tabla 2.1**) y definir el elemento de corte que utilizara el equipo. Con el elemento de corte seleccionado, se lleva a cabo las pruebas para determinar los parámetros que permitirán realizar el procedimiento de corte correctamente. La calibración por otro lado consiste en definir los ajustes y/o procedimientos que permitan fabricar las capas según las dimensiones requeridas para ensamblar correctamente los modelos de EPS que se van a utilizar en el proceso de fundición LFC.

Para llevar a cabo las pruebas y calibración, y de manera general cualquier proceso de corte en el equipo, se deben seguir los siguientes pasos:

- Limpiar al área de trabajo del software de control Cura.
- Abrir el Gcode modificado en el software Cura utilizando el botón de acceso rápido para cargar archivos (**Figura 4.1**).
- Conectar el equipo a la computadora.
- Encender el equipo y la fuente de poder del ventilador.
- Colocar la lámina de EPS.

- Verificar la alineación del elemento de corte.
- Presionar el botón de inicio de corte en el software (**Figura 4.37**).
- En la ventana de control (**Figura 4.36**), presionar **Print** y cuando empiece a subir la temperatura presionar **Cancel**.
- Seguir el proceso de calentamiento y, una vez que la temperatura registrada supere a la temperatura programada para el proceso de corte, volver a presionar **Print**.
- Observar que el proceso de corte se realice correctamente.

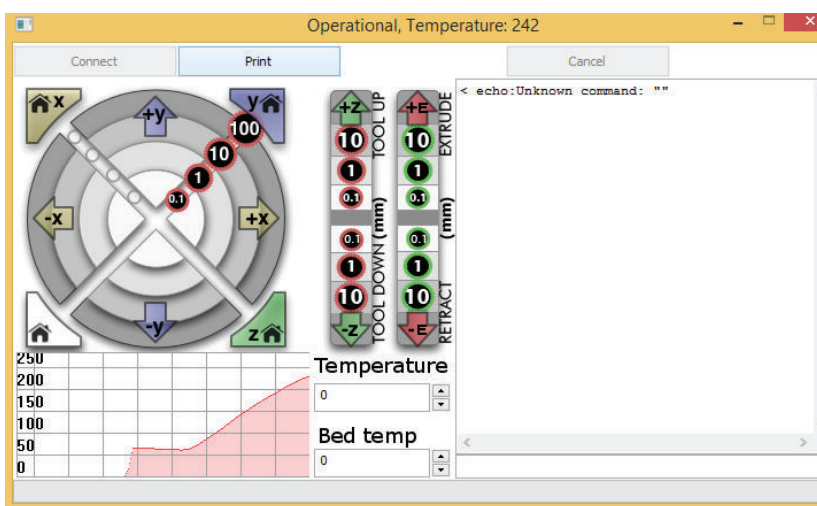


Figura 4.36 Ventana de control del proceso de corte.

Fuente: Propia



Figura 4.37 Icono del botón de inicio del proceso de corte.

Fuente: Propia

4.5.1 PRUEBAS PARA EL ELEMENTO DE CORTE

Como se mencionó en la sección 2.2.1, el equipo aplicara un método de corte que utilizara un elemento (alambre o herramienta) calentado mediante transferencia de calor desde una fuente caliente por lo que es necesario determinar cuál será el

elemento de corte definitivo. Las pruebas se realizaron a 240°C y 2mm/s y los elementos de corte que se probaron fueron:

- Brocas de acero rápido de diámetro 1mm.
- Agujas de acero de diámetro 1mm.
- Alambre de cobre de diámetro 1mm.

Los resultados de las pruebas se explican en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2 Resultados de las pruebas para el elemento de corte.

Elemento de corte	Resultados
Brocas de acero	El corte no se realiza por la baja transferencia de calor del material
Agujas de acero	La aguja se "quema" y dobla por la temperatura.
Alambre de cobre	El elemento realiza el corte.

Fuente: Propia

4.5.2 PRUEBAS DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA

La primera prueba del equipo consiste llevar a cabo varios procedimientos de corte en láminas de EPS de 10mm de espesor utilizando archivos .gcode modificados, y variando los parámetros de velocidad y temperatura. De esta manera se comprueba que el equipo cumple las siguientes especificaciones:

- Calentar el elemento/herramienta de corte a más de 240°C.
- Velocidad variable para el movimiento de corte.
- Cortar perfiles de las secciones de objetos 3D en láminas de material espuma.
- Realizar perforaciones internas en las secciones de objetos 3D sin cortar a través de las mismas.
- Perfiles de corte deben ser generados por un software.
- Un software debe controlar el proceso de corte.

El objetivo final de probar distintos valores de velocidad y temperatura es el de definir los valores que permitan al equipo cumplir las siguientes especificaciones:

- No deben actuar fuerzas en el elemento/herramienta de corte.
- Cortar láminas de EPS de presentación comercial.

Para iniciar las pruebas se establece la temperatura en 240°C y la velocidad en 10mm/s. Bajo estas condiciones se realiza una tarea de corte y en base a los resultados obtenidos se establecen otras combinaciones de valores que permitirán determinar las condiciones óptimas para el procedimiento de corte. Al efectuar la primera prueba, el corte se completó pero la punta de corte se dobló debido a que la velocidad de corte fue muy alta (**Figura 4.38**).

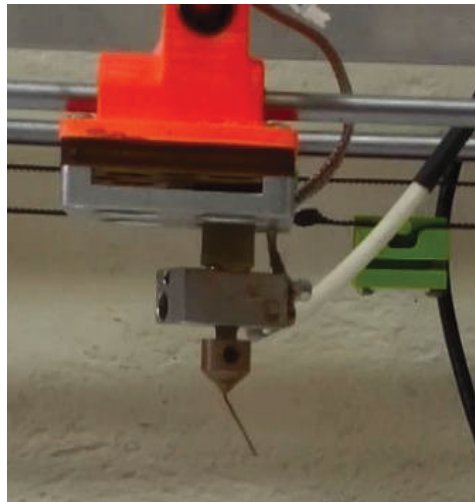



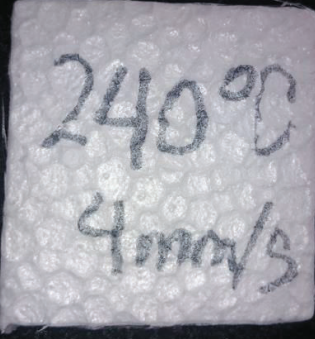
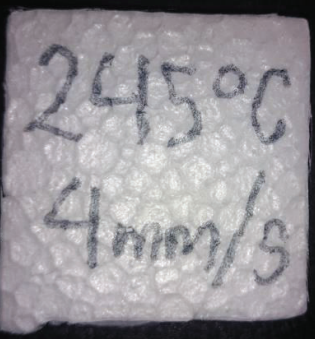
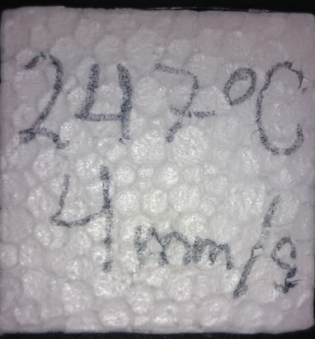


Figura 4.38 Punta de corte doblada al trabajar con 240°C y 10mm/s.

Fuente: Propia

En base a resultado de la primera prueba se decidió combinar tres valores diferentes de velocidad y temperatura. En la **Tabla 4.3** se observan las combinaciones y los resultados obtenidos.

Tabla 4.3 Resultados de las pruebas de velocidad y temperatura en láminas de EPS de 10mm de espesor.

Temp. (°C) Vel. (mm/s)	240	245	247
2			
4			
6	Con estos parámetros la punta del alambre se dobla.	Con estos parámetros la punta del alambre se dobla.	Con estos parámetros la punta del alambre se dobla.

Fuente: Propia

El mejor resultado obtenido de las pruebas realizadas con láminas de 10mm de espesor fue el obtenido con una temperatura de 247°C y una velocidad de 4mm/s por lo que estos valores serán los definitivos para realizar el procedimiento de corte en este tipo de láminas.

Siguiendo el mismo procedimiento, se definió que la velocidad y temperatura óptimas para cortar láminas de EPS de 20mm de espesor con el equipo son de 2mm/s y 247°C.

4.5.3 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

El principal ajuste que se debe definir en la calibración es el desfase (offset) que debe tener el elemento de corte respecto al perfil del objeto que se va a cortar. Se necesita definir un desfase para evitar que el ancho de corte (kerf width), producido por el elemento de corte al atravesar la lámina EPS, afecte las dimensiones finales de los elementos cortados y estas sean distintas a las requeridas.

El software Cura no tiene integrada una función para definir un desfase en su programación por lo que el método que se utilizará en el equipo es el de generar el modelo 3D incluyendo el desfase requerido. Esto se logra utilizando la herramienta **Offset** del programa Inventor al momento de generar los bocetos para crear el sólido.

Con el método para generar el desfase definido el siguiente paso es determinar cuál es el ancho de corte que debe ser compensado. Para esto se cortan figuras simples con dimensiones definidas y se mide las dimensiones finales de la pieza cortada (**Figura 4.39**).



Figura 4.39 Medición de elemento cortado de 50x50mm

Fuente: Propia

Como resultado de los ensayos de corte se define que el desfase que se debe compensar para cortar láminas de EPS de 10mm de espesor, con un elemento a 247°C que se mueve a 4mm/s, es de 1mm.

4.5.4 PRUEBAS DE LAS CAPACIDADES DEL EQUIPO

Las actividades descritas en las secciones anteriores permitieron establecer un procedimiento de corte para las láminas de EPS, sin embargo, no se probaron las capacidades y tipos de modelos 3D que se pueden obtener con el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS. Adicionalmente este equipo puede ser usado también para fabricar modelos 3D o capas cortadas de otros materiales. En base a las dos consideraciones mencionadas se decidió realizar pruebas que permitan mostrar las capacidades del equipo.

4.5.4.1 Pruebas de fabricación de modelos 3D

En esta etapa se realizaron pruebas de fabricación en una sola lámina de 10mm de espesor de los siguientes tipos de modelos 3D:

- Modelos de forma simple con perforaciones internas (**Figura 4.40**).
- Modelo de forma compleja (**Figura 4.41**).
- Modelos con perforaciones internas de forma compleja (**Figura 4.42**).



Figura 4.40 Elemento de una sola capa de forma simple con perforaciones internas.

Fuente: Propia



Figura 4.41 Elemento de una sola capa de forma compleja.

Fuente: Propia



Figura 4.42 Elemento de una sola capa con perforaciones internas de forma compleja.

Fuente: Propia

Adicionalmente se realizaron pruebas de corte en láminas de poliestireno extruido de 5mm de espesor. Para este material se determinaron que los parámetros de velocidad y temperatura adecuado son de 2mm/s y 247°C. La **Figura 4.43** muestra un ejemplo de corte en este material.



Figura 4.43 Elemento de una sola capa en XPS de 5mm de espesor.

Fuente: Propia

CAPITULO 5. OBTENCIÓN DE MODELOS GASIFICABLES Y APLICACIÓN EN EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN

Tomando en consideración las aplicaciones del procedimiento LFC, mencionadas en la sección 1.2.4, se decidió fabricar dos modelos gasificables que permitan mostrar las capacidades del equipo. Los modelos se escogieron considerando que estos deben tener formas complejas en sus perfiles, y múltiples perforaciones internas por lo cual se decidió fabricar un motor de dos tiempos de un cilindro a escala y un disco de freno. Estos modelos se crearon para ser construidos con capas de EPS de 10mm de espesor y fueron generados en el software de diseño Inventor (**Figura 5.1**).

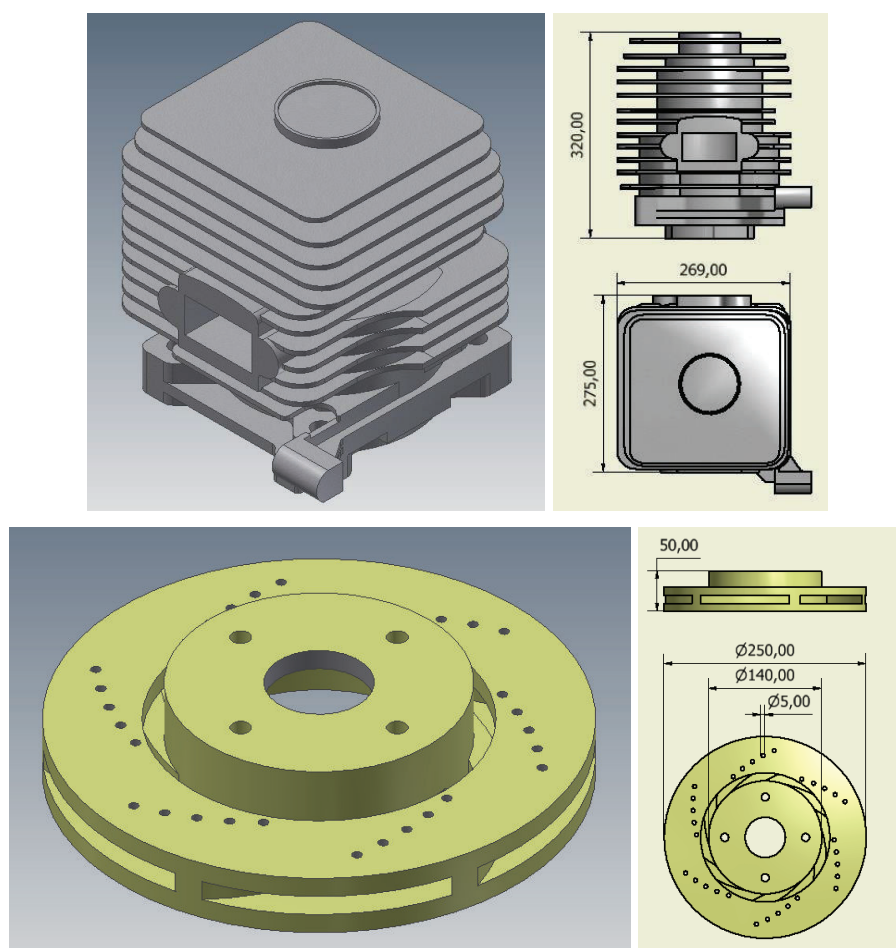


Figura 5.1 Modelos 3D generados en Inventor.

Fuente: Propia

El proceso de seccionamiento y generación del Gcode fue realizado utilizando el método de seccionamiento con software Inventor y generación con software Cura (sección 4.3.3). Como resultado del proceso de seccionamiento de los modelos se obtuvieron 32 capas de 10mm de espesor para el motor de un cilindro a escala y 5 capas de 10 mm de espesor para el disco de freno. Las capas seccionadas en el software Inventor se muestran en la **Figura 5.2**.

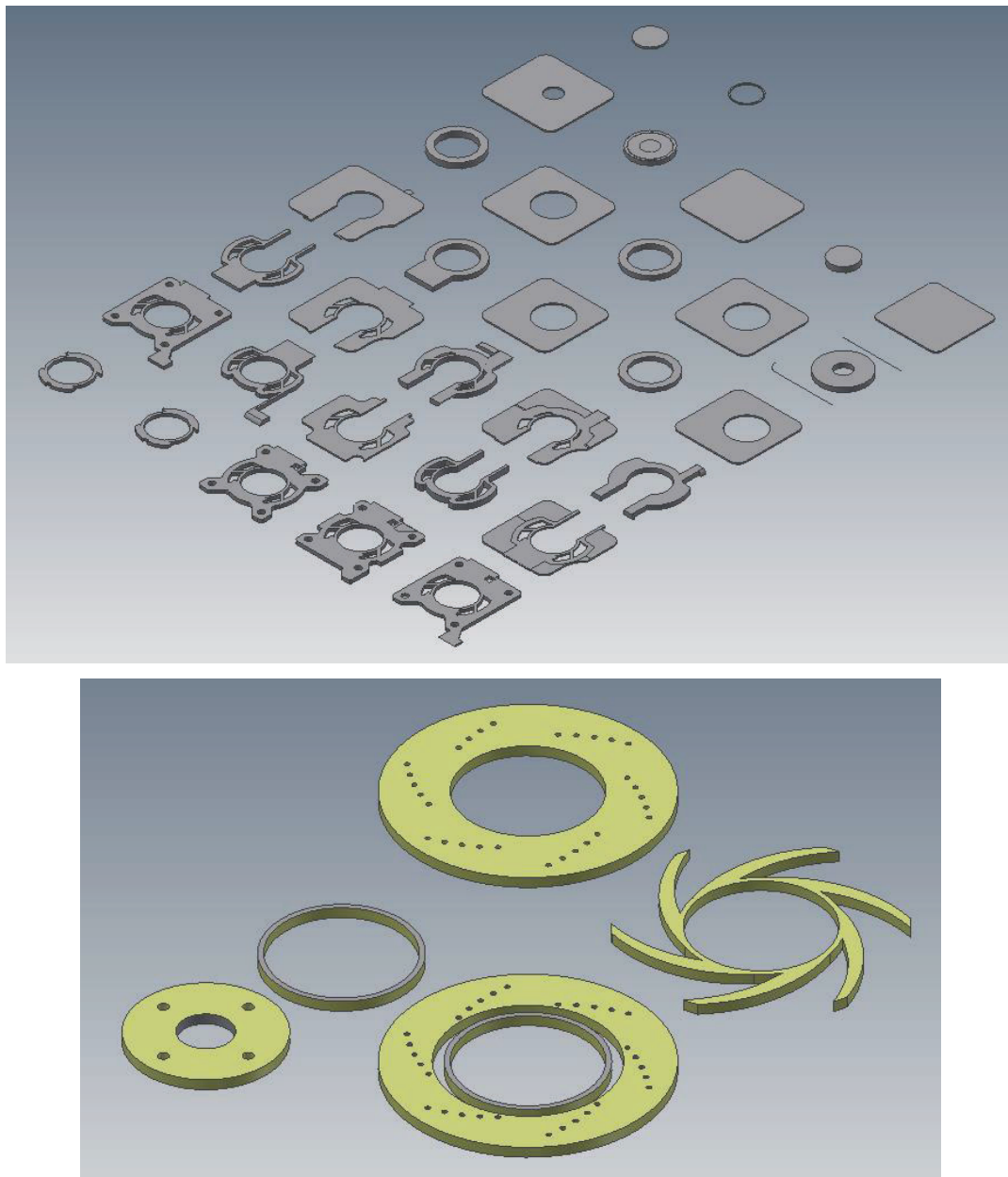


Figura 5.2 Modelos 3D seccionados y ubicados en Inventor.

Fuente: Propia

Todas las capas fueron fabricadas en láminas de EPS de 500x500x10mm. El procedimiento de corte de dos capas de los modelos se muestra en la **Figura 5.3**.



Figura 5.3 Fotografías del procedimiento de corte de las capas de los modelos 3D.

Fuente: Propia

Al momento de terminar el corte de cada capa es importante identificar en una de sus caras transversales el número de capa y la orientación en la que fue cortada (**Figura 5.4**). Esta operación se debe realizar para evitar confusiones en el ensamble de los modelos debido a que el procedimiento de unión es manual. La alineación de las capas es otra operación importante del procedimiento de ensamble. Para garantizar una correcta alineación se tienen varias opciones que se pueden aplicar dependiendo del modelo que se está fabricando. En el caso de modelos cuyas secciones tienen perfiles con formas y/o perforaciones que facilitan la ubicación y alineación entre sus capas, es suficiente con utilizar estas características para realizar el ensamble (**Figura 5.6**).

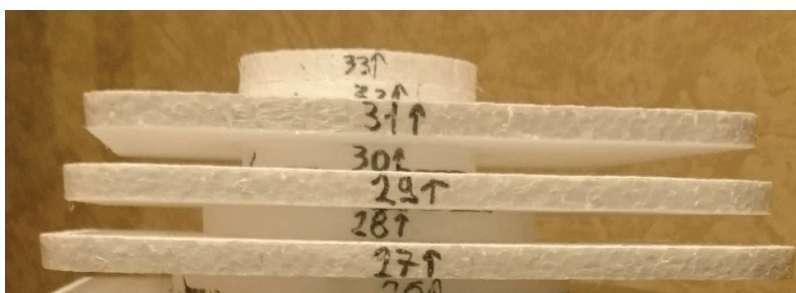


Figura 5.4 Identificación auxiliar de las capas de los modelos de EPS.

Fuente: Propia

Por otro lado, en los modelos que no posean las características mencionadas y que podrían presentar problemas para ubicar y alinear sus capas, se tiene la alternativa de crear perforaciones o aletas auxiliares que sirvan como puntos de referencia. Estas perforaciones o aletas deben ser planificadas según el modelo e incluidas al momento de crear el cuerpo en el software de diseño (**Figura 5.5**).

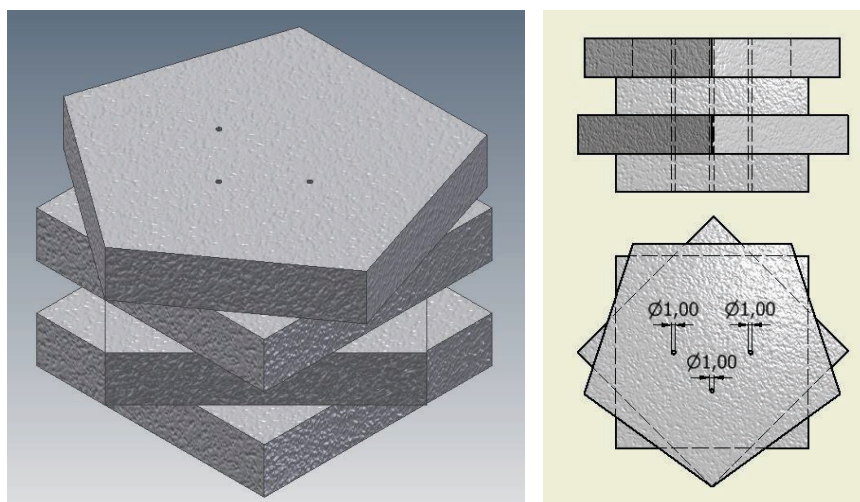


Figura 5.5 Ejemplo de modelo 3D con perforaciones auxiliares para alineación.

Fuente: Propia

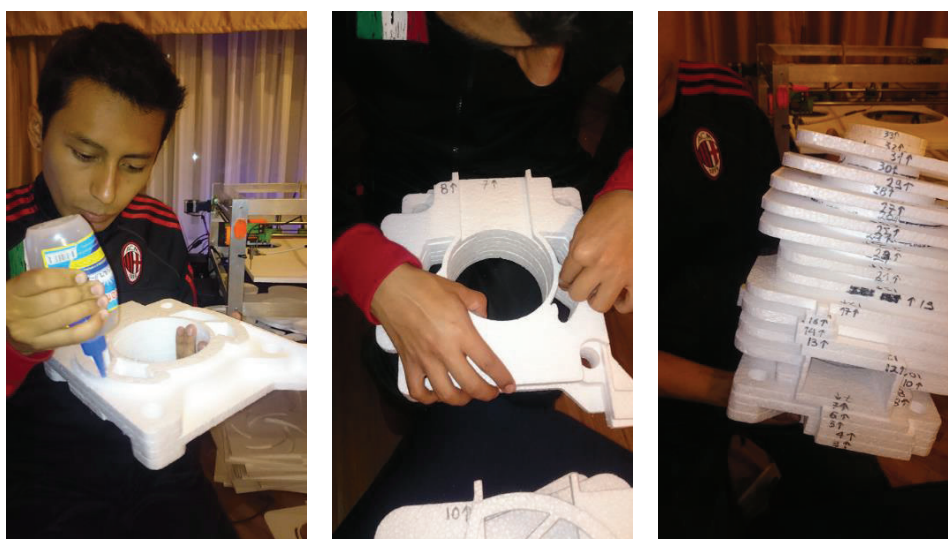


Figura 5.6 Fotografías del procedimiento de ensamble del modelo de EPS del motor a escala.

Fuente: Propia

Finalmente, para el procedimiento de unión de las capas de los modelos se optó por utilizar silicona líquida debido a la facilidad de uso que tiene este adhesivo. La silicona líquida fue colocada solamente en los contornos de las capas que se iban a unir. El procedimiento de ensamble de los modelos 3D se muestra en la **Figura 5.6 y 5.7**.



Figura 5.7 Fotografías del procedimiento de ensamble del modelo de EPS del disco de freno.

Fuente: Propia

Tabla 5.1 Tiempos de fabricación de los modelos EPS.

Tiempo empleado en la fabricación de los modelos de EPS	Motor a escala	Disco de freno
Tiempo total de seccionamiento (min)	40	10
Tiempo total de generación del Gcode (min)	30	5
Tiempo total de modificación del Gcode (min)	90	30
Tiempo de corte promedio por capa (min)	15	15
Tiempo total de corte de capas (min)	400	60
Tiempo de ensamble de modelo (min)	45	15
Total (horas)	10.3	2.3
Tiempo de fabricación por impresión 3D	482.5	68

Fuente: Propia

Los modelos gasificables de EPS del motor de un cilindro a escala y el disco de freno totalmente ensamblados se muestran en la **Figura 5.8**. El motor modelo del motor tiene una altura de 320mm mientras que el disco de freno una altura de 50mm. La **Tabla 5.1** muestra los tiempos que se emplearon en la fabricación de los modelos de EPS y el tiempo que se hubiera requerido para fabricar los mismos modelos mediante el método de prototipado y manufactura rápida por impresión 3D (Ver sección 3.1).

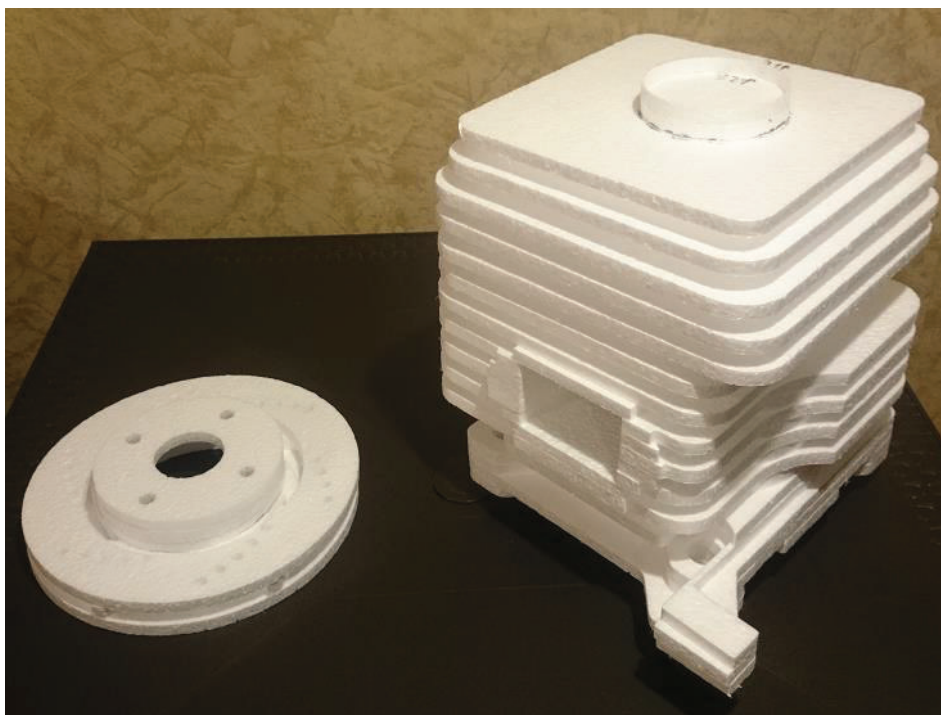


Figura 5.8 Modelos gasificables de EPS totalmente ensamblados.

Fuente: Propia

Con los modelos ensamblados se procedió a realizar el proceso de fundición por espuma perdida. Para llevar a cabo la fundición se siguió el proceso indicado en la sección 1.2.1; exceptuando los pasos de aplicación del recubrimiento refractario debido a que la calidad superficial no era importante para este trabajo, y la vibración de la caja de moldeo debido a que el tamaño de los modelos dificultaba la operación. El material escogido para la fundición fue el aluminio, y los equipos y elementos utilizados en la fundición de cada modelo se indican en la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2 Materiales y equipos utilizados en el proceso de fundición.

Motor a escala	Disco de freno
3 cajas de moldeo de 600x600x200mm	Caja de moldeo de 500x500x300mm
Horno a Diésel basculante - Horno a Diésel fijo	Horno a gas fijo
1 crisol de 22 Kg de aluminio y 1 crisol de 25 Kg de aluminio.	1 crisol de 9 Kg de aluminio
Arena de moldeo	Arena de moldeo sin aglutinante

Fuente: Propia

Las **Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10** muestran el procedimiento LFC y los resultados obtenidos.



Figura 5.9 Fotografías del procedimiento de llenado de las cajas de moldeo.

Fuente: Propia

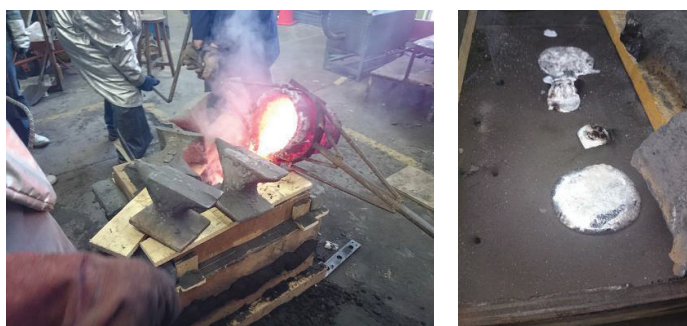


Figura 5.10 Fotografías del procedimiento de vertido del aluminio fundido en las cajas de moldeo.

Fuente: Propia



Figura 5.11 Fotografías del motor de un cilindro a escala fundido en aluminio.

Fuente: Propia



Figura 5.12 Fotografías del disco de freno fundido en aluminio.

Fuente: Propia

CAPITULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- El método de corte por alambre calentado cumple con las funciones requeridas y presenta resultados similares a otros métodos empleados en la actualidad con la ventaja de permitir el corte de capas con perforaciones internas.
- El uso de aluminio para el bloque calefactor y bronce para la boquilla de corte permitió que el sistema de control no tenga problemas para modular la temperatura del elemento de corte.
- El alambre de cobre, utilizado como el elemento de corte del equipo, mostro buenos resultados en el equipo debido a sus propiedades favorables para transferir calor.
- Tanto las bandas sincrónicas como el tornillo de potencia, utilizadas como los elementos principales del sistema de movimiento XYZ, permitieron al equipo realizar los movimientos de corte de manera precisa.
- No se presentaron problemas de atascamiento o trabas en ningún de las direcciones de movimiento por lo que el sistema de movimiento cumple con su función correctamente.
- Los sensores utilizados en las bandas sincrónicas facilitaron el proceso de construcción del equipo y cumple correctamente con su función de evitar la pérdida de pasos al realizar el corte de las láminas de EPS.
- La deflexión que presentaron los ejes y las varillas no afectó el funcionamiento del equipo ni el procedimiento de corte.
- El uso de la tecnología de prototipado y manufactura rápida por impresión 3D fue de gran ayuda para la fabricación de piezas específicas del equipo, y permitió tener una gran libertad en el diseño de los componentes.
- Todos los componentes fabricados por impresión 3D cumplen correctamente su función en el equipo.
- La deflexión de las láminas de EPS de 10mm de espesor al ser colocadas en el bloque de desplazamiento es mínima y no afecta el procedimiento de corte. Sin

embargo, el uso de láminas de EPS de menor espesor podría dar problemas debido a la deflexión.

- Los perfiles L de aluminio utilizados para la estructura soportan sin ningún problema todos los componentes del equipo y hacen que todo el conjunto sea ligero facilitando el traslado del equipo.
- El software de control Cura permite obtener los Gcode y controlar el procedimiento de corte de una manera muy fácil y en una interface totalmente amigable con el usuario.
- Los métodos de seccionamiento y generación del Gcode propuestos son fáciles de utilizar para cualquier usuario y permiten tener varias opciones al momento de crear un modelo de EPS.
- Las capas fabricadas con el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS tienen todas las formas requeridas para fabricar los modelos de EPS, y presentan una buena tolerancia dimensional.
- Los modelos de EPS se utilizaron en el proceso de fundición por espuma perdida sin mayores inconvenientes. Cabe señalar que el uso del presente equipo en la obtención de piezas metálicas por procesos de fundición sale fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, se incluyó una sección en la que se obtiene partes metálicas con fines demostrativos. Para obtener una pieza metálica por fundición con todas las prestaciones es necesario un detallado análisis de sistemas de alimentación, temperatura de colado, fundentes desgasificantes y demás parámetros que afectan la fabricación del mismo.
- Las piezas fundidas tienen todos los detalles de los modelos de EPS.
- Al comparar el tiempo de fabricación con el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS con la fabricación por impresión 3D se aprecia claramente que la reducción en el tiempo de fabricación, para piezas de tamaño medio y grande, que se obtiene al utilizar el equipo de manufactura aditiva.
- Las capas que tienen secciones menores a 1mm presentan defectos y adicionalmente no son aptas para el proceso de fundición por espuma perdida.
- La silicona líquida tuvo excelentes resultados como adhesivo para unir las capas de EPS.
- Las capas cortadas en láminas de XPS presentan una mejor calidad superficial pero requieren un mayor tiempo de fabricación.

Finalmente se presenta la **Tabla 6.1** que muestra si las especificaciones establecidas en la **Tabla 2.1** se cumplieron o no al final del proyecto.

Tabla 6.1 Control de cumplimiento de las especificaciones del equipo.

Control de cumplimiento de especificaciones					
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción	Cumplido
Función	11/03/2015	LF	R	Cortar perfiles de las secciones de objetos 3D en láminas de material espuma de poliestireno.	SI
	27/03/2015	D	R	Calentar el elemento/herramienta de corte a más de 240°C.	SI
	27/03/2015	D	D	Realizar perforaciones internas en las secciones de objetos 3D sin cortar a través de las mismas.	SI
Dimensiones	11/03/2015	LF	R	Las láminas a cortar tienen las dimensiones de 500x500 y espesores de hasta 20mm.	SI
Movimientos	27/03/2015	D	R	Velocidad variable para el movimiento de corte en el rango de 1mm/s a 60mm/s.	SI
Fuerzas	03/04/2015	D	NR	No deben actuar fuerzas en el elemento/herramienta de corte.	SI
Materiales	11/03/2015	LF	R	Láminas de EPS de presentación comercial.	SI
Señales y control	11/03/2015	LF	R	Perfiles de corte deben ser generados por un software.	SI
	11/03/2015	LF	R	Un software debe controlar el proceso de corte.	SI
Propone:	LF = Laboratorio de fundición; D = Diseñadores				
R/D:	R = Requerimiento; NR = Nuevo requerimiento; D = Deseo				

Fuente: Propia

6.2 CONCLUSIONES

- La investigación de nuevos métodos de prototipado y manufactura rápida en materiales espuma se lleva a cabo en varias instituciones educativas alrededor del mundo con el objetivo de obtener equipos que fabriquen objetos más complejos, de mejor calidad y de mayor tamaño en menor tiempo.

- Cada tecnología y equipo de prototipado y manufactura rápida tiene su propio campo de aplicación definido ya que no existe un equipo de prototipado y manufactura rápida que puede realizar todas las tareas de manera eficiente y eficaz.
- El equipo de manufactura aditiva por laminas EPS diseñado y construido en el presente trabajo cumple con las funciones y requerimientos establecidos en el documento de especificación.
- El equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS puede ser usado también para tareas de prototipado rápido ya que tienen prestaciones similares a otros equipos que comparten su campo de trabajo y supera ampliamente a las tecnologías de *impresión 3D por capas delgadas* en cuanto al tiempo de fabricación de modelos que se encuentren dentro de sus capacidades.
- El uso del software CAD Autodesk Inventor para el diseño del equipo permitió realizar evaluaciones tempranas de las distintas opciones de solución que se presentaron para los sistemas, probar y analizar distintas formas y dimensiones para varios componentes de la máquina, y prever interferencias que hubieran causado problemas al momento de construir el equipo.
- El factor determinante para definir la forma y las dimensiones de los componentes del sistema de movimiento, y consecuentemente del resto de elementos del equipo, fue la especificación dimensional que indica que el equipo debe cortar láminas de 500x500mm.
- Es posible utilizar elementos y herramientas, así como desarrollar e investigar nuevos métodos de corte, distintos a los empleados convencionalmente para maquinar materiales espuma.
- Los procedimientos establecidos para seccionar los modelos 3D en capas que puedan ser fabricadas a base de cortes de secciones 2D pueden ser empleados a criterio del usuario evaluando sus ventajas y desventajas.
- Varios de los elementos mecánicos y electrónicos utilizados en este equipo no pudieron ser adquiridos en el mercado nacional por lo que se tuvo que recurrir a la adquisición en otros mercados de la región.
- La velocidad y temperatura de corte dependen directamente de la densidad y espesor del material que se está cortando por lo que se deben realizar ensayos que permitan establecer los valores óptimos de estos parámetros cada vez que

se empleen materiales con características distintas a los descritos en el presente trabajo.

- La tecnología de prototipado y manufactura rápida por impresión 3D facilita y agiliza de gran manera el desarrollo de proyectos de investigación y diseño de nuevas tecnologías y equipos.
- El equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS es capaz de fabricar capas de formas complejas y/o con perforaciones internas.

6.3 RECOMENDACIONES

- Implementar un laboratorio de prototipado y manufactura rápida que permita la creación de partes para el desarrollo de proyectos dentro de la facultad de Ingeniería Mecánica.
- Desarrollar un software de seccionamiento y generación del Gcode específico para el equipo de manufactura aditiva por láminas de EPS con el objetivo de reducir el tiempo de fabricación de los modelos de EPS.
- Desarrollar un método de ensamble automático o semiautomático para la unión de las capas que conforman los modelos de EPS.
- Se recomienda el uso de este equipo para la fabricación de partes con capas que tengan secciones superiores a 1mm.
- Evitar crear o utilizar modelos cuyas dimensiones no coincidan con las del espesor de las láminas que se pueden conseguir comercialmente.
- Preferentemente crear o utilizar modelos que puedan ser seccionados en capas de espesor constante.
- Limpiar y lubricar las varillas y ejes del equipo frecuentemente para evitar obstrucciones del movimiento y problemas de funcionamiento.
- Siempre tener encendida la ventilación de la tarjeta electrónica ya que un sobrecalentamiento de la misma afecta el funcionamiento del equipo.
- Vigilar constantemente el proceso de corte para detectar alguna posible falla que pueda dañar los componentes del equipo, principalmente la punta de corte.
- Identificar el número y orientación de las capas al acabar el proceso de corte para evitar confusiones y facilitar la unión de las capas para formar el modelo.

- Al llevar a cabo el proceso de fundición, tener mucho cuidado al trabajar con modelos que tengan secciones tipo aleta ya que estas se doblan por la presión ejercida por la arena y no se obtendrán las piezas fundidas esperadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahn, D. (Mayo de 2002). Investigation into Development of Variable Lamination Manufacturing using Expandable Polystyrene Foam. *Tesis doctoral*. Daejon, Korea: Korean Advanced Institute of Science and Technology.
2. Aitchison, D., Brooks, H., Bain, J., & Pons, D. (2009). An Investigation into the Prediction of Optimal Conditions for Polystyrene Foam Cut with a Taut Hot-Wire. *The annals of "DUNĂREA DE JOS" University of Galati*. Nueva Zelanda.
3. Alliance of foam packagign recyclers. (Enero de 2000). Properties, performance and design fundamentals of expanded polystyrene packaging. Obtenido de <http://insulfoam.com/wp-content/uploads/2014/05/Properties-Performance-and-Design-Fundamentals-of-Expanded-Polystyrene-Packaging.pdf>
4. Alvarez Morales, A., & Campos Acosta, M. (Abril de 2012). Obtención de piezas de aluminio mediante el proceso de colado con modelos de poliestireno expandido. *Tesis de Ingeniería*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
5. Artsoft USA. (s.f.). <http://www.machsupport.com/>. Obtenido de http://www.machsupport.com/wp-content/uploads/2013/02/Mach3Mill_Install_Config.pdf
6. ASM International. (1998). ASM Handbook Volume 15 Casting. PDF.
7. Beltrán Venegas, L. F., & Vela Chulde, J. S. (Julio de 2010). Diseño y construcción de una máquina cortadora de poliestireno expandido con control numerico computarizado. *Tesis de Ingeniería*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
8. Brooks, H. L., & Aitchison, D. (2010). A Review of State-of-the-Art Large Sized Foam Cutting Rapid Prototyping and Manufacturing Technologies. *Rapid Prototyping Journal*. Christchurch, New Zealand.

9. Budynas, R. G., & Nisbett, J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico: McGraw Hill Interamericana.
10. Castellani, L., Longo, A., & Pasquali, F. (2005). *Encyclopaedia of hydrocarbons* (Vol. Volume II). Mantova, Italia. Obtenido de Treccani: http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_2/837-862_ING3.pdf
11. Cuevas, E., Zaldívar, D., & Pérez, M. (2010). *Procesamiento digital de imágenes con MATLAB y Simulink*. Madrid: Ra-Ma.
12. FAG. (s.f.). *Catálogo WL 41 520/3 SB*. Obtenido de <http://www.recambiosfrain.com/uploads/catalog/documents/fag.pdf>
13. Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mecánica de materiales*. Cengage Learning.
14. Kalpakjian S., S. S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson Education.
15. Macas Valdez, E. (Julio de 2007). Dimensionamiento y construcción de una máquina prototipo para laminado y corte de bloques de poliestireno expandido de dimensiones 300x200x50. *Proyecto de tecnología*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
16. MISUMI. (s.f.). *Selection of timing belts*. Obtenido de <http://us.misumi-ec.com/pdf/fa/2010/p3515-3536.pdf>
17. Pham, D., & Gault, R. (Octubre de 1998). A Comparison of Rapid Prototyping Technologies. Cardiff, Reino Unido: International Journal of Machine Tools & Manufacture.
18. Revelo Guerrero, F. (Noviembre de 2011). Selección de la mezcla de moldeo óptima para fundición de aluminio con el uso de modelos gasificables. *Tesis de Ingeniería*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
19. Rexroth Bosch Group. (s.f.). Obtenido de <http://www.equinotec.com/web/galeria/family/pdf/141019021914887.pdf>
20. Riba Romeva, C. (2002). *Diseño concurrente*. Ediciones UPC.
21. Scheirs, J., & Priddy, D. (2003). *Modern Styrenic Polymers: Polystyrene and Styrenic Copolymers*. John Wiley & Sons Ltd.

- 22.** SKF. (2003). *SKF General catalogue*. Obtenido de <https://www.google.com.ec/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=selection%20of%20timing%20belts%20misumi%20pdf>
- 23.** The EPS packaging group. (s.f.). Obtenido de http://www.eps.co.uk/pdfs/eps_and_the_environment.pdf
- 24.** THK. (s.f.). Obtenido de https://www.acorn-ind.co.uk/_assets/documents/Linear-resources/thk-general-catalogue.pdf
- 25.** Velastegui, T. (2012). *Elementos de máquinas*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

**ANEXO A - DIAGRAMAS, TABLAS Y CATALOGOS
UTILIZADOS EN EL DISEÑO DEL EQUIPO**

A.1 Diagramas para el cálculo y selección de rodamientos lineales.

■ f_H : Hardness Factor

To maximize the load capacity of the Linear Bushing, the hardness of the raceways needs to be between 58 to 64 HRC.

If the hardness is lower than this range, the basic dynamic load rating and the basic static load rating decrease. Therefore, it is necessary to multiply each rating by the respective hardness factor (f_H).

Normally, $f_H=1.0$ since the Linear Bushing has sufficient hardness.

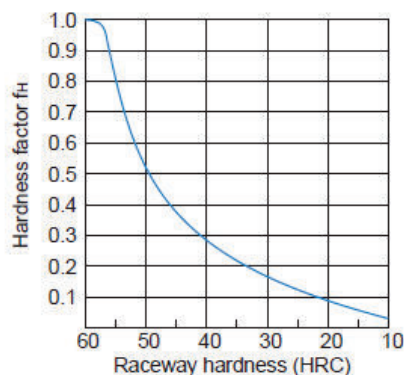


Fig.1 Hardness Factor (f_H)

Figura A.0.1 Diagrama para el factor de dureza f_H ⁷⁸.

■ f_T : Temperature Factor

If the temperature of the environment surrounding the operating Linear Bushing exceeds 100°C, take into account the adverse effect of the high temperature and multiply the basic load ratings by the temperature factor indicated in Fig.2.

Also note that the Linear Bushing itself must be of high temperature type.

Note) If the environment temperature exceeds 80 °C, use a Linear Bushing type equipped with metal retainer plates.

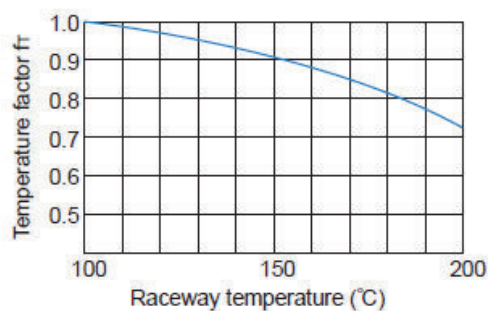


Fig.2 Temperature Factor (f_T)

Figura A.0.2 Diagrama para el factor de temperatura f_T ⁷⁹.

⁷⁸ (THK General Catalogue, págs. A-538)

⁷⁹ (THK General Catalogue, págs. A-539)

■ f_c : Contact Factor

When multiple nuts are used in close contact with each other, their linear motion is affected by moments and mounting accuracy, making it difficult to achieve uniform load distribution. In such applications, multiply the basic load rating (C) and (C_0) by the corresponding contact factor in Table2.

Note) If uneven load distribution is expected in a large machine, take into account the respective contact factor indicated in Table2.

Table2 Contact Factor (f_c)

Number of nuts in close contact with each other	Contact factor f_c
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61
Normal use	1

Figura A.0.3 Diagrama para el factor de contacto f_c ⁸⁰.

■ f_w : Load Factor

In general, reciprocating machines tend to involve vibrations or impact during operation. It is difficult to accurately determine vibrations generated during high-speed operation and impact during frequent start and stop motion. Therefore, when loads applied on a Linear Bushing cannot be measured, or when speed and impact have a significant influence, divide the basic load rating (C or C_0), by the corresponding load factor in Table3.

Table3 Load Factor (f_w)

Vibrations/ impact	Speed(V)	f_w
Faint	Very low $V \leq 0.25\text{m/s}$	1 to 1.2
Weak	Slow $0.25 < V \leq 1\text{m/s}$	1.2 to 1.5
Medium	Medium $1 < V \leq 2\text{m/s}$	1.5 to 2
Strong	High $V > 2\text{m/s}$	2 to 3.5

Figura A.0.4 Diagrama para el factor de carga f_w ⁸¹.

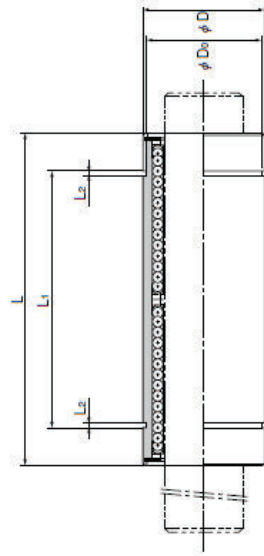
⁸⁰ (THK General Catalogue, págs. A-539)

⁸¹ (THK General Catalogue, págs. A-539)

A.2 Catálogo para la selección de rodamientos lineales.

C. Dimensions of the Linear Bush

Model LM-L



Model LM-L

Model No.	Standard type	Ball rows	Mass g	Inscribed circle diameter		Major		Dimensions			Radial clearance tolerance μm	Eccentricity clearance (max) μm	Basic load rating		Unit mm
				dr	Tolerance	D	Tolerance	Length	Tolerance	L _s			L _i	Tolerance	
LM 3L	4	3	3	3	0	7	0	19	—	—	—	10	-2	139	216
LM 4L	4	4	4	4	0	8	-0.013	23	—	—	—	10	-3	139	254
LM 5L	4	6	6	5	0	10	-0.013	29	20	1.1	9.6	10	-3	263	412
LM 6L	4	16	16	6	0	12	-0.010	35	27	1.1	11.5	15	-5	324	529
LM 8L	4	31	31	8	0	15	-0.010	45	35	1.1	14.3	15	-5	431	784
LM 10L	4	62	62	10	0	19	-0.016	55	44	0	18	15	-5	588	1100
LM 12L	4	80	80	12	0	21	-0.016	57	46	-0.3	20	15	-5	657	1200
LM 13L	4	90	90	13	0	23	-0.016	61	46	—	22	15	-7	814	1570
LM 16L	5	145	145	16	0	28	-0.022	70	53	—	27	15	-7	1230	2350
LM 20L	5	180	180	20	0	32	-0.022	80	61	—	30.5	20	-9	1400	2750
LM 25L	6	440	440	25	0	40	-0.019	112	82	1.85	38	20	-9	1560	3140
LM 30L	6	580	580	30	0	45	-0.019	123	89	1.85	43	20	-9	2490	5490
LM 35L	6	795	795	35	0	52	-0.022	135	99	2.1	49	25	-13	2650	6270
LM 40L	6	1170	1170	40	0	60	-0.022	154	121	2.1	57	25	-13	3430	8040
LM 50L	6	3100	3100	50	0	80	-0.025	192	148	2.6	76.5	25	-13	6090	15900
LM 60L	6	3500	3500	60	0	90	-0.025	211	170	3.15	86.5	25	-16	7650	20000

Note Since this model contains a synthetic resin retainer, do not use it at temperature exceeding 80°C. If requiring a type equipped with a seal, indicate it when placing an order. (Example) LM13L UU

Note A stainless steel type is also available. Contact TOSHIBA for details.

Seal attached on both ends of the nut

A.3 Tablas utilizadas para el diseño de los ejes conductores y conducidos^{82, 83}.

Tabla 6-2

Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin, ecuación (6-19)

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{utr} kpsi	S_{utr} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

De C. J. Noll y C. Lipson, "Allowable Working Stresses", en *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3. núm. 2, 1946, p. 29. Reproducida por O. J. Horger (ed.), *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, Nueva York. Copyright © 1953 por The McGraw-Hill Companies, Inc. Reproducido con autorización.

Tabla 6-4

Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.*
(S_T = resistencia a la tensión a la temperatura de operación; S_{RT} = resistencia a la tensión a temperatura ambiente; $0.099 \leq \hat{\sigma} \leq 0.110$)

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

*Fuente de datos: figura 2-9.

Tabla 6-5

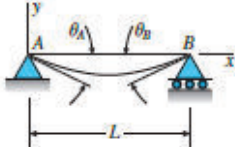
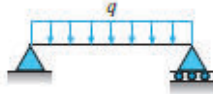
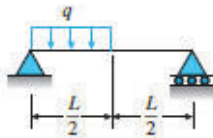
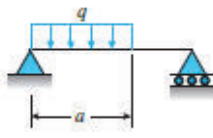
Factores de confiabilidad k_a correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_a
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

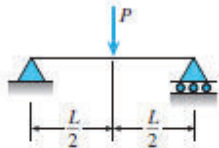
⁸² (Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 2008, págs. 280, 283, 285)

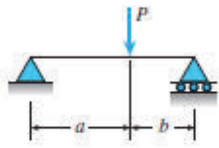
⁸³ (Mecánica de materiales, 2009, págs. 987, 988)

TABLA G.2 DEFLEXIONES Y PENDIENTES DE VIGAS SIMPLES

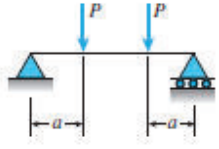
 <p style="text-align: center;">$EI = \text{constante}$</p>	<p>v = deflexión en la dirección y (positiva hacia arriba) $v' = dv/dx$ = pendiente de la curva de deflexión $\delta_C = -v(L/2)$ = deflexión en el punto medio C de la viga (positiva hacia abajo) x_1 = distancia del apoyo A al punto de deflexión máxima $\delta_{\max} = -v_{\max}$ = deflexión máxima (positiva hacia abajo) $\theta_A = -v'(0)$ = ángulo de rotación en el extremo izquierdo de la viga (positivo en el sentido de las manecillas del reloj) $\theta_B = v'(L)$ = ángulo de rotación en el extremo derecho de la viga (positivo en el sentido de las manecillas del reloj)</p>
<p>1</p> 	$v = -\frac{qx}{24EI}(L^3 - 2Lx^2 + x^3)$ $v' = -\frac{q}{24EI}(L^3 - 6Lx^2 + 4x^3)$ $\delta_C = \delta_{\max} = \frac{5qL^4}{384EI} \quad \theta_A = \theta_B = \frac{qL^3}{24EI}$
<p>2</p> 	$v = -\frac{qx}{384EI}(9L^3 - 24Lx^2 + 16x^3) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right)$ $v' = -\frac{q}{384EI}(9L^3 - 72Lx^2 + 64x^3) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right)$ $v = -\frac{qL}{384EI}(8x^3 - 24Lx^2 + 17L^2x - L^3) \quad \left(\frac{L}{2} \leq x \leq L\right)$ $v' = -\frac{qL}{384EI}(24x^2 - 48Lx + 17L^2) \quad \left(\frac{L}{2} \leq x \leq L\right)$ $\delta_C = \frac{5qL^4}{768EI} \quad \theta_A = \frac{3qL^3}{128EI} \quad \theta_B = \frac{7qL^3}{384EI}$
<p>3</p> 	$v = -\frac{qx}{24LEI}(a^4 - 4a^3L + 4a^2L^2 + 2a^2x^2 - 4aLx^2 + Lx^3) \quad (0 \leq x \leq a)$ $v' = -\frac{q}{24LEI}(a^4 - 4a^3L + 4a^2L^2 + 6a^2x^2 - 12aLx^2 + 4Lx^3) \quad (0 \leq x \leq a)$ $v = -\frac{qa^2}{24LEI}(-a^2L + 4L^2x + a^2x - 6Lx^2 + 2x^3) \quad (a \leq x \leq L)$ $v' = -\frac{qa^2}{24LEI}(4L^2 + a^2 - 12Lx + 6x^2) \quad (a \leq x \leq L)$ $\theta_A = \frac{qa^2}{24LEI}(2L - a)^2 \quad \theta_B = \frac{qa^2}{24LEI}(2L^2 - a^2)$

(Continúa)


- 4 
$$v = -\frac{Px}{48EI}(3L^2 - 4x^2) \quad v' = -\frac{P}{16EI}(L^2 - 4x^2) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right)$$

$$\delta_C = \delta_{\max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad \theta_A = \theta_B = \frac{PL^2}{16EI}$$
-
- 5 
$$v = -\frac{Pbx}{6LEI}(L^2 - b^2 - x^2) \quad v' = -\frac{Pb}{6LEI}(L^2 - b^2 - 3x^2) \quad (0 \leq x \leq a)$$

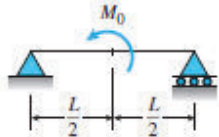
$$\theta_A = \frac{Pab(L+b)}{6LEI} \quad \theta_B = \frac{Pab(L+a)}{6LEI}$$

 Si $a \geq b$, $\delta_C = \frac{Pb(3L^2 - 4b^2)}{48EI}$ Si $a \leq b$, $\delta_C = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{48EI}$
 Si $a \geq b$, $x_1 = \sqrt{\frac{L^2 - b^2}{3}}$ y $\delta_{\max} = \frac{Pb(L^2 - b^2)^{3/2}}{9\sqrt{3}LEI}$
-
- 6 
$$v = -\frac{Px}{6EI}(3aL - 3a^2 - x^2) \quad v' = -\frac{P}{2EI}(aL - a^2 - x^2) \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$v = -\frac{Pa}{6EI}(3Lx - 3x^2 - a^2) \quad v' = -\frac{Pa}{2EI}(L - 2x) \quad (a \leq x \leq L - a)$$

$$\delta_C = \delta_{\max} = \frac{Pa}{24EI}(3L^2 - 4a^2) \quad \theta_A = \theta_B = \frac{Pa(L-a)}{2EI}$$
-
- 7 
$$v = -\frac{M_0x}{6LEI}(2L^2 - 3Lx + x^2) \quad v' = -\frac{M_0}{6LEI}(2L^2 - 6Lx + 3x^2)$$

$$\delta_C = \frac{M_0L^2}{16EI} \quad \theta_A = \frac{M_0L}{3EI} \quad \theta_B = \frac{M_0L}{6EI}$$

$$x_1 = L\left(1 - \frac{\sqrt{3}}{3}\right) \quad y \quad \delta_{\max} = \frac{M_0L^2}{9\sqrt{3}EI}$$
-
- 8 
$$v = -\frac{M_0x}{24LEI}(L^2 - 4x^2) \quad v' = -\frac{M_0}{24LEI}(L^2 - 12x^2) \quad \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right)$$

$$\delta_C = 0 \quad \theta_A = \frac{M_0L}{24EI} \quad \theta_B = -\frac{M_0L}{24EI}$$

A.4 Tipos de rodamientos y sus características⁸⁴.

Tipo de rodamiento	Características:												
	Carga radial	Carga axial en ambas direcciones	Compensación longitudinal en el rodamiento	Compensación longitudinal con ajuste deslizable	Aplicación limitada para montaje por parejas	Aplicación limitada para montaje por parejas muy bien en series estrechas	Funcionamiento silencioso	Agujero cónico	Cierre a uno o ambos lados	Elevada rigidez	Bajo rozamiento	Rodamientos fijos	Rodamientos libres
Aplicación: 													
Rodamientos rígidos de bolas													
Rodamientos de bolas de contacto angular													
Rodamientos de bolas de contacto angular de doble fila													
Rodamientos para husillos													
Rodamientos con cuatro caminos de rodadura													
Rodamientos oscilantes de bolas													
Rodamientos de rodillos cilíndricos NU, N													
NU													
NUP, NU + HJ													
NN													
NCF, NJ2VH													
NNC, NNF													

^a para montaje por parejas ^b para baja carga axial ^c aplicación limitada para montaje por parejas ^d también con mangos de montaje o desmontaje ^e solo carga axial
^f muy bien en series estrechas

Tipo de rodamiento	Características:															
	Carga radial	Carga axial en ambas direcciones	Compensación longitudinal en el rodamiento	Compensación longitudinal con ajuste deslizante	Rodamientos desplazables	Compensación de desalineaciones	Elevada precisión	Aptitud para elevadas velocidades	Funcionamiento silencioso	Agujero cónico	Obstrucción a uno o ambos lados	Elevada rigidez	Bajo rozamiento	Rodamientos fijos	Rodamientos libres	
<p>Aptitud</p> <ul style="list-style-type: none"> muy buena buena limitada no adecuada / no aplicable <p>normal / aceptable</p>																
Tipo de rodamiento																
Rodamientos de rodillos cónicos																
Rodamientos oscilantes de rodillos, de una hilera																
Rodamientos oscilantes de rodillos																
Rodamientos axiales de bolas																
Rodamientos axiales de bolas de contacto angular																
Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos																
Rodamientos axiales oscilantes de rodillos																
Rodamientos con anillo de sujeción																

g) rodamientos con anillos de sujeción y axiales de bolas con contraplaca compensan desalineaciones durante el montaje

a) para montaje por parejas

c) limitada aptitud para montaje por parejas

d) también con manguitos de montaje o desmontaje

← Rodamientos individuales y rodamientos en tandem en un sentido

A.5 Catalogo de rodamientos FAG rígidos de bolas⁸⁵.

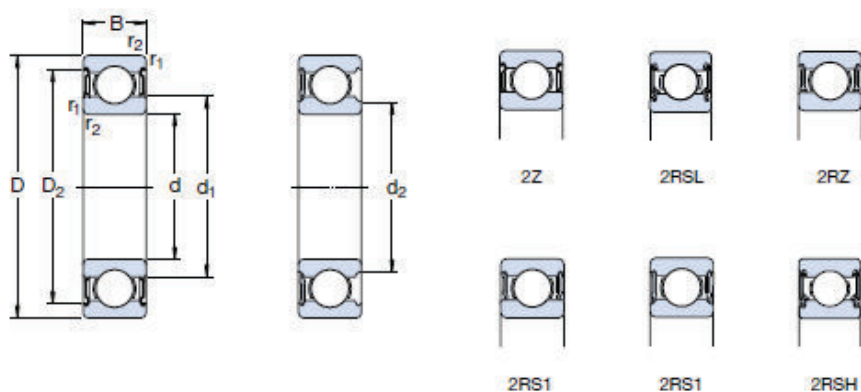
Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera

Los rodamientos pueden alcanzar una duración de vida limitada, si C_{90}/P_{a8} , ver Fig.41.

Eje	Dimensiones				Peso		Capacidad de carga		Velocidad límite	Velocidad de referencia	Denominación abreviada	Medidas auxiliares			
	d	D	B	r _{min}	H	H ₁	J	J ₂				d _{yn}	stat.	C ₉₀	D ₁
	mm								C	C ₀	mm ⁻¹	mm	mm	mm	
3	10	4	0.15	7.7	8.2	5	0.001	0.64	0.22	53000	67000	623 ZR	4.4	8.6	0.15
	10	4	0.15	7.7	8.2	5	0.001	0.64	0.22	35000	61000	623 ZR	4.4	8.6	0.15
	10	4	0.15	7.7	8.2	5	0.001	0.64	0.22	30000	57000	623 ZRS	4.3	8.6	0.15
4	13	5	0.2	10.5	11.2	7	0.003	1.29	0.49	15000	53000	634 ZR	5.8	11.2	0.2
	13	5	0.2	10.5	11.2	7	0.004	1.29	0.49	35000	53000	634 ZR	5.8	11.2	0.2
	13	5	0.2	10.5	11.2	7	0.003	1.29	0.49	26000	53000	634 ZRS	5.8	11.2	0.2
	16	5	0.3	12.5	13.4	8.5	0.006	1.73	0.67	45000	45000	651 ZR	6.4	13.6	0.3
	16	5	0.3	12.5	13.4	8.5	0.006	1.73	0.67	24000	45000	651 ZRS	6.4	13.6	0.3
5	16	5	0.3	12.5	13.4	8.5	0.006	1.95	0.44	13000	43000	655 ZR	7.4	13.6	0.3
	16	5	0.3	12.5	13.4	8.5	0.005	1.95	0.44	35000	43000	655 ZR	7.4	13.6	0.3
	16	5	0.3	12.5	13.4	8.5	0.005	1.95	0.44	24000	43000	655 ZRS	7.4	13.6	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.008	2.95	1.04	36000	40000	635 ZR	7.4	16.6	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.008	2.95	1.04	24000	40000	635 ZRS	7.4	16.6	0.3
6	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.008	4.55	1.04	36000	39000	658 ZR	8.4	16.6	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.008	2.95	1.04	25000	39000	658 ZR	8.4	16.6	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.008	2.95	1.04	22000	39000	658 ZRS	8.4	16.6	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.007	2.95	1.04	35000	38000	657 ZR	8	17	0.3
	19	6	0.3	15.5	16.7	10.8	0.007	2.95	1.04	25000	38000	657 ZRS	8	17	0.3
7	22	7	0.3	18.1	19.1	12.4	0.012	3.25	1.37	36000	34000	627 ZR	9.4	19.6	0.3
	22	7	0.3	18.1	19.1	12.4	0.012	3.25	1.37	30000	34000	627 ZR	9.4	19.6	0.3
	22	7	0.3	18.1	19.1	12.4	0.011	3.25	1.37	23000	34000	627 ZRS	9.4	19.6	0.3
	22	7	0.3	18.1	19.1	12.4	0.011	3.25	1.37	36000	36000	608 ZR	10	20	0.3
	22	7	0.3	18.1	19.1	12.4	0.011	3.25	1.37	20000	36000	608 ZRS	10	20	0.3
9	24	7	0.3	19.6	20.5	14	0.015	3.65	1.63	36000	35000	609 ZR	11	22	0.3
	24	7	0.3	19.6	20.5	14	0.015	3.65	1.63	30000	35000	609 ZR	11	22	0.3
	24	7	0.3	19.6	20.5	14	0.015	3.65	1.63	20000	35000	609 ZRS	11	22	0.3
	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.02	4.55	1.96	34000	30000	629 ZR	11.4	25.6	0.3
	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.021	4.55	1.96	28000	30000	629 ZR	11.4	25.6	0.3
26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.021	4.55	1.96	19000	30000	629 ZRS	11.4	25.6	0.3	

A.6 Catalogo de rodamientos SKF rígidos de bolas⁸⁶.

Sealed single row deep groove ball bearings d 8 – 9 mm



Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit P_u	Speed ratings		Mass	Designations	
d	D	B	dynamic C	static C_0		Reference speed	Limiting ¹⁾ speed		sealed both sides	sealed one side
mm			kN		kN	r/min		kg	-	
8	16	5	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0036	628/8-2Z	-
	16	5	1,33	0,57	0,024	-	26 000	0,0036	628/8-2RS1	-
	16	6	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0043	638/8-2Z	-
	19	6	1,9	0,74	0,031	80 000	40 000	0,0071	619/8-2Z	-
	19	6	1,9	0,74	0,031	-	24 000	0,0071	619/8-2RS1	-
	19	6	2,21	0,95	0,04	85 000	43 000	0,0072	607/8-2Z	607/8-Z
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,012	* 608-2Z	* 608-Z
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,012	* 608-2RSL	* 608-RSL
	22	7	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,012	* 608-2RSH	* 608-RSH
	22	11	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,016	630/8-2RS1	-
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	32 000	0,017	* 628-2Z	* 628-Z
	24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	32 000	0,017	* 628-2RZ	* 628-RZ
	24	8	3,9	1,66	0,071	-	19 000	0,017	* 628-2RS1	* 628-RS1
	28	9	4,62	1,96	0,083	60 000	30 000	0,030	638-2RZ	638-RZ
9	17	5	1,43	0,64	0,027	85 000	43 000	0,0043	628/9-2Z	628/9-Z
	17	5	1,43	0,64	0,027	-	24 000	0,0043	628/9-2RS1	-
	20	6	2,08	0,87	0,036	80 000	38 000	0,0076	619/9-2Z	-
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	34 000	0,014	* 609-2Z	* 609-Z
	24	7	3,9	1,66	0,071	70 000	34 000	0,014	* 609-2RSL	* 609-RSL
	24	7	3,9	1,66	0,071	-	19 000	0,014	* 609-2RSH	* 609-RSH
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	30 000	0,020	* 629-2Z	* 629-Z
	26	8	4,75	1,96	0,083	60 000	30 000	0,020	* 629-2RSL	* 629-RSL
	26	8	4,75	1,96	0,083	-	19 000	0,020	* 629-2RSH	* 629-RSH

⁸⁶ (SKF General catalogue, 2003, pág. 326)

[Step 2-c] Calculating the Design Power.....2GT/3GT Series

• Design Power (Pd) = Transmission Power (Pt) x Overload Coefficient (Ka)
 • Calculate the Transmission Power (Pt) in terms of the rated power of the prime motor. (Originally, it is ideal to calculate from the actual load applied to the belt)
 A: Normal Motor Load Factor (Ka) = Ko + Ki + Kr + Kh
 Ko: Load Correction Factor (Table 8) Ki: Idler Correction Factor (Table 9) Kr: Speed Multiplication Correction Factor (Table 10) Kh: Operation Time Correction Factor (Table 11)
 B: Servo Motor Kp, other table*

Table 8. Load Correction Factor (Ko)

Type of Motor		I	II	III	
Peak Output/Basic Output		150% or Less	Over 150%~200% or Less	Over 250%	
AC Motor	Single-Phase	-	-	All Types	
	Squirrel Cage Type	2 Phase	-	All Types	
		4 Phase	-	37Kw or More	30Kw or Less
		6 Phase - 8 Phase	-	-	All Types
	Wound Field Type	4 Phase	-	-	15Kw or Less
		6 Phase	-	-	11Kw or Less
8 Phase		-	-	5.5Kw or Less	
Synchronous Motor		-	Standard Torque Type	High Torque Type	
DC Motor		Shunt	Wound Field	Series	
Hydraulic Motor		-	-	All Types	
Office Machinery	Printer - Fax Machine - Copy Machine	-	1.2	1.4	
Home Appliance	Juicer	-	1.4	1.6	
	Vacuum Cleaner	1	1.2	1.4	
Finance Equipment	Bank of charge Table Machine - Table Printer - Book Table Machine	1.3	1.4	1.5	
	Bakery Equipment	1.2	1.4	1.6	
Food - Medicine - Medical Equipment	Mixer - Granulator	1.4	1.6	1.8	
	Centrifuge	1.5	1.7	1.9	
Machine Tool	Medical Machinery - Measurement Equipment	1	1.2	1.4	
	Drill Press - Lathe	1.2	1.4	1.6	
Printing Book Making	Milling Machine	1.3	1.5	1.7	
	Wood Lathe	1.2	1.4	1.6	
Textile Machine	Printer - Book Making Machine - Cutter	1.2	1.4	1.6	
Sawing Machine	Textile - Knitting Machinery	1.3	1.5	1.7	
	Sawing Machine - Home Use	-	1.2	1.4	
Belt Conveyor - Packaging Machine	Sawing Machine - Industrial	-	1.6	1.8	
	Belt Conveyor - Light Objects	1.1	1.3	1.5	
Film - Wire Making Machine	Packaging Machine	1.2	1.4	1.6	
	Calender - Extruder	1.4	1.6	1.8	
	Wire Making Machinery	1.4	1.6	1.8	

Table 12. Special Motor Correction Factor (Kp)

Motor Type	Load Correction Factor
Servo Motor	Design as Kp=2.5 for Rated Output, and Kp=0.5 for Peak Output (Rational speed as applied speed)
Spindle Motor	Design as Kp=2.2 for Rated Output and Base Rotational Speed

[Step 2-d] Calculating Designed Power For EV5GT/EV8YU Series

• Design Power (Pd) = Transmission Power (Pt) x Overload Factor (Ka)
 • Calculate Transmission Power at Motor Rated Power Output. (Ideally should be calculated with the load applied to the belt)
 • Overload Factor (Ka) = Ko + Ki + Kr + Kh + Km
 Ko: Load Correction Factor (Table 13) Ki: Idler Correction Factor (Table 14) Kr: Speed Multiplication Correction Factor (Table 15) Kh: Operation Time Correction Factor (Table 16) Km: Start/Stop Correction Factor (Table 17)

Table 13. Load Correction Factor (Ko)

Prime Motor Type		Induction Motor	Spindle Motor	Servo Motor (Peak Output/Rated Output)		
				200% or Less	201~299%	300% or More
Robot	Scara Type	2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Injection Molding Machine	Mill/Grinding Mill/Spinning	1.8	1.8	1.3	1.4	1.5
Machine Tool	Lathe - Drill Press	1.6	1.3	1.2	1.3	1.4
Machine Tool	Milling Machine	1.7	1.3	1.2	1.3	1.4
Conveyor		1.8	1.8	1.4	1.5	1.6
Medical Machinery - Measurement Equipment		1.5	1.5	1.1	0.1	0.2
Packaging Machine		1.6	1.5	1.1	0.1	0.2
Agitator - Mixer	Liquid	1.6	1.6	1.2	1.3	1.4
	Viscous Material	1.7	1.7	1.3	1.4	1.5
Drilling Machine - Granulator		1.8	1.8	1.4	1.5	1.6
Centrifuge		1.9	1.9	1.5	1.6	1.7
Mills	Ball - Rods	2.2	2.2	1.7	1.8	1.9
Printing Machine - Book Making Machine		2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Paper Making Machine	Calender - Dyer	2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Textile Machine		2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Wire Related	Wire Drawing & Stranding Machine	2.1	2.0	1.6	0.1	0.2
Woodworking Machine		1.7	1.7	1.2	1.3	1.4
Pump		2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Compressor	Reciprocating - Folding	2.0	2.0	1.6	1.7	1.8
Fan - Blower	Axial Flow - Roots	2.0	1.8	1.3	1.4	1.5
Generator - Exciter		1.8	1.8	1.4	1.5	1.6
Roller/Industry Machinery - Lumber Mill Machinery		2.0	2.0	1.6	1.7	1.8

Table 9. Idler Correction Factor (Ki)

Idler Position	Inside	Outside
Loose Side of the Belt	0	+0.1
Tense Side of the Belt	+0.1	+0.2

Table 10. Speed Multiplication Correction Factor (Kr)

Speed Increase Ratio	Correction Factor
1 or More Less than 1.25	0
1.25 or More Less than 1.75	+0.1
1.75 or More Less than 2.5	+0.2
2.5 or More Less than 3.5	+0.3
3.5 or More	+0.4

Table 11. Operation Time Correction Factor (Kh)

Operation Time	Correction Factor
Less than 10 hours (Everyday)	0
10~16 Hours Continuous (Everyday)	+0.2
16~24 Hours Continuous (Everyday)	+0.4
300 Hours/Year or Less (Seasonal operations etc.)	-0.2

Table 14. Idler Correction Factor (Ki)

No Idler	0
Inside Idler	0.1 x (Qty-1)
Outside Idler	0.1 x (Qty-1)

Table 15. Speed Multiplication Correction Factor (Kr)

Operation Duration (#hours/Day)	Correction Factor
1 or More Less than 1.25	0
1.25 or More Less than 1.75	0.1
1.75 or More Less than 2.5	0.2
2.5 or More Less than 3.5	0.3
3.5 or More	0.4

Table 16. Operation Time Correction Factor (Kh)

Operation Duration (#hours/Day)	Correction Factor
≤8	0.1
8<16	0.2
16≤	0.3

Table 17. Start/Stop Correction Factor (Km)

Start/Stop Frequency (Times/Day)	Correction Factor
≤10	0.1
11<100	0.2
101<500	0.3
501<	0.4

[Step 3] Temporarily Selecting the Type of Belt from Selection Guide Table

Table 18. Selection Guide Table 1 (MXL, XL, L, H, T5, T10)

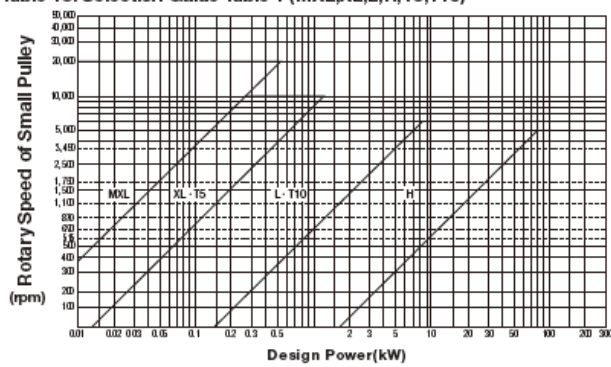


Table 19. Selection Guide Table 2 (S_M series)

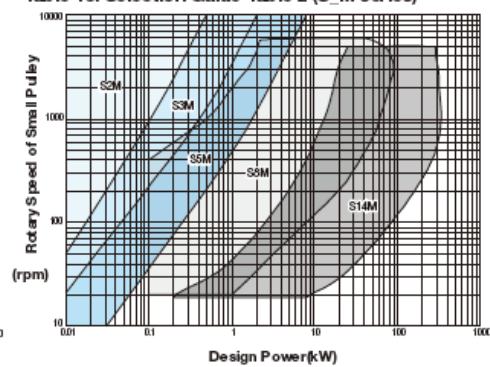


Table 20. Selection Guide Table 3 (P_M series)

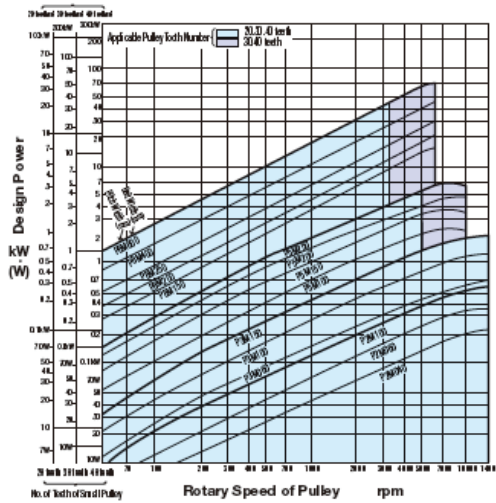


Table 21. Selection Guide Table 4 (MTS8M)

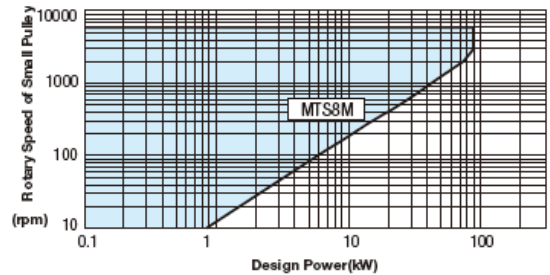


Table 22. Selection Guide Table 5 (UP_M series)

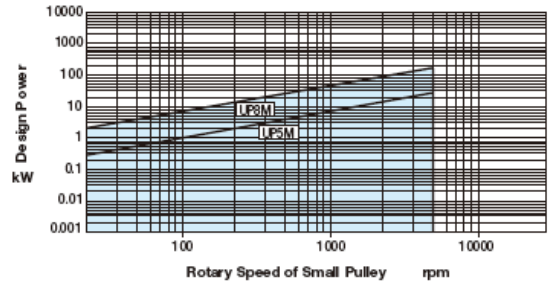


Table 23. Selection Guide Table (2GT-3GT series)

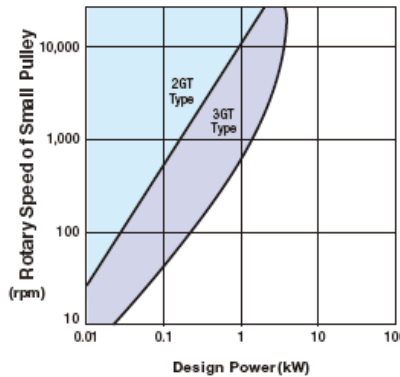
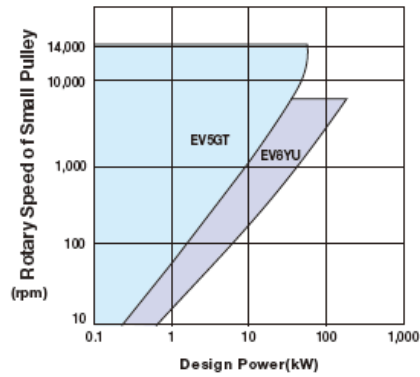


Table 24. Selection Guide Table (EV5GT-EV8YU series)



[Step 4] Determining Number of Teeth of Large and Small Pulley, Belt Length, Inter-Shaft Distance

(1) Select the number of teeth of large and small pulley from P.3519~3529, which can satisfy the predetermined speed ratio.
(However, note that the number of teeth for small pulley should be larger than the min. number of teeth shown in Table 25.)

$$\text{Speed Ratio} = \frac{\text{Number of Teeth of Large Pulley}}{\text{Number of Teeth of Small Pulley}}$$

Table 25. Min. Number of Teeth of Pulley

Rotary Speed of Small Pulley (rpm)	Type of Belt, Minimum Number of Teeth											
	MXL	XL	L	H	S2M	S3M	S5M	S8M	S14M	MTS8M	T5	T10
900 or Less	12	10	12	14	14	14	14	22	-	24	12	14
Over 900 1200 or Less	12	10	12	16	14	14	16	24	34	24	12	16
Over 1200 1800 or Less	14	11	14	18	16	16	20	26	38	24	14	18
Over 1800 3600 or Less	16	12	16	20	18	18	24	28	40	24	16	20
Over 3600 4800 or Less	-	16	20	24	20	20	26	30	48	24	20	22
Over 4800 10000 or Less	-	-	-	-	20	20	26	-	-	-	-	-

(2) Determine approx. belt circum. length (Lp') in terms of temporary inter-shaft distance (C'), diameter of large pulley (Dp) and diameter of small pulley (dp).

$$Lp' = 2C' + \frac{\pi(Dp+dp)}{2} + \frac{(Dp-dp)^2}{4C'}$$

C' : Temporary Inter-shaft Distance Dp : Pitch Diameter of Large Pulley (mm)
dp : Pitch Diameter of Small Pulley (mm) Lp' : Approx. Belt Circum. Length (mm)

(3) Determine a belt circum. length (Lp) that is the nearest value to approx. belt circum. length referring to P.1173~1184, and then calculate the correct inter-shaft distance using the following formula.

$$C = \frac{b + \sqrt{b^2 - 8(Dp-dp)^2}}{8}$$

Dp : Pitch Diameter of Large Pulley (mm) C : Inter-shaft Distance
dp : Pitch Diameter of Small Pulley (mm)
Lp : Belt Circum. Length (mm)

$$b = 2Lp - \pi(Dp+dp)$$

[Step 5] Determining Belt Width

(1) Calculate an approx. belt width using the following formula, and then select a belt width (Bw':mm) that is the nearest value to the approximated value.

$$Bw' = \frac{Pd}{Ps \cdot Km} \times Wp$$

Pd: Design Power
Ps: Reference Transmission Capacity Use the Reference Transmission Capacity Table on P.3519~3529.
Km: Engagement Correction Coefficient (Table 26)
Wp: Reference Belt Width (Table 27)

Table 26. Engagement Correction Coefficient (Km)

No. of Teeth Engaged Zm	More than 6	5	4	3	2
Km	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

Table 27. Reference Belt Width (Wp)

Type of Belt	MXL	XL	L	H	S2M	S3M	S5M	S8M	S14M	MTS8M
Reference Belt Width	6.4	25.4	25.4	25.4	4	6	10	60	120	60

$$\text{No. of Teeth Engaged (Zm)} = \frac{Zd\theta}{360^\circ}$$

$$\theta = 180^\circ - \frac{57.3(Dp-dp)}{C}$$

Type of Belt	P2M	P3M	P5M	P8M	T5	T10
Reference Belt Width	4	6	10	15	10	10

Zd: No. of Teeth of Small Pulley Dp: Pitch Diameter of Large Pulley (mm) C: Inter-shaft Distance (mm)
θ : Contact Angle (°) dp: Pitch Diameter of Small Pulley (mm)

(2) Check if Design Power (Pd) satisfies the following formula. (If not, select the belt width of one size larger again.)

$$Pd < Ps \cdot Km \cdot Kb$$

$$*2GT \cdot 3GT \cdot EV5GT \cdot EV8YU$$

$$Pd < Ps \cdot Km \cdot Kb \cdot KL$$

Pd : Design Power Km : Engagement Correction Coefficient Kb : Width Correction Coefficient (Table 28)
Ps : Reference Transmission Capacity KL : Length Correction Coefficient (Table 29)

Table 28. Width Correction Coefficient (Kb)

Type of Belt	Belt Width Nominal	Width Correction Coefficient Kb	Type of Belt	Belt Width Nominal	Width Correction Coefficient Kb	Type of Belt	Belt Width Nominal	Width Correction Coefficient Kb	Type of Belt	Belt Width Nominal	Width Correction Coefficient Kb
MXL	019	4.8	S2M	040	4	P2M	40	4	2GT	4	1.00
	025	6.4		060	6		60	6		6	1.67
	037	9.5		100	10	100	10	9	2.67		
	050	12.7		060	6	150	15	6	1.00		
XL	025	6.4	S3M	100	10	P5M	100	10	3GT	9	1.66
	031	7.9		150	15		150	15		15	2.97
	037	9.5	100	10	150	15	150	15	1.00		
	050	12.7	150	15	250	25	250	25	1.79		
L	050	12.7	S5M	250	25	P8M	150	15	EV5GT	9	0.53
	075	19.1		150	15		250	25		12	0.76
	100	25.4	250	25	100	10	150	15	1.00		
	150	38.1	150	15	150	15	150	15	0.71		
H	075	19.1	S8M	250	25	T5	200	20	EV8YU	15	0.71
	100	25.4		300	30		200	20		20	1.00
	150	38.1	MTS8M	400	40	250	25	250	25	1.29	
	200	50.8	S14M	400	40	250	25	250	25		
				600	60		500	50			

Table 29. Length Correction Coefficient (KL)

Length Correction Coefficient (KL)	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
2GT Belt Length (mm)	130 or less	131~182	183~280	281~419	420 or less
3GT Belt Length (mm)	190 or less	191~260	261~400	401~599	600 or less
EV5GT Belt Length (mm)	440 or less	441~550	551~800	801~1100	1001 or less
EV8YU Belt Length (mm)	600 or less	601~900	901~1250	1251~1799	1800 or less

Table 50. Reference Transmission Capacity of 2GT Ps -Belt Width 4mm-

(W)

Belt Speed of Small Pulley (rpm)	No. of Teeth of Small Pulley	Diameter of the Pitch Circle (mm)																	
		12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	36	40	44	48	50	60	72
		7.64	8.91	10.19	11.46	12.73	14.01	15.28	16.55	17.83	19.10	20.37	22.92	25.46	28.01	30.56	31.83	38.20	45.84
20		0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.7	1.9	2.2	2.5	2.6	3.4	4.0
40		0.8	1.0	1.1	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.1	3.6	4.1	4.6	4.9	6.3	7.6
60		1.1	1.4	1.6	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.4	5.1	5.8	6.6	7.0	9.1	10.9
100		1.7	2.1	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.5	4.9	5.4	5.9	6.9	8.0	9.1	10.3	11.0	14.3	17.2
200		3.0	3.6	4.3	5.0	5.7	6.4	7.2	8.0	8.8	9.7	10.6	12.5	14.5	16.6	18.9	20.1	26.4	31.7
300		4.2	5.0	5.9	6.9	7.9	8.9	10.0	11.1	12.3	13.6	14.9	17.6	20.4	23.5	26.8	28.5	37.7	45.3
400		5.2	6.3	7.4	8.6	9.9	11.2	12.6	14.1	15.6	17.2	18.8	22.3	26.0	30.0	34.3	36.5	48.5	58.2
500		6.1	7.4	8.8	10.2	11.8	13.4	15.1	16.8	18.7	20.6	22.6	26.8	31.4	36.2	41.4	44.1	58.8	70.6
600		7.0	8.5	10.1	11.8	13.5	15.4	17.4	19.4	21.6	23.8	26.2	31.2	36.5	42.2	48.3	51.5	68.9	82.6
700		7.8	9.5	11.3	13.2	15.2	17.4	19.6	21.9	24.4	27.0	29.6	35.3	41.4	48.0	55.0	58.7	78.6	94.4
800		8.6	10.5	12.5	14.6	16.8	19.2	21.7	24.3	27.1	30.0	33.0	39.4	46.2	53.6	61.5	65.6	88.2	105.8
870		9.1	11.1	13.3	15.5	17.9	20.5	23.2	26.0	28.9	32.0	35.2	42.1	49.5	57.5	66.0	70.4	94.7	113.7
900		9.3	11.4	13.6	15.9	18.4	21.0	23.8	26.7	29.7	32.9	36.2	43.3	50.9	59.1	67.9	72.4	97.5	117.0
1000		10.0	12.3	14.6	17.2	19.9	22.7	25.7	28.9	32.2	35.7	39.3	47.1	55.4	64.4	74.1	79.1	106.7	128.0
1160		11.1	13.6	16.3	19.1	22.1	25.4	28.8	32.3	36.1	40.0	44.2	53.0	62.5	72.7	83.7	89.5	121.0	145.2
1200		11.4	13.9	16.6	19.6	22.7	26.0	29.5	33.2	37.0	41.1	45.3	54.4	64.2	74.8	86.1	92.0	124.6	149.5
1400		12.6	15.4	18.5	21.8	25.3	29.1	33.0	37.2	41.6	46.2	51.1	61.4	72.6	84.7	97.7	104.5	141.9	170.3
1450		12.9	15.8	19.0	22.4	26.0	29.8	33.9	38.2	42.7	47.5	52.5	63.1	74.7	87.2	100.6	107.6	146.2	175.4
1600		13.7	16.8	20.3	23.9	27.8	32.0	36.4	41.1	46.0	51.2	56.6	68.2	80.8	94.4	109.0	116.6	158.8	190.6
1750		14.5	17.8	21.5	25.4	29.6	34.1	38.8	43.8	49.1	54.7	60.6	73.1	86.7	101.4	117.2	125.5	171.2	205.4
1800		14.7	18.2	21.9	25.9	30.2	34.8	39.6	44.7	50.2	55.9	61.9	74.7	88.6	103.7	119.9	128.4	175.3	210.3
2000		15.7	19.4	23.4	27.8	32.4	37.4	42.7	48.3	54.2	60.4	66.9	81.0	96.2	112.8	130.5	139.9	191.4	229.7
2400		17.4	21.7	26.3	31.2	36.6	42.3	48.4	54.9	61.8	69.0	76.6	93.0	110.9	130.2	151.1	162.1	222.8	267.3
2800		19.0	23.7	28.8	34.4	40.4	46.9	53.8	61.1	68.9	77.1	85.8	104.4	124.8	146.9	170.8	183.4	253.1	303.7
3200		20.3	25.5	31.1	37.3	43.9	51.1	58.6	66.9	75.6	84.7	94.4	115.2	138.1	162.9	189.8	204.0	282.4	338.9
3600		21.5	27.1	33.2	39.9	47.2	55.0	63.4	72.4	81.9	92.0	102.6	125.6	150.9	178.4	206.2	223.9	311.0	373.2
4000		22.6	28.6	35.1	42.4	50.2	58.7	67.8	77.5	87.9	98.9	110.5	135.6	163.2	193.3	225.9	243.2	338.9	406.7
5000		24.7	31.6	39.2	47.7	56.9	66.9	77.7	89.2	101.6	114.7	128.7	158.9	192.2	228.7	268.3	289.3	406.0	487.2
6000		26.2	33.8	42.4	52.0	62.5	73.9	86.3	99.6	113.8	129.0	145.1	180.2	219.1	261.7	308.1	332.7	469.8	563.8
7000		27.1	35.5	45.0	55.5	67.2	79.9	93.8	108.8	124.8	142.0	160.2	200.0	244.2	292.8	345.8	373.9	531.0	637.3
8000		27.6	36.6	46.9	58.4	71.1	85.2	100.4	117.0	134.7	153.8	174.1	218.4	267.8	322.2	381.6	413.2	590.0	708.0
10000		27.5	37.5	49.2	62.4	77.1	93.5	111.4	130.9	151.9	174.6	198.7	251.8	311.2	376.8	448.7	487.0	702.1	842.6
12000		28.0	38.9	49.8	64.4	81.0	99.5	119.8	142.0	166.1	192.1	220.0	281.4	350.3	426.8	510.7	555.6	807.9	969.5
14000		23.5	35.1	48.9	64.9	83.1	103.5	126.1	150.9	177.9	207.1	238.4	307.8	385.9	472.8	568.5	619.7	908.3	1090.0

*Because the durability in terms of hours decreases in the [---] marked range, this range should be avoided whenever possible. For other belt widths, values above should be multiplied by the width correction coefficient shown in Table 28.

**ANEXO B – PLANOS DEL EQUIPO DE MANUFACTURA
ADITIVA POR LÁMINAS DE EPS**

**ANEXO C – FOTOGRAFIAS DEL PROCEDIMIENTO DE
MONTAJE**



Figura C.0.1 Fotografía del procedimiento de ensamble de la estructura.

Fuente: Propia



Figura C.0.2 Fotografías del procedimiento de montaje de los ejes conductores y conducidos.

Fuente: Propia

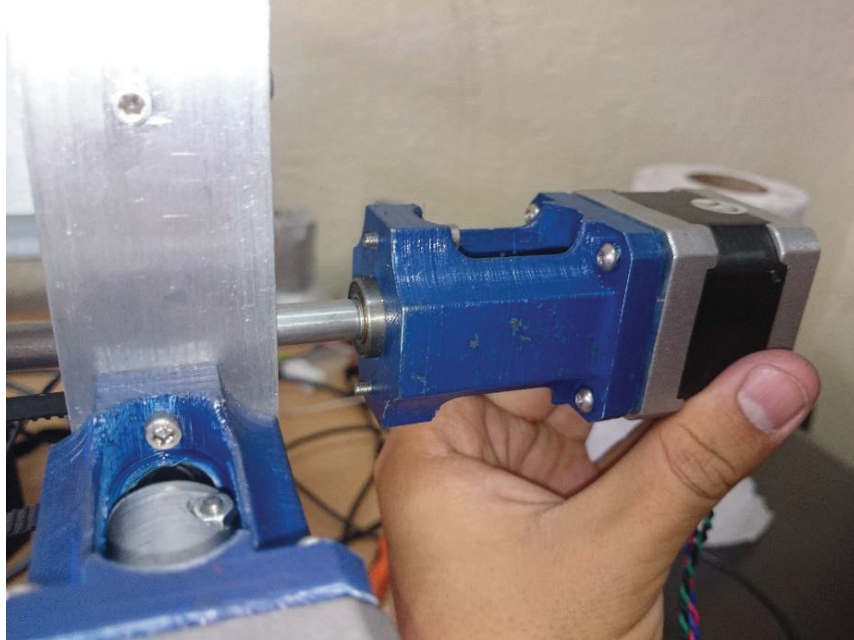


Figura C.0.3 Fotografía del procedimiento de montaje de los motores XY.

Fuente: Propia

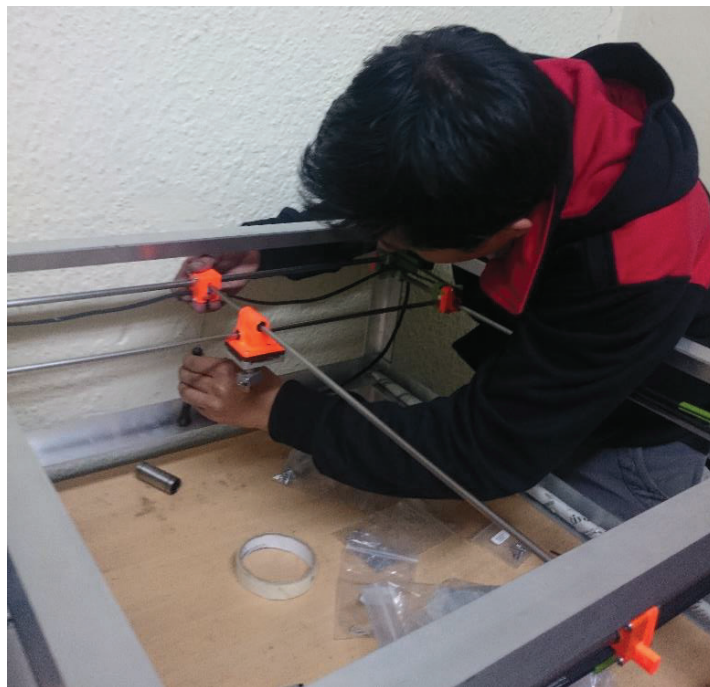


Figura C.0.4 Fotografía del procedimiento de montaje del cabezal de corte y las varillas horizontales.

Fuente: Propia

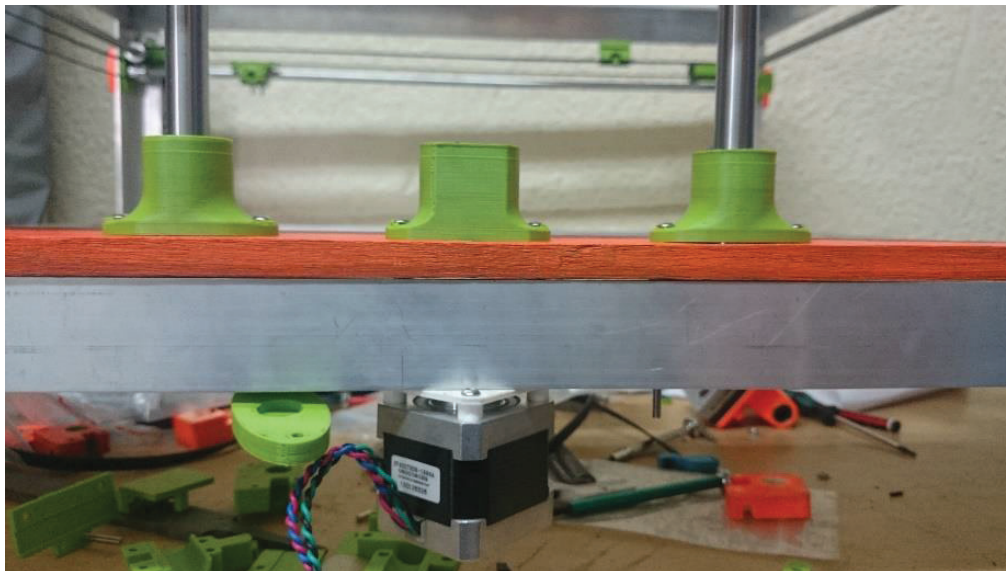


Figura C.0.5 Fotografía del procedimiento de montaje del sistema de movimiento vertical.

Fuente: Propia

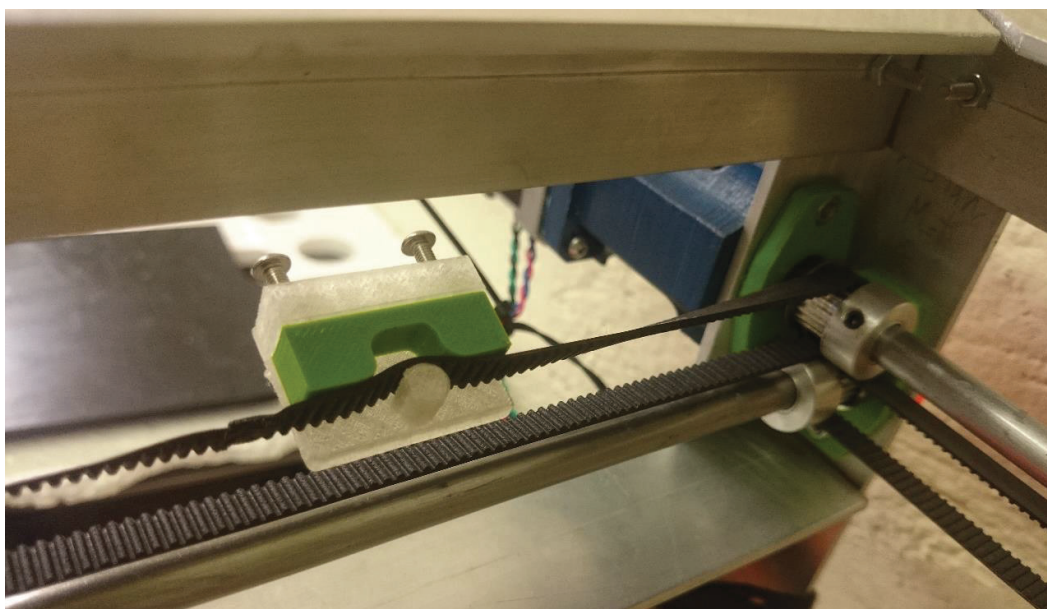


Figura C.0.6 Fotografía del montaje de los tensores en las bandas del equipo.

Fuente: Propia

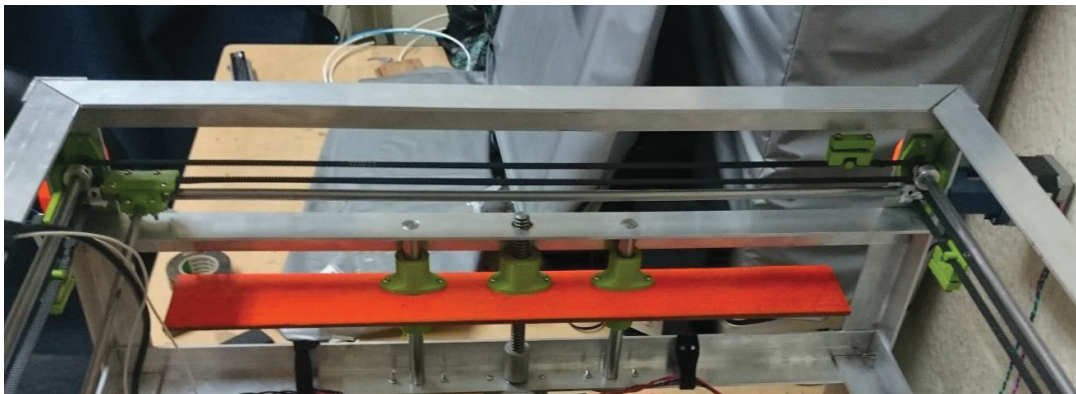


Figura C.0.7 Fotografía de las bandas y sensores montados en el equipo.

Fuente: Propia

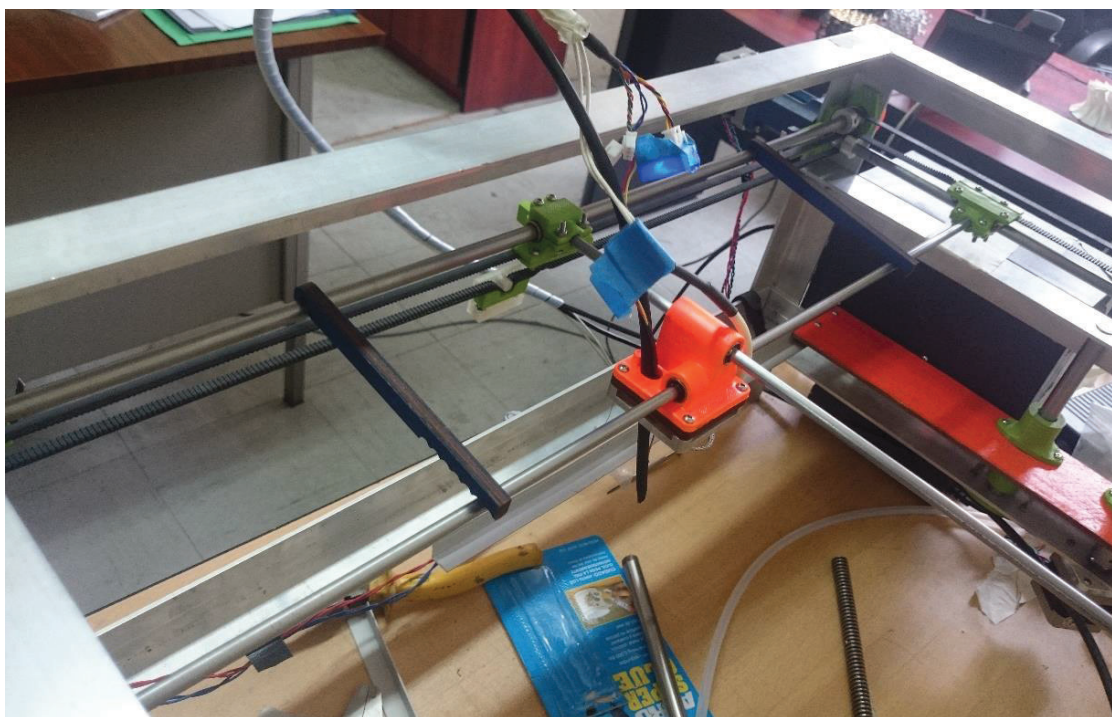


Figura C.0.8 Fotografía del procedimiento de alineación de las varillas horizontales del equipo.

Fuente: Propia

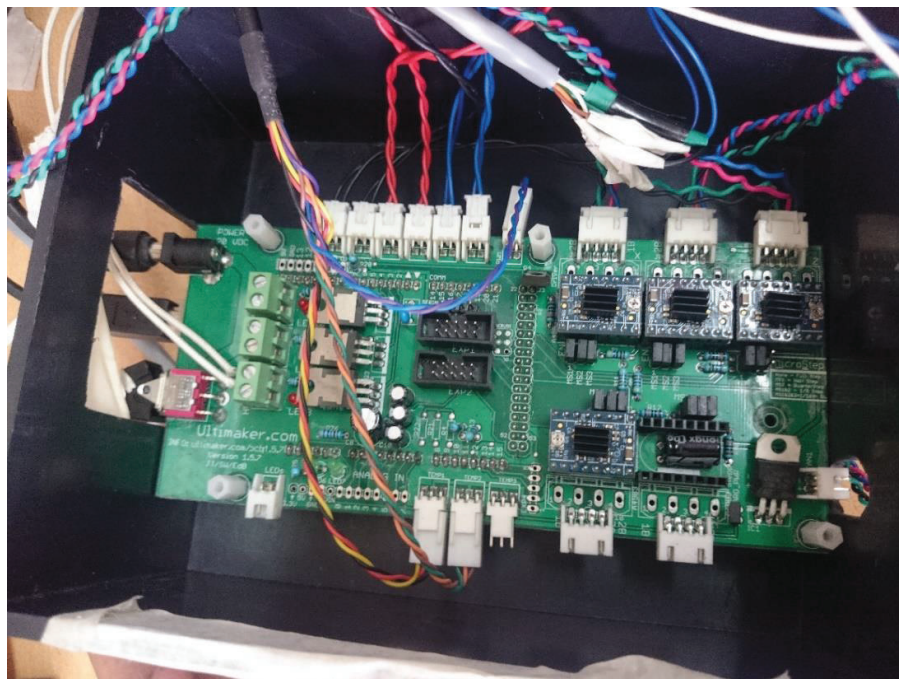


Figura C.0.9 Fotografía de la conexión de los componentes del equipo en la tarjeta electrónica.

Fuente: Propia