

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Diseño de metodología para medir maquinabilidad de piezas fabricadas  
por manufactura aditiva"

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Carlos Alfredo Avilés Bustamante

Jessica Lisseth Bayas Sanchez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Lupe Isabel Sanchez Gonzalez y Francisco Alejandro Bayas Bustamante por ser mis guías durante este largo caminar, porque a pesar de los momentos de quiebre nunca me soltaron de la mano y permitieron que siguiera hacia adelante, por el constante apoyo incondicional, moral y económico, y por hacer posible este logro aportando en mi toda su confianza y esperanza de que algún día cumpliría mi meta.

A mi hermano y demás seres queridos que han estado presentes en el trayecto de mi vida estudiantil.

**Jessica Lisseth Bayas Sanchez**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mi padre celestial, el creador de todo lo que amo, el que siempre me ha cuidado, con mi más sincero amor.

**Carlos Alfredo Avilés Bustamante**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por permitir que se efectúe este logro, a mis padres por ser mi principal fuente de enseñanza y valores, a mi hermano por ser mi compañero de aventuras y travesuras, a mis abuelitos por tenerme presente en sus oraciones, a mi familia en general por brindarme alegría y apoyo moral, a mis queridas amigas por compartir conmigo los más gratos y también angustiosos momentos, a esa persona especial y compañero que me ha brindado su amor y apoyo incondicional durante los últimos 3 años.

A mis profesores quienes me transmitieron su amplio conocimiento correspondiente a mi profesión, a mi tutor M.Sc. Fausto Maldonado por la constante asistencia ante las dudas surgidas durante la elaboración del proyecto, a mis compañeros en general.

**Jessica Lisseth Bayas Sanchez**

# AGRADECIMIENTOS

El tiempo es un concepto difícil de explicar, pero creo que muchos concuerdan en que es una de las cosas más valiosas que alguien puede ofrecer. La realización de este documento es un símbolo del esfuerzo y del tiempo invertido de un grupo de personas, de su ayuda y oraciones, por lo que quiero agradecer de la manera más humilde:

A Dios,

A mis familiares y seres queridos,

A mis amigos y,

A mis profesores.

**Carlos Alfredo Avilés Bustamante**

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Carlos Alfredo Avilés Bustamante* y *Jessica Lisseth Bayas Sanchez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

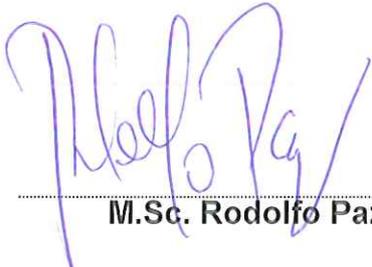
Carlos Alfredo Avilés  
Bustamante



---

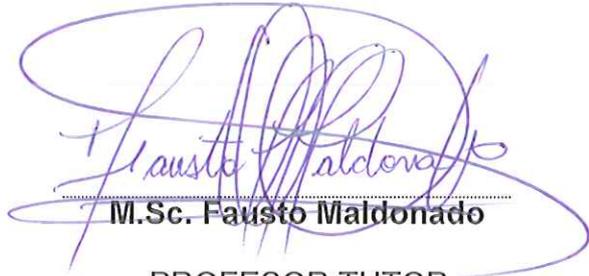
Jessica Lisseth Bayas  
Sanchez

## EVALUADORES



M.Sc. Rodolfo Paz

PROFESOR DE LA MATERIA



M.Sc. Fausto Maldonado

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La fabricación de componentes mediante el aporte controlado de material, a partir de un modelo virtual en tercera dimensión (3D), se conoce como fabricación o manufactura aditiva. A continuación, se realiza el diseño de una metodología para el estudio y análisis de la maquinabilidad de piezas fabricadas por este tipo de manufactura. Para lograrlo, se integran las operaciones más comunes de mecanizado y se utiliza la calidad superficial (rugosidad) como criterio de maquinabilidad. La aplicación de esta metodología contribuye en el ahorro de: tiempo de mecanizado, energía y materia prima. Lo cual colabora de forma positiva, en el cuidado del medio ambiente y al desarrollo de la industria.

Se prepararon dos grupos de 26 probetas, bloques de 30x30x10 mm y cilindros de 30 mm de diámetro x 60 mm de longitud, utilizados para los ensayos de fresado y torneado, respectivamente. La mitad de cada grupo, 13 piezas, se fabricaron en la impresora ProJet 3510 SD que utiliza la tecnología Material Jetting-Polyjet (MJP) y la mitad restante en la impresora Cube 3D que usa la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Se usó el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) como material de ensayo (material de las impresiones 3D) y el Polytec 1000 como material base para medir la maquinabilidad. Los ensayos se realizaron en dos máquinas-herramientas; la fresadora CNC marca ROLAND, modelo MDX 40A, con una herramienta de acero rápido con punta recta para fresado frontal y; el torno CNC marca DMTG, modelo CKE6136z, con una herramienta con inserto de carburo con código ISO DNMG 150608-PM para cilindrado. Los ensayos se realizaron usando cinco valores de velocidad del husillo, de avance y profundidad de corte, para fresado y torneado. Para la adquisición de las rugosidades superficiales, se usó un rugosímetro portátil marca Phase II, modelo SRG-4500.

Las piezas maquinadas con la operación de torneado reflejaron un índice de maquinabilidad de 0,368 y de 0,701 para la tecnología MJP y FDM, respectivamente. Para fresado, se obtuvieron índices de 0,854 y de 0,982 para la tecnología MJP y FDM, respectivamente. Adicional a esto, se obtuvieron menores valores de rugosidad utilizando valores de avance y profundidad de corte bajos, junto con velocidades rotacionales altas para la tecnología MJP y medias para la FDM.

Finalmente, se concluye que la metodología desarrollada resulta ser en un proceso experimental confiable para medir maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva. Además, las piezas impresas por la tecnología FDM, presenta un índice de maquinabilidad más elevado que las piezas impresas por MJF. También, de forma general, para torneado, la maquinabilidad de las probetas es entre baja y media y, para fresado, es alta. Siendo la velocidad avance el parámetro de corte más influyente en el acabado superficial para todas las operaciones realizadas.

**Palabras Clave:** Maquinabilidad, rugosidad superficial, fresado, torneado.

## **ABSTRACT**

*The manufacture of components the controlled contribution of material, from a virtual model in the third dimension (3D), is known as manufacturing or additive manufacturing. Next, the design of a methodology for the study and analysis of the machinability of parts manufactured by this type of manufacturing is elaborated. To achieve this, the most common machining operations are integrated and the surface quality (roughness) is used as a machinability criterion. The application of this methodology contributes to saving: machining time, energy and raw material. Which contributes positively, in the care of the environment and the development of the industry.*

*Two groups of 26 tests, a slab of 30x30x10 mm and cylinders of 30 mm in diameter x 60 mm in length, were prepared for the milling and turning test, respectively. Half of each group, 13 pieces, is manufactured on the ProJet 3510 SD printer using Material Jetting-Polyjet (MJP) technology and the and the rest in the Cube 3D printer using the fused deposition modeling (FDM) technology. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) was used as the test material and Polytec 1000 was used as a base material to measure machinability. The test was carried out in two machine tools; the CNC milling machine brand ROLAND, model MDX 40a, with a High-speed steel tool with straight tip for frontal milling and; The CNC lathe marks DMTG, model CKE6136z, with a tool with an insert of carbide with ISO code DNMG 150608-PM for tuning. The tests were carried out using the values of spindle speed, feed rate and cutting depth, for milling and turning. For the acquisition of surface roughness, a portable Phase II rugosimeter, model SRG-4500, was used.*

*The machined parts with the turning operation reflected a machinability index of 0.368 and 0.701 for the MJP and FDM technology, respectively. For milling, indexes of 0.854 and 0.982 were obtained for the MJP and FDM technology, respectively. In addition to this, lower roughness values were obtained using low advance and depth of cut values, along with high rotational speeds for MJP technology and means for FDM.*

*Finally, it is concluded that the methodology developed turns out to be a reliable experimental process to measure the machinability of parts manufactured by additive manufacturing. Furthermore, the pieces printed by FDM technology, it has a higher*

*machinability index than the pieces printed by MJP. Also, In general, for turning, the machinability of the test pieces is between low and medium, for milling is high. The speed advances the most influential cutting parameter in the surface finish for all the operations carried out.*

**Key Words:** *Machinability, surface roughness, milling, turning.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	III
ÍNDICE GENERAL .....	V
ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XVII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General .....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Maquinabilidad.....	2
1.4.2 Rugosidad Superficial .....	5
1.4.2.1 Medición de la rugosidad superficial .....	7
1.4.3 Manufactura Aditiva .....	8
1.4.3.1 Modelado por Deposición Fundida (FDM).....	10
1.4.3.2 Material Jetting – Polyjet (MJP).....	11
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología .....	12
2.1 Análisis del problema .....	12
2.1.1 Caja negra .....	12

2.1.2	Planteamiento de metodología experimental.....	13
2.2	Selección de la mejor alternativa de metodología experimental.....	14
2.2.1	Ponderación de criterios .....	14
2.2.2	Tabla Morfológica .....	16
2.2.2.1	Análisis de Tabla Morfológica.....	17
2.2.3	Matriz de selección .....	19
2.2.3.1	Análisis de la matriz de selección de la mejor alternativa .....	20
2.3	Metodología de proceso experimental.....	21
2.4	Diseño detallado.....	22
2.4.1	Equipos de impresión 3D.....	22
2.4.1.1	Cube 3D .....	22
2.4.1.2	ProJet 3510 SD.....	23
2.4.2	Máquinas-herramientas .....	24
2.4.2.1	Fresadora.....	24
2.4.2.2	Torno paralelo CNC .....	25
2.4.3	Equipo de medición .....	25
2.4.3.1	Rugosímetro portátil .....	25
2.4.4	Descripción de materiales de ensayo .....	26
2.4.4.1	Preparación de las probetas de prueba .....	27
2.4.5	Herramienta de corte .....	31
2.4.6	Selección de las condiciones de corte .....	33
2.4.6.1	Criterios de selección para condiciones de corte .....	34
2.4.6.2	Modelo de ensayo .....	35
2.4.6.3	Alternativas de condiciones de corte.....	40
2.5	Metodología experimental .....	44
2.5.1	Probetas de prueba .....	44
2.5.2	Probeta de material base .....	46

CAPÍTULO 3.....	48
3. Resultados y Análisis.....	48
3.1 Operaciones de torneado .....	48
3.1.1 Rugosidad inicial.....	48
3.1.2 Primera fase de ensayos – Avance .....	48
3.1.3 Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional .....	50
3.1.4 Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte .....	51
3.2 Operaciones de fresado .....	53
3.2.1 Rugosidad inicial.....	53
3.2.2 Primera fase de ensayos – Velocidad de avance .....	53
3.2.3 Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional .....	55
3.2.4 Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte .....	56
3.3 Ensayos en el material base Polytec 1000 - Acetal.....	58
3.3.1 Para torneado .....	58
3.3.2 Para fresado .....	59
3.4 Cálculo del Índice de Maquinabilidad (IM).....	59
3.5 Análisis de Costos.....	60
CAPÍTULO 4.....	62
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	62
4.1 Conclusiones.....	62
4.2 Recomendaciones.....	63
BIBLIOGRAFÍA	
APÉNDICES	

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ISO	International Organization for Standardization
MJP	Material Jetting - Polyjet
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
CNC	Control Numérico Computarizado
IM	Índice de Maquinabilidad
3D	Tercera dimensión

## SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
μm	Micras
in	Pulgada
ft	Pie
min	Minuto
h	Hora
gr	Gramo
rpm	Revoluciones por minuto
rev	Revoluciones
p	Profundidad de corte
f	Avance
fn	Velocidad de avance
N	Velocidad rotacional
Ra	Rugosidad superficial media
\$	Dólares americanos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Factores que afectan la maquinabilidad. ....	3
Figura 1.2 Rasgos de la textura de una superficie. ....	6
Figura 1.3 Orientaciones posibles de una superficie. ....	6
Figura 1.4 Coordenadas para medir rugosidad usando la ecuación 1.2. ....	7
Figura 1.5 (a) Medición de la rugosidad con un estilete. (b) Trayectoria del estilete. ....	8
Figura 1.6 Principales tecnologías de manufactura aditiva para materiales poliméricos y cerámicos. ....	9
Figura 1.7 Esquema de proceso de la tecnología FDM. ....	10
Figura 1.8 Esquema de proceso de la tecnología MJP. ....	11
Figura 2.1 Caja Negra. ....	13
Figura 2.2 Diagrama de bloques de la metodología del proceso experimental. ....	21
Figura 2.3 Equipo de impresión Cube 3D. ....	23
Figura 2.4 Equipo ProJet 3510SD. ....	24
Figura 2.5 Esquema del equipo CNC ROLAND MDx-40A. ....	24
Figura 2.6 Torno paralelo CNC modelo CKE6136Z. ....	25
Figura 2.7 Rugosímetro digital SRG-4500. ....	25
Figura 2.8 Esquema de plásticos técnicos. ....	26
Figura 2.9 Probetas de tecnología FDM para torneado. ....	29
Figura 2.10 Probetas de tecnología MJP para torneado. ....	29
Figura 2.11 Probeta de tecnología FDM para fresado. ....	30
Figura 2.12 Probeta de tecnología MJP para fresado. ....	30
Figura 2.13 Probeta de material Polytec 1000 (Acetal). ....	31
Figura 2.14 Inserto DNMG 150608-PM. ....	32
Figura 2.15 Fresa helicoidal. ....	33
Figura 3.1 Evolución de la rugosidad superficial media en función del avance, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado. ....	49
Figura 3.2 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad del husillo, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado. ....	51
Figura 3.3 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la profundidad de corte, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado. ....	52
Figura 3.4 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad de avance, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado. ....	54

Figura 3.5 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad del husillo, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado.....	56
Figura 3.6 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la profundidad de corte, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado.....	57
Figura 0.1 Estructura o forma de Infill de pieza fabricada por tecnología FDM. ....	104
Figura 0.2 Ilustración de una medición “Fuera de Rango” (F.R.) en una pieza fabricada por tecnología FDM.....	104
Figura 0.3 Piezas de trabajo de la primera fase de ensayo de la tecnología MJP para torneado.....	105
Figura 0.4 Piezas de trabajo de la tecnología MJP N. °3; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).....	105
Figura 0.5 Piezas de trabajo de la tecnología MJP N. °4; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).....	106
Figura 0.6 Piezas de trabajo de la tecnología MJP N. °5; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).....	106
Figura 0.7 Piezas de trabajo de la primera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado.....	107
Figura 0.8 Pieza de trabajo N.º 3 de la primera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.....	107
Figura 0.9 Piezas de trabajo de la segunda fase de ensayo de la tecnología MJP para torneado y, la mejor probeta de la primera fase (N.º1).....	108
Figura 0.10 Piezas de trabajo de la segunda fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado y, la mejor probeta de la primera fase (N.º1).....	108
Figura 0.11 Pieza de trabajo N.º 8 de la segunda fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.....	109
Figura 0.12 Piezas de trabajo de la tercera fase de ensayo de la tecnología MJP para torneado y, la mejor probeta de la segunda fase (N.º1).....	109
Figura 0.13 Piezas de trabajo de la tercera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado y, la mejor probeta de la segunda fase (N.º9).....	110
Figura 0.14 Pieza de trabajo N.º 13 de la tercera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.....	110
Figura 0.15 Pieza de trabajo N.º 1 de la tecnología MJP para torneado, presenta el mejor acabado superficial.....	111

Figura 0.16 Pieza de trabajo N.º 9 de la tecnología FDM para torneado, presenta el mejor acabado superficial.....	111
Figura 0.17 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado. ....	112
Figura 0.18 Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado.....	112
Figura 0.19 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, rotuladas.....	113
Figura 0.20 Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado, rotuladas. ....	113
Figura 0.21 Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado, después del mecanizado.....	114
Figura 0.22 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, después del mecanizado.....	114
Figura 0.23 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, durante el mecanizado.....	115
Figura 0.24 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, durante la medición de rugosidad superficial.....	115

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Intervalos de índice de maquinabilidad respecto al material base.....	4
Tabla 1.2 Criterios de ponderación de maquinabilidad.....	5
Tabla 1.3 Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva.....	8
Tabla 2.1 Planteamiento de metodología experimental.....	13
Tabla 2.2 Comparación por pares de criterios de selección para la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.....	15
Tabla 2.3 Importancia relativa de los criterios de selección para la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.....	15
Tabla 2.4 Tabla morfológica. Características y medios del diseño.....	17
Tabla 2.5 Alternativas de metodología de proceso experimental.....	18
Tabla 2.6 Matriz de selección de la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.....	20
Tabla 2.7 Especificaciones técnicas de impresora Cube.....	22
Tabla 2.8 Ficha Técnica de ProJet 3510 SD.....	23
Tabla 2.9 Datos técnicos del rugosímetro SRG 4500.....	26
Tabla 2.10 Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales a ensayar.....	27
Tabla 2.11 Parámetros de impresión de las piezas de ensayo.....	28
Tabla 2.12 Características principales del material de trabajo para torneado.....	28
Tabla 2.13 Características principales del material de trabajo para fresado.....	30
Tabla 2.14 Profundidad de corte recomendada y avance de corte, métrico. Inserto T-Max P para torneado.....	32
Tabla 2.15 Características de la herramienta de corte para fresado.....	32
Tabla 2.16 Objetivos características, medios, criterios para acabado superficial y restricciones para obtener las mejores condiciones de corte.....	34
Tabla 2.17 Condiciones de corte para plásticos técnicos para operaciones de fresado y torneado.....	35
Tabla 2.18 Velocidad de corte y avance en sistemas inglés e internacional.....	36
Tabla 2.19 Recomendaciones generales para operaciones de torneado.....	36
Tabla 2.20 Intervalos de condiciones de corte.....	37
Tabla 2.21 Condiciones de corte referenciales para torneado.....	37
Tabla 2.22 Velocidades de Corte y Avance para fresado.....	38
Tabla 2.23 Condiciones de corte para fresado.....	39

Tabla 2.24 Condiciones de corte para el fresado. ....	40
Tabla 2.25 Alternativas de condiciones de corte para torneado. ....	41
Tabla 2.26 Alternativas de condiciones de corte para fresado. ....	42
Tabla 2.27 Alternativas de condiciones de corte. ....	43
Tabla 2.28 Propuesta de identificación de probetas ensayadas.....	44
Tabla 3.1 Medición de rugosidad superficial media de la primera fase del ensayo para torneado.....	48
Tabla 3.2 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para torneado.....	50
Tabla 3.3 Medición de rugosidad superficial media de la tercera fase del ensayo para torneado.....	52
Tabla 3.4 Medición de rugosidad superficial media de la primera fase del ensayo para fresado.....	54
Tabla 3.5 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para fresado.....	55
Tabla 3.6 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para fresado.....	57
Tabla 3.7 Medición de rugosidad media del material base para torneado. ....	58
Tabla 3.8 Medición de rugosidad media del material base para fresado.....	59
Tabla 3.9 Costos de alquiler de máquinas herraminetas.....	61
Tabla 3.10 Costos de fabricación de las probetas.....	61
Tabla 3.11 Valor total final de costos de fabricación y experimentación. ....	61
Tabla 0.1 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología MJP . para torneado.....	69
Tabla 0.2 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología FDM para torneado.....	70
Tabla 0.3 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología MJP . para fresado.....	71
Tabla 0.4 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología FDM para fresado.....	72
Tabla 0.5 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJP para torneado.....	73
Tabla 0.6 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (avance) para torneado, tecnología MJP.....	75

Tabla 0.7 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (avance) para torneado, tecnología FDM.....	76
Tabla 0.8 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para torneado, tecnología MJP.....	78
Tabla 0.9 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para torneado, tecnología FDM.....	79
Tabla 0.10 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para torneado, tecnología MJP.....	81
Tabla 0.11 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para torneado, tecnología FDM.....	82
Tabla 0.12 Control de medición de rugosidad inicial de la probeta del material base para torneado.....	84
Tabla 0.13 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología MJP en torneado.....	84
Tabla 0.14 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología FDM en torneado.....	85
Tabla 0.15 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJP para fresado, medición longitudinal.....	86
Tabla 0.16 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJP para fresado, medición transversal.....	87
Tabla 0.17 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología MJP, medición longitudinal.....	88
Tabla 0.18 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología MJP, medición transversal.....	89
Tabla 0.19 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.....	90
Tabla 0.20 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.....	91

Tabla 0.21 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología MJP, medición longitudinal.....	93
Tabla 0.22 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología MJP, medición transversal.....	94
Tabla 0.23 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.....	95
Tabla 0.24 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.....	96
Tabla 0.25 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología MJP, medición longitudinal.....	97
Tabla 0.26 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología MJP, medición transversal.....	98
Tabla 0.27 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.....	99
Tabla 0.28 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.....	100
Tabla 0.29 Control de medición de rugosidad inicial de la probeta del material base para fresado.....	101
Tabla 0.30 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología MJP en fresado.....	102
Tabla 0.31 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología FDM en fresado.....	103

# ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Placa .....	117
Plano 2. Eje .....	118

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

La manufactura aditiva permite crear objetos agregando material, frecuentemente capa por capa, a través de modelos de cómputo; cuenta con una amplia gama de tecnologías para su aplicación, que permiten la fabricación de piezas en diferentes materiales y variadas geometrías. Este tipo de piezas son utilizadas en diversos campos como: médico, ingenieril, artístico, entre otros. Sin embargo, la funcionalidad de estas piezas se ve limitada por el acabado superficial obtenido después de su fabricación, con altas rugosidades y tolerancias.

### 1.2 Justificación del proyecto

Los procesos aditivos son considerados como sistemas adecuados para la fabricación de prototipos (modelos para visualización no funcionales) debido a las características mecánicas finales de los mismos. Sin embargo, con el avance de la tecnología y materiales para manufactura aditiva, actualmente se obtienen piezas con mejores propiedades mecánicas, resultando en que sean funcionales para aplicaciones de ingeniería.

Buscando ampliar el campo de aplicación de las piezas impresas en tercera dimensión (3D) y teniendo en cuenta las restricciones de funcionalidad que presentan por su acabado superficial, se plantea realizar un mecanizado posterior que permita a la pieza alcanzar una calidad de superficie más alta.

La aplicación de operaciones de maquinado a piezas fabricadas por manufactura aditiva produce menor desperdicio de material debido a las tolerancias que puede alcanzar, en comparación con otro proceso de manufactura, lo que implica, menor tiempo de mecanizado, menor consumo de energía y menor requerimiento de materia prima. Esto contribuye en forma

positiva al cuidado del medio ambiente, y permite a la industria ofrecer productos personalizados de calidad.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una metodología para el estudio y análisis de la maquinabilidad de un elemento fabricado mediante la tecnología de manufactura aditiva en un proceso convencional de mecanizado.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Establecer la maquinabilidad de piezas impresas en 3D.
2. Analizar la influencia de diferentes condiciones de corte para el fresado o torneado de una pieza fabricada por manufactura aditiva.
3. Determinar las mejores condiciones de corte que deben ser empleadas en el mecanizado de una pieza fabricada por manufactura aditiva para la obtención de una adecuada calidad superficial.

## **1.4 Marco teórico**

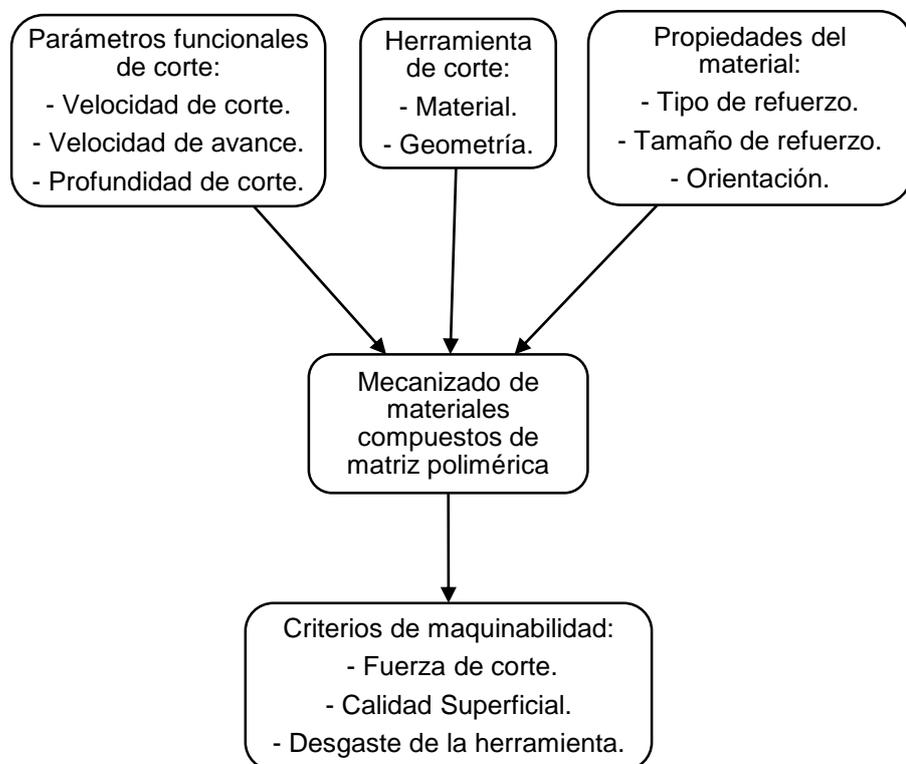
### **1.4.1 Maquinabilidad**

La maquinabilidad se refiere a la relativa facilidad que tiene un material para ser mecanizado, bajo las herramientas y condiciones de corte adecuados. Las propiedades de los materiales de trabajo, el tipo de operación de mecanizado, el material de la herramienta y las condiciones de corte influyen considerablemente en el desempeño del maquinado. Un buen desempeño implica que se obtuvo un buen acabado superficial, larga vida útil de la herramienta y poca impresión de fuerza y potencia. Respecto a las virutas, independiente de su tipo, si se enredan en la zona de corte pueden disminuir en gran manera el desempeño. (Schmid, 2008)

En la práctica de maquinado, usualmente, se considera que la vida útil de la herramienta y la rugosidad superficial son los criterios más importantes de la maquinabilidad. (Schmid, 2008). Sin embargo, esos criterios están

influenciados por las condiciones, herramientas y fluidos de corte de la operación de mecanizado en particular, así como la forma de la herramienta. (Groover, 2007)

La Figura 1.1 muestra los diferentes factores influyentes en el mecanizado de materiales plásticos; en especial, los relacionados con los parámetros o condiciones de corte, a las propiedades del material y la herramienta de corte. (Francisco Mata Cabrera, 2011)



**Figura 1.1 Factores que afectan la maquinabilidad.**

Fuente: (Francisco Mata Cabrera, 2011)  
Elaboración propia.

**Desempeño relativo o Índice de Maquinabilidad (IM):** La capacidad relativa de un material al mecanizado se expresa comúnmente por medio de un valor adimensional llamado índice de maquinabilidad. Se define como un patrón con relación al cual establecer comparaciones que nos permitan reconocer la mayor o menor facilidad/dificultad para el mecanizado. (Francisco Mata, 2010)

Para comparaciones, se establece un material como base y se le asigna un índice de maquinabilidad igual a uno (1). Se sugiere que el material seleccionado como base de comparación disponga de propiedades medias respecto a la gama de materiales existentes. La Tabla 1.1 señala los intervalos de ponderación del índice respecto al material base. (Groover, 2007)

**Tabla 1.1 Intervalos de índice de maquinabilidad respecto al material base.**

Material de Trabajo	IM
Más difícil de maquinar	<1.00
Material base	=1.00
Más fácil de maquinar	>1.00

Fuente: (Groover, 2007)  
Elaboración propia.

**Propuesta de índice de maquinabilidad:** La rugosidad superficial es un criterio importante para evaluar la maquinabilidad de un material. (Francisco Mata, 2010). Con respecto a este parámetro, se propone un nuevo índice de maquinabilidad definido mediante la siguiente relación:

$$\frac{IM_{material\ de\ prueba}}{IM_{material\ base}} = \frac{Ra_{material\ base}}{Ra_{material\ de\ prueba}} ; IM_{material\ base} = 1$$

Obteniendo.

$$IM_{material\ de\ prueba} = \frac{Ra_{(material\ base)}}{Ra_{(material\ de\ prueba)}} \quad (1.1)$$

Siendo,  $Ra_{(material\ base)}$  la rugosidad superficial media ( $\mu m$ ) del material definido como base de comparación,  $Ra_{(material\ de\ prueba)}$  la rugosidad superficial media ( $\mu m$ ) del material de ensayado. Se espera obtener en un solo valor un indicador de la maquinabilidad que considere este criterio para así establecer comparaciones entre materiales.

La Tabla 1.2 muestra los criterios de ponderación de maquinabilidad establecidos (según criterio técnico) para el análisis, según la disposición del material al maquinado.

**Tabla 1.2 Criterios de ponderación de maquinabilidad.**

Criterio de ponderación de maquinabilidad	
%	Disposición al maquinado
0 - 40	Baja
40 -70	Media
70 - 100	Alta

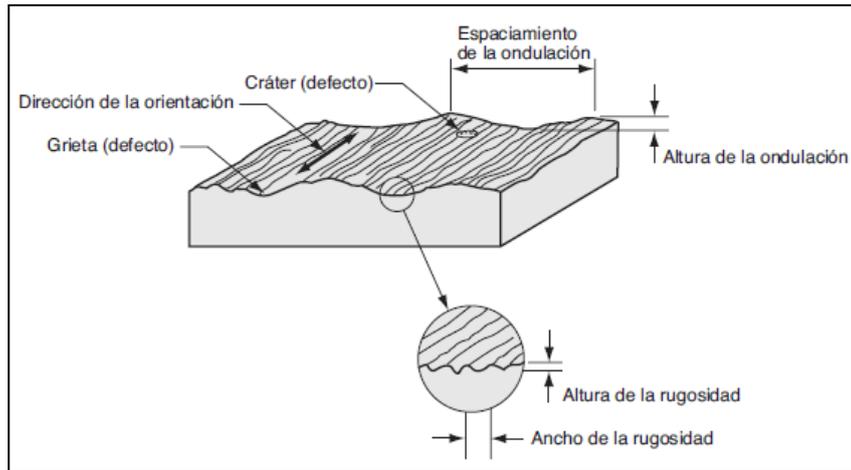
Fuente: Elaboración propia.

#### **1.4.2 Rugosidad Superficial**

La rugosidad superficial depende de las características del material, y del proceso mediante el cual se formó la superficie; son pequeñas desviaciones de la superficie nominal de una pieza, espaciadas finamente; ocurren debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamientos térmicos, y factores similares.

La Figura 1.2 muestra un esquema de los rasgos de la textura de una superficie. La rugosidad está sobreimpuesta a la ondulación; desviaciones de espaciamiento mucho mayor que ocurren debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamientos térmicos y factores similares.

La orientación es el patrón de la textura de la superficie. La Figura 1.3 indica las orientaciones posibles de una superficie. La forma de la superficie está determinada por el método de manufactura utilizado, por lo general a partir de la acción de una herramienta de corte. En la superficie también se producen defectos que son irregularidades que ocurren en forma ocasional; incluyen grietas, rayaduras, inclusiones y otros defectos similares. Aunque algunos de los defectos se relacionan con la textura de la superficie también afectan su integridad. (Schmid, 2008)



**Figura 1.2 Rasgos de la textura de una superficie.**

Fuente: (Groover, 2007)

Símbolo de la direccionalidad	Interpretación	Ejemplos
— =	Direccionalidad paralela a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
⊥	Direccionalidad perpendicular a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
X	Direccionalidad angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a la que se aplica el símbolo	
P	Direccionalidad picada, protuberante, porosa o de partículas sin dirección	

**Figura 1.3 Orientaciones posibles de una superficie.**

Fuente: (Schmid, 2008)

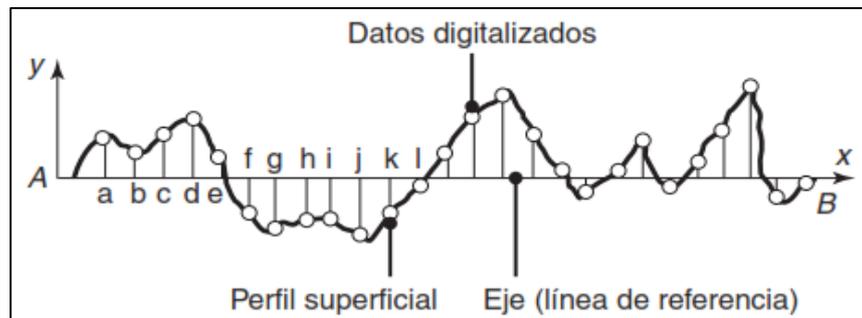
En la década de 1950 se adoptó internacionalmente el valor medio aritmético ( $R_a$ ) como método para describir la rugosidad de una superficie, debido a su simplicidad y su amplio uso en la práctica de ingeniería.

**El valor medio aritmético ( $R_a$ )** se basa en el esquema de una superficie rugosa, como se muestra en la Figura 1.2. Se define como:

$$R_a = \frac{a+b+c+d+\dots}{n} \quad (1.2)$$

En donde todas las ordenadas,  $a, b, c, \dots$ , son valores absolutos y  $n$  es la cantidad de lecturas.

La línea de referencia  $AB$ , en la Figura 1.4, se ubica de forma que la suma de las áreas arriba de la línea es igual a la suma de las áreas debajo de la misma. Frecuentemente, las unidades utilizadas para la rugosidad superficial son  $\mu\text{m}$  (micras).



**Figura 1.4 Coordenadas para medir rugosidad usando la ecuación 1.2.**

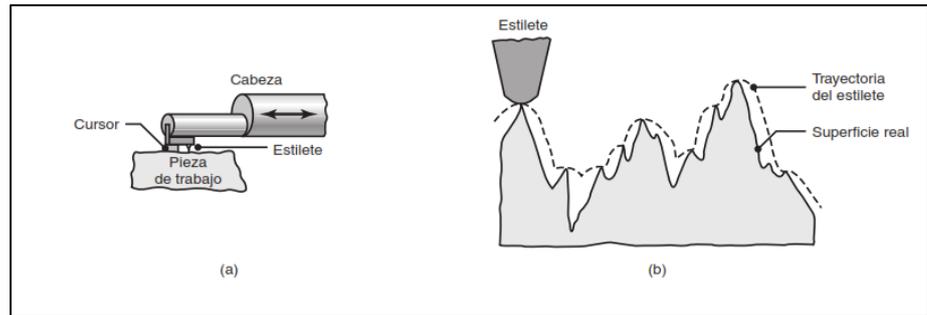
Fuente: (Schmid, 2008)

#### 1.4.2.1 Medición de la rugosidad superficial

Para medir la rugosidad superficial se emplean instrumentos conocidos como rugosímetros superficiales. Estos equipos constan de un estilite de diamante que avanzan sobre el perfil en líneas rectas, llamadas recorrido. Los recorridos van desde 8mm hasta 25 mm (0,003 a 1 in).

El método consiste en procurar que el recorrido sea lo suficientemente grande para incluir 10 a 15 irregularidades de rugosidad, y toda la ondulación superficial. El estilite forma diferentes perfiles dependiendo del tipo de proceso de maquinado y acabados superficiales que presente la pieza, estos perfiles pueden estar en escalas verticales u horizontales.

La Figura 1.5 ilustra los componentes involucrados en la medición de la rugosidad superficial y la trayectoria del estilite.



**Figura 1.5 (a) Medición de la rugosidad con un estilote. (b) Trayectoria del estilote.**

Fuente: (Schmid, 2008)

### 1.4.3 Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva consiste en la conformación de piezas por medio de la deposición de un material, el cual es controlado a escalas diminutas. Debido a su eficiencia, son muchas las tecnologías que utilizan este tipo de manufactura. Además, se puede lograr buena precisión en el aporte de material, lo que presenta diversas posibilidades para el diseñador y para el desarrollo de productos y piezas de todo tipo con aplicaciones importantes en medicina, en la industria metalmeccánica, entre otros. Por otro lado, el tiempo de proceso se reduce considerablemente, con el correcto uso.

La Tabla 1.3 enlista varias de las ventajas y limitaciones presentes en la manufactura aditiva.

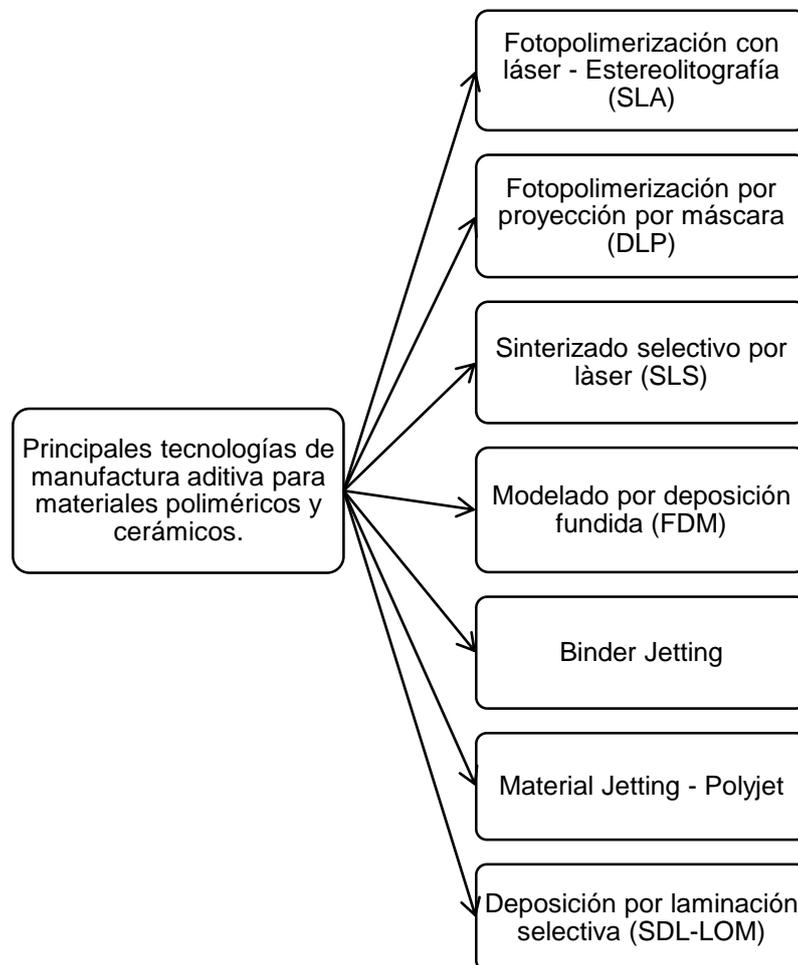
**Tabla 1.3 Ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva.**

Ventajas	Limitaciones
Complejidad geométrica, personalización	Tecnologías AM en desarrollo
Libertad creativa	Procesos periféricos y auxiliares
Adaptación al mercado	Desconocimiento de los diseñadores
Acceso a nuevos nichos de mercado	Disponibilidad y coste de la materia prima
Mecanismos integrados	Acabado superficial
Reducción de peso, productos aligerados	Velocidad de fabricación
Reducción del <i>time to market</i>	Calidad del producto y repetibilidad del proceso
Reducción de costes de procesos intermedios	Tamaño limitado de piezas
Procesos híbridos	Costes de la maquinaria

Fuente: (Zahera, 2012)  
Elaboración propia.

Entre sus ventajas está: la personalización en masa, en donde se une la creatividad y el criterio de ingeniería; la complejidad geométrica; y procesos con desperdicio nulo, lo que conlleva a un ahorro de material (dinero). Entre sus limitaciones tenemos el acabado superficial; esta limitación se corrige combinando procesos convencionales (sustractivos) de mecanizado. (Zahera, 2012)

Las principales tecnologías de manufactura aditiva para materiales poliméricos y cerámicos se pueden clasificar como muestra la Figura 1.6.



**Figura 1.6 Principales tecnologías de manufactura aditiva para materiales poliméricos y cerámicos.**

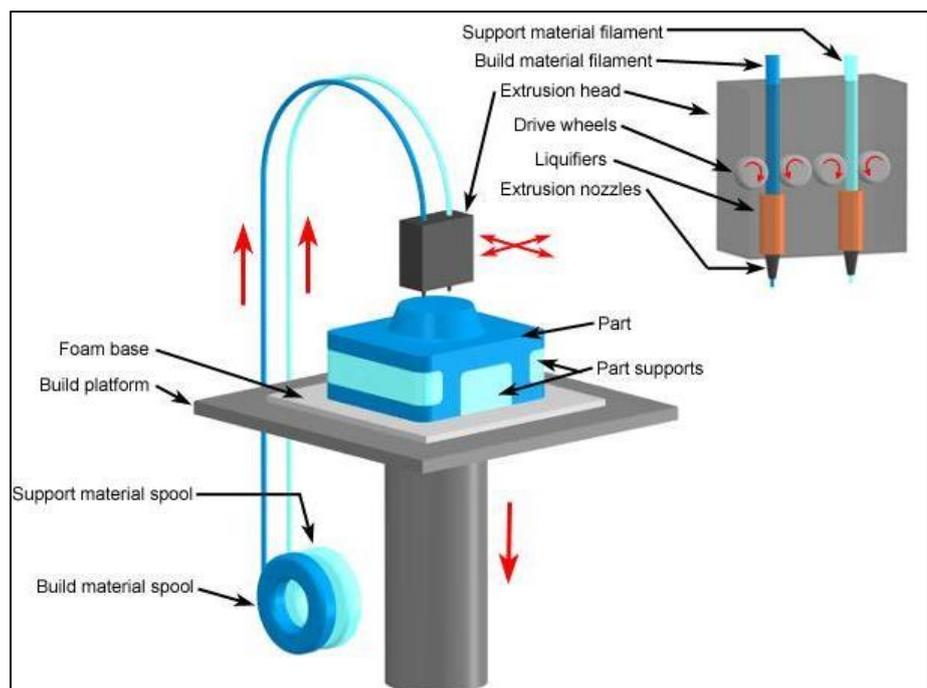
Fuente: ((ATIGA), 2017).

Elaboración propia.

A continuación, describimos dos de las tecnologías de manufactura aditiva mostradas en la Figura 1.6. Estas son: Moldeado por Deposición Fundida (FDM) y Material Jetting-Polyjet (MJP).

#### 1.4.3.1 Modelado por Deposición Fundida (FDM)

Conocida como *Fused Deposition Modeling (FDM)* o *Fused Filament Fabrication (FFF)*, consiste en la deposición de un termoplástico fundido a través de un cabezal de extrusión de temperatura controlada, capa a capa, sobre una plataforma de fabricación. El tamaño máximo del modelo es de 914x610x914 mm. La Figura 1.7 ilustra el proceso de la tecnología de impresión FDM.



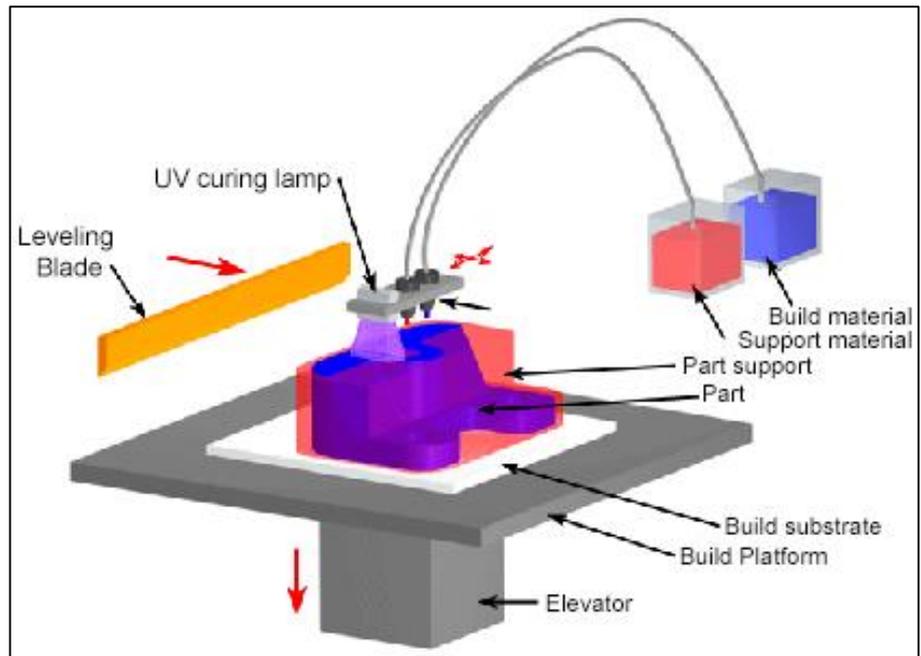
**Figura 1.7 Esquema de proceso de la tecnología FDM.**

Fuente: 3D Natives

Compatible con muchos polímeros termoplásticos como ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), policarbonato, PPSF y ULTEM. El espesor mínimo de capa depende del material empleado, 0,13-0,25mm para ABS; 0,18-0,25mm para PC.

### 1.4.3.2 Material Jetting – Polyjet (MJP)

Este proceso consiste en la deposición de diminutas gotas de material, frecuentemente fotopolímero, a través de múltiples inyectores las mismas que se curan al interactuar con luz UV. La Figura 1.8 ilustra el proceso de la tecnología de impresión MJP.



**Figura 1.8 Esquema de proceso de la tecnología MJP.**

Fuente: Loughborough University

El espesor mínimo de capa es de 0,017mm. Amplia gama de materiales, entre ellos están las resinas traslucidas, polipropileno, ABS o resinas elásticas. ((ATIGA), 2017)

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

A fin de determinar un valor que indique la maquinabilidad de una pieza fabricada por manufactura aditiva, y que relacione uno de los criterios de maquinabilidad descritos en este proyecto con factores inherentes de los procesos de mecanizado como son los parámetros de corte, se establecerá una metodología con el proceso experimental que cumpla con esta condición. Además, con la experimentación realizada se determinarán los parámetros que mejoran dicho criterio evaluado de maquinabilidad.

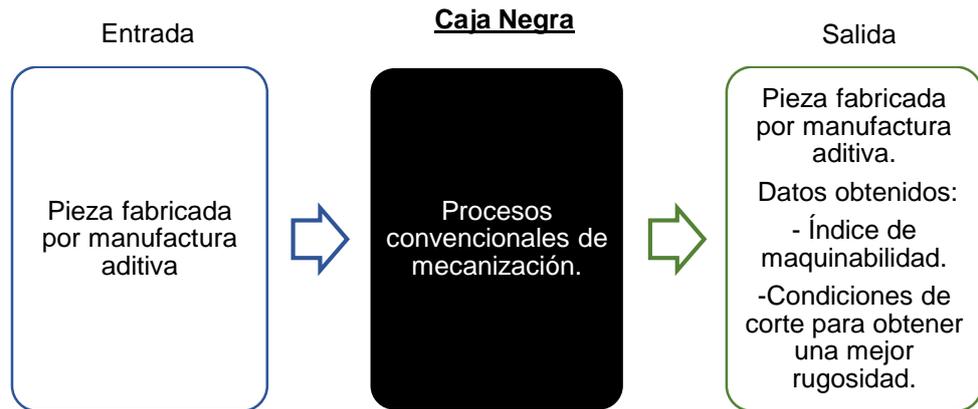
Para la experimentación se realizarán las operaciones de mecanizado más comunes de fresado y torneado. Se registrará a detalle el procedimiento seguido, con el fin de crear una serie de pasos que servirán como guía para futuros trabajos sobre medición de la maquinabilidad de piezas impresas en 3D. Los resultados obtenidos serán analizados en el capítulo 3. Como material base se utilizará Polytec 1000 (Acetal), que se lo encuentra de manera comercial como un polímero para maquinado y, como material de prueba el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), que es de los más comunes utilizados para impresión 3D en plástico.

### 2.1 Análisis del problema

El problema radica en seleccionar la metodología de proceso de experimentación más adecuada. Para una mejor visualización del problema que se desea solucionar, se hará uso de la caja negra y otras herramientas del proceso de diseño aplicables a nuestro tema de discusión.

#### 2.1.1 Caja negra

La Figura 2.1 muestra la caja negra, en esta caja se enuncian los estados inicial y final del proceso de diseño sin especificar el método o camino utilizado para llegar del uno a otro.



**Figura 2.1 Caja Negra.**

Fuente: Elaboración propia.

### 2.1.2 Planteamiento de metodología experimental

A continuación, para visualizar de mejor forma la problemática y facilitar el planteamiento de las alternativas de solución, en la Tabla 2.1 se enuncian los objetivos, las características, los medios, los criterios de selección y las restricciones del proyecto.

**Tabla 2.1 Planteamiento de metodología experimental.**

Objetivos	Características	Medios	Criterios de selección	Restricciones
a) Determinar el índice de maquinabilidad de piezas de matriz polimérica termoplásticas.	a) Criterio de maquinabilidad	a) Rugosidad superficial b) Vida útil de la herramienta	a) Costo de experimentación b) Adquisición de datos	<u>Equipos de medición:</u> a) Disponibilidad b) Rango de medición
b) Obtener condiciones de corte que mejoren la maquinabilidad del material de prueba.	b) Parámetros o condición de corte	a) Velocidad de avance b) Velocidad rotacional c) Profundidad de corte d) Fluido de corte e) Forma de la herramienta	c) Calibración de parámetros de corte d) Influencia en la maquinabilidad e) Tiempo de experimentación	<u>Máquinas herramientas:</u> a) Rango de trabajo

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Selección de la mejor alternativa de metodología experimental

Para la selección de la mejor alternativa de metodología de proceso experimental, se debe obtener el nivel de importancia de los criterios de selección mostrados en la Tabla 2.1. Luego, se generan las posibles alternativas de solución usando las herramientas de diseño necesarias, en base a criterio técnico. Finalmente, se forma la matriz de selección y se encuentra la mejor alternativa.

### 2.2.1 Ponderación de criterios

Para determinar el nivel de importancia de los criterios de selección usaremos la comparación por pares. Esta es una herramienta confiable y crucial en el proceso de diseño, para seleccionar la mejor solución. Los criterios de selección son establecidos en función de los requerimientos del cliente, descritos a continuación:

#### **Requisitos del cliente**

- Operación de mecanizado económica.
- Metodología de experimentación confiable.

#### **Criterios de diseño**

- A. Costo de experimentación:** Experimentación que implique menos gastos, es decir la más económica.
- B. Adquisición de datos:** Se busca obtener la mayor cantidad de datos con facilidad, evitando introducir el menor error humano posible.
- C. Calibración de los parámetros de corte:** Se espera que la calibración o regulación de estos parámetros sea lo menos complicado posible.
- D. Influencia en la maquinabilidad:** Aquellos parámetros de corte funcionales con mayor influencia sobre el criterio de maquinabilidad por analizar.
- E. Tiempo de experimentación:** Se considera la mejor alternativa aquella metodología que tarde el menor tiempo posible, involucrando un proceso seguro.

### **Comparación por pares**

Una vez definidos los criterios de selección se realiza la comparación por pares, como muestra la Tabla 2.2. Esta comparación nos permite determinar la relación entre cada uno de los criterios. Todos los criterios identificados se evalúan entre sí (todos contra todos, uno a la vez). Al finalizar la comparación los criterios quedan en el orden de mayor a menor importancia. En las celdas respectivas, se registra un valor entero entre cero (0) y dos (2), donde 0 significa la mínima calificación y 2 significa la máxima calificación.

**Tabla 2.2 Comparación por pares de criterios de selección para la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.**

Criterios de selección	Costo de experimentación	Adquisición de datos	Calibración de los parámetros de corte	Influencia en la maquinabilidad	Tiempo de experimentación	Calificación
Costo de experimentación	...	0	2	0	2	4
Adquisición de datos	2	...	2	1	2	7
Calibración de los parámetros de corte	0	0	...	1	1	2
Influencia en la maquinabilidad	2	1	1	...	2	6
Tiempo de experimentación	0	0	1	0	...	1

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.3 Importancia relativa de los criterios de selección para la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.**

Criterio de selección	Calificación	Nivel de importancia [%]
Adquisición de datos	7	35
Influencia en la maquinabilidad	6	30
Costo de experimentación	4	20
Calibración de los parámetros de corte	2	10
Tiempo de experimentación	1	5
Total	20	100

Fuente: Elaboración propia.

Con la calificación obtenida en la Tabla 2.2, se calcula el nivel de importancia (en porcentaje) de los criterios de selección, como se refleja en la Tabla 2.3.

### **2.2.2 Tabla Morfológica**

La tabla morfológica relaciona las características de la metodología experimental con los medios para desarrollarla. A partir de esta tabla se plantean las posibles alternativas de metodología de proceso experimental como indica la Tabla 2.4. Dicho lo anterior, se realiza un listado de las características de la metodología de proceso experimental, y luego una sub-lista de los medios para obtener estas características.

#### **Características del diseño**

- Criterio de maquinabilidad: Indicador de maquinabilidad.
- Parámetros o condiciones de corte: Variables que influyen los criterios de maquinabilidad.

#### **Sub-lista de medios**

- Criterio de maquinabilidad:
  - ✓ Rugosidad superficial.
  - ✓ Vida útil de la herramienta.
- Parámetros de corte:
  - ✓ Velocidad de corte.
  - ✓ Velocidad de avance.
  - ✓ Profundidad de corte
  - ✓ Fluido de corte.
  - ✓ Forma de la herramienta de corte.

Los parámetros funcionales de corte son tres (Francisco Mata Cabrera, 2011). Entonces, según criterio técnico, se forman tres grupos de las posibles condiciones de corte a determinar. Se seleccionan las ternas más

representativas de las posibles combinaciones. La Tabla 2.4 refleja la tabla morfológica.

**Tabla 2.4 Tabla morfológica. Características y medios del diseño.**

Medios	1	2	3
<b>Características</b>			
<b>Criterio de maquinabilidad</b>	La vida útil de la herramienta	La rugosidad superficial	...
<b>Parámetros o condiciones de corte</b>	- Velocidad de avance	- Velocidad de avance	- Velocidad rotacional
	- Velocidad rotacional	- Fluido de corte	- Velocidad de avance
	- Profundidad de corte	- Forma de la herramienta de corte	- Fluido de corte

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.2.1 Análisis de Tabla Morfológica

De la tabla morfológica se plantean seis posibles alternativas de metodología de proceso experimental, descritas a continuación:

#### **Listas de alternativas de metodología de proceso experimental**

- A.** Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la rugosidad superficial variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte.
- B.** Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la rugosidad superficial variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, fluido de corte y la forma de la herramienta de corte.
- C.** Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la rugosidad superficial variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, velocidad rotacional y fluido de corte.

- D. Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la vida útil de la herramienta variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte.
- E. Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la vida útil de la herramienta variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, fluido de corte y la forma de la herramienta de corte.
- F. Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la vida útil de la herramienta variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, velocidad rotacional y fluido de corte.

En la Tabla 2.5 se muestra la combinación de las alternativas enunciadas.

**Tabla 2.5 Alternativas de metodología de proceso experimental.**

Alternativa	Enunciado: Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante...	
	... la medición de...	... variando los siguientes parámetros...
A	La rugosidad superficial	Velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte
B		Velocidad de avance, fluido de corte y la forma de la herramienta de corte.
C		Velocidad rotacional, velocidad de avance y fluido de corte
D	La vida útil de la herramienta	Velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte
E		Velocidad de avance, fluido de corte y la forma de la herramienta de corte.
F		Velocidad rotacional, velocidad de avance y fluido de corte

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3 Matriz de selección

La matriz de selección nos permite encontrar la alternativa de solución más viable respecto a los criterios de selección definidos. Los criterios de selección con su indicador o sub-criterio son:

- **Adquisición de datos:** La mayor cantidad de datos con menor dificultad.
- **Influencia en la maquinabilidad:** Mayor influencia en la maquinabilidad.
- **Costo de experimentación:** El más económico.
- **Calibración de los parámetros de corte:** La más precisa y menos complicada.
- **Tiempo de experimentación:** El menor tiempo posible, comprendiendo un proceso seguro.

En la Tabla 2.6 se determina la influencia de los criterios y sub-criterios de selección respecto a las alternativas de metodología planteadas. Para cada alternativa, en la esquina inferior derecha de la celda de abajo, se registra un valor entero entre dos (2) y diez (10), donde 2 representa la mínima influencia y 10 la máxima influencia. Este valor se multiplica por el nivel de importancia correspondiente al criterio evaluado (según criterio técnico) y se registra su valor en la parte central de la celda superior. Al final, se suman los valores obtenidos para cada alternativa de metodología, este valor se llama grado de satisfacción.

**Tabla 2.6 Matriz de selección de la mejor alternativa de metodología de proceso experimental.**

Criterios	Adquisición de datos	Influencia en la maquinabilidad	Costo de experimentación	Calibración de los parámetros de corte	Tiempo de experimentación	Grado de satisfacción
	0,35	0,30	0,20	0,10	0,05	
Alternativa	Mayor cantidad; menor dificultad	Mayor posible	Menor posible	Mayor precisión; menor complejidad	Menor posible	
A	2,1	2,4	1,6	0,8	0,3	7,20
	6	8	8	8	6	
B	0,1225	1,2	0,8	0,4	0,1	2,62
	2	4	4	4	2	
C	1,4	1,8	1,2	0,6	0,2	5,20
	4	6	6	6	4	
D	0,49	2,4	1,6	0,8	0,3	5,59
	6	8	8	8	6	
E	0,7	1,2	0,8	0,4	0,1	3,20
	2	4	4	4	2	
F	1,4	0,6	1,2	0,6	0,2	4,00
	4	2	6	6	4	

Fuente: Elaboración propia.

### 2.2.3.1 Análisis de la matriz de selección de la mejor alternativa

De la Tabla 2.6 se obtiene que la mejor alternativa de metodología de proceso experimental a seguir en base a los requerimientos del cliente es la opción “A”, con un grado de satisfacción de 7,2. Esta alternativa dice:

*Alternativa A: “Determinar maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva mediante la medición de la rugosidad superficial variando los siguientes parámetros: velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte.”*

### 2.3 Metodología de proceso experimental

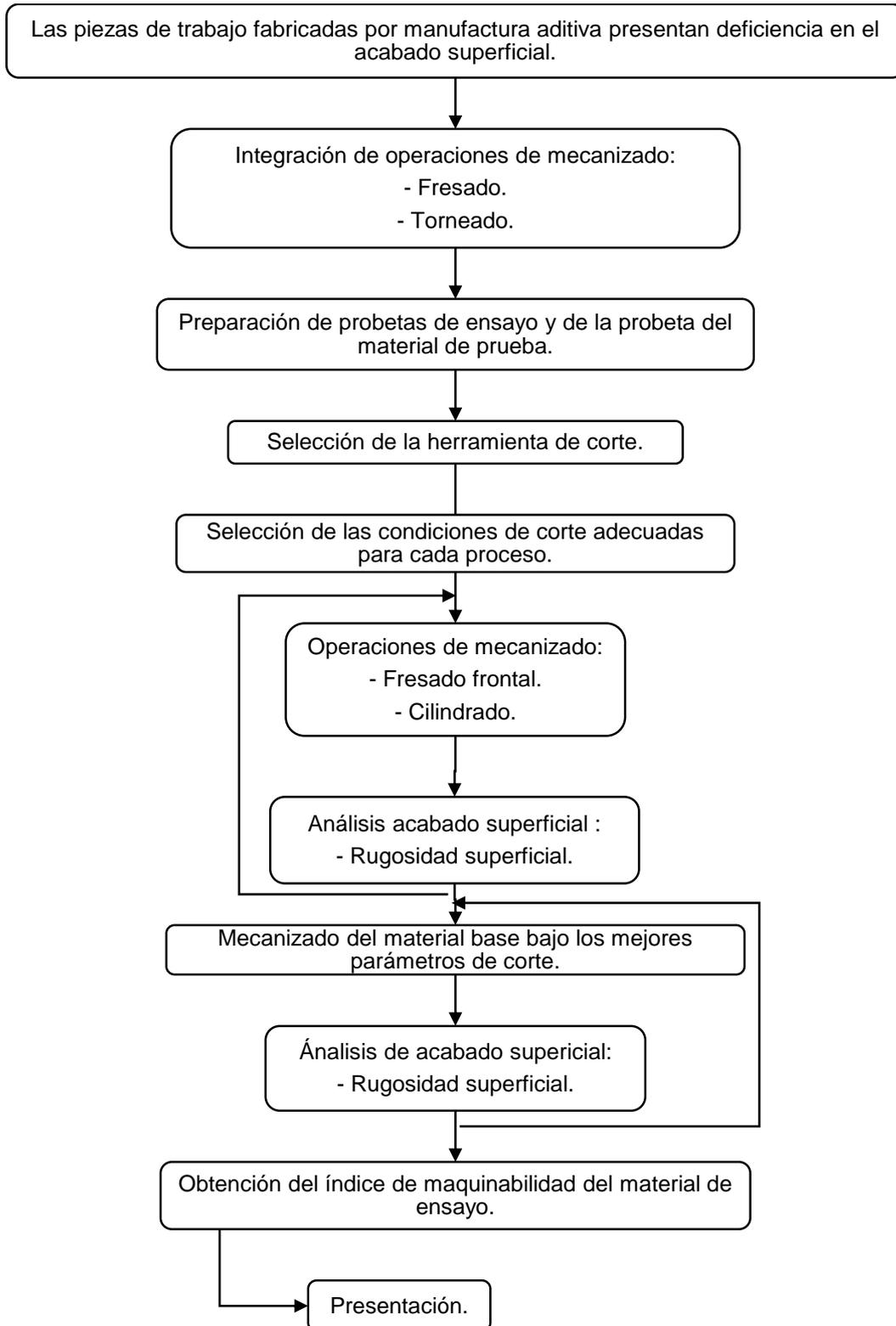


Figura 2.2 Diagrama de bloques de la metodología del proceso experimental.

Elaboración propia.

## 2.4 Diseño detallado

En esta sección se detallan las características de los equipos, máquinas herramientas, herramientas de corte y los parámetros de corte a utilizar en los procesos de mecanizado.

### 2.4.1 Equipos de impresión 3D

Los equipos de impresión 3D utilizados se describen a continuación:

#### 2.4.1.1 Cube 3D

Esta impresora utiliza la tecnología de impresión por Modelado por Deposición Fundida (FDM). La Tabla 2.7 describe las características principales del equipo, el mismo que se muestra en la Figura 2.3.

**Tabla 2.7 Especificaciones técnicas de impresora Cube.**

<b>Especificaciones técnicas Cube impresora 3D</b>	
<b>PESO Y DIMENSIONES</b>	
<b>Dimensiones del cubo (con cartucho):</b>	13.2 (w) x 13.5 (h) x 9.5 (d) pulgadas / 33.5 (w) x 34.3 (h) x 24.1 (d) cm
<b>Sobre de funcionamiento:</b>	28.9 (w) x 20.6 (h) x 15.8 (d) pulgadas / 73.4 (w) x 52.3 (h) x 40.1 (d) cm
<b>Peso del cubo (con cartucho):</b>	17 lbs / 7.7 kg
<b>Dimensiones de la caja:</b>	26.3 (w) x 20 (h) x 14.5 (d) pulgadas / 66.8 (w) x 50.8 (h) x 36.8 (d) cm
<b>Peso de la caja:</b>	22 lbs / 10 kg
<b>PROPIEDADES DE IMPRESIÓN</b>	
<b>Tecnología:</b>	Modelado por deposición fundida (FDM)
<b>Imprimir chorros:</b>	Chorros duales
<b>Tamaño máximo de diseño:</b>	6 x 6 x 6 pulgadas / 15.25 x 15.25 x 15.25 cm
<b>Material:</b>	Plástico ABS reciclable resistente o plástico PLA compostable
<b>Grosor de la capa:</b>	70 micras, modo rápido: 200 micras
<b>Soporta:</b>	Totalmente automatizado, fácil de despegar.
<b>Cartuchos duales:</b>	Cada cartucho imprime de 13 a 14 creaciones medianas.

Fuente: (Inc., 2018)

Elaboración propia.



**Figura 2.3 Equipo de impresión Cube 3D.**

Fuente: (Systems, 2018)

#### 2.4.1.2 ProJet 3510 SD

La impresora ProJet 3510SD utiliza la tecnología de impresión MultiJet Printing (MJP) de 3D Systems. La Tabla 2.8 muestra las características principales del equipo en la Figura 2.4.

**Tabla 2.8 Ficha Técnica de ProJet 3510 SD.**

Ficha Técnica ProJet 3510 SD	
Volumen de Impresión (x,y,z)	298 x 185 x 203 mm
Resolución	375 x 375 x 790 DPI (xyz); 32 $\mu$ capas
Precisión	(0.025-0.05 mm) por pulgada de dimensión de la pieza.
Dimensiones	826 x 1429 x 1740 mm (con caja) 7 49 x 1194 x 1511 mm (sin caja)
Peso	323 kg
Rango de Temperatura	18 – 28 °C
Print3D App	Monitorización y control remoto desde tabletas, ordenadores y smartphones.

Fuente: (Inc., 2018)

Elaboración propia.



**Figura 2.4 Equipo ProJet 3510SD.**

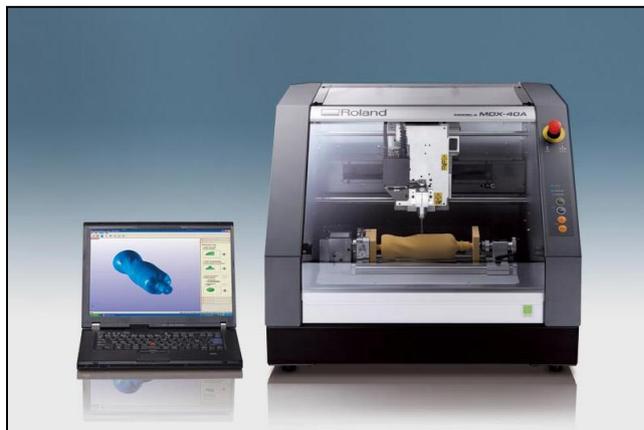
Fuente: (Systems, 2018)

## 2.4.2 Máquinas-herramientas

Para el mecanizado de las probetas de ensayo se usan dos tipos de máquinas herramientas, descritos a continuación:

### 2.4.2.1 Fresadora

Para operaciones de fresado se utiliza el equipo didáctico de Fresado CNC "ROLAND MDx-40A", con 15000 rpm de velocidad máxima, como se muestra en la Figura 2.5. Posee una mesa de trabajo de 300x300 mm. (Ramirez, 2018).



**Figura 2.5 Esquema del equipo CNC ROLAND MDx-40A.**

Fuente: (Corporation, 2019)

### 2.4.2.2 Torno paralelo CNC

Se utilizada, para la operación de torneado, el torno paralelo CNC “DMTG CKE6136z”, de 5,5 KW de potencia y 2500 rpm de velocidad máxima, como se refleja en la Figura 2.6.



**Figura 2.6 Torno paralelo CNC modelo CKE6136Z.**

Fuente: (CO.LTD, 2018)

### 2.4.3 Equipo de medición

#### 2.4.3.1 Rugosímetro portátil

El valor de rugosidad de las superficies mecanizadas se lo materializará con el rugosímetro digital SRG-4500. La Figura 2.7 ilustra el equipo de medición.



**Figura 2.7 Rugosímetro digital SRG-4500.**

Fuente: (INDUSTRY, 2019)

La Tabla 2.9 indica los datos técnicos del rugosímetro.

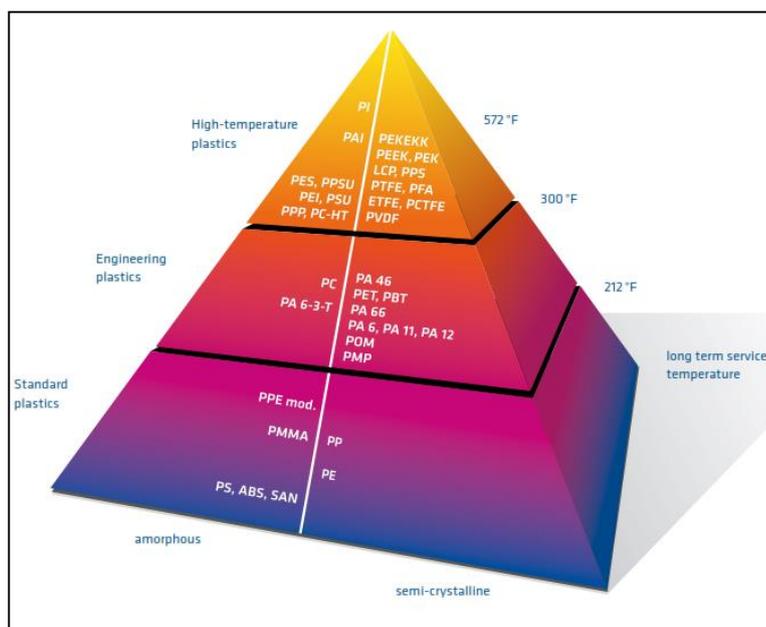
**Tabla 2.9 Datos técnicos del rugosímetro SRG 4500.**

Datos Técnicos del Rugosímetro SRG – 4500	
Parámetros de Rugosidad Superficial:	Ra, Rz, Rq, Rt, Rp, Rs, Rv, RSM, Rmax, Rm, R3z, Rsk, RPC, RMR
Normas de Rugosidad Superficial:	ISO/DIN/JIS/ANSI
Precisión de la medición:	≤ ± 10%
Repetibilidad:	Menos de 0 igual a 6%
Rango de Medición:	Ra, Rq: 0.01-40 μm Rz, Ry, Rt, R3z, Rm: 0.02-160 μm Sm, S: 2-4000 μm Rsk: 0-100%
Amplia unidad máxima:	0.7" (17.5 mm)
Longitud de Corte:	.009/0.03/0.09" (.25/.8/2.5 mm)
Sensor:	Tipo Inductancia
Sensor Estilo:	Diamante radio 5 μm
Fuerza de Recoger:	< 4mN
Filtro:	RC, RC-RC, Gaussian, D-P
Salida de datos:	Si

Fuente: (s.a., 2018)

Elaboración propia, en base a catálogo de fabricante.

#### 2.4.4 Descripción de materiales de ensayo



**Figura 2.8 Esquema de plásticos técnicos.**

Fuente: (Ensinger, 2017)

En cuanto a los materiales a experimentar, tomaremos dos de los plásticos técnicos existentes. La Figura 2.8 muestra un esquema de los plásticos técnicos.

Como material de prueba se elige el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Este es un plástico estándar, amorfo, con temperatura de servicio a largo plazo, utilizado frecuentemente por las impresoras 3D mencionadas anteriormente y, relativamente económico. Luego, como material para base de comparación, se elige el plástico de ingeniería Polytec 1000 (Acetal) o copolímero de polioximetileno, TECAFORM AH/AD.

La Tabla 2.10 muestra las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales a ensayar.

**Tabla 2.10 Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales a ensayar.**

Propiedades	ABS		Polytec 1000 (Acetal)	Unidad
	Moldeo por inyección	Impresión 3D		
<b>Modulo de elasticidad</b>	2030	1681,5	750	MPa
<b>Dureza</b>	-	76	62	Shore D
<b>Temperatura de fusión</b>	225 -245		135	°C
<b>Densidad</b>	1,04		0,93	g/cm3
<b>Ceficiente de expansión térmica (&lt;150°C)</b>	0,954		200	x10-6m/(m.K)

Fuente: (Ultimaker, 2017); (polypres, 2018)  
Elaboración propia

#### 2.4.4.1 Preparación de las probetas de prueba

Antes de describir la geometría de las piezas de trabajo, mostramos en la Tabla 2.11 los parámetros de impresión las piezas de ensayo según la tecnología de impresión.

**Tabla 2.11 Parámetros de impresión de las piezas de ensayo.**

Parámetros de impresión	Piezas fabricadas por impresora ProJet - MJP	Piezas fabricadas por impresora Cube - FDM	Unidades
<b>Raft</b>	Si	Si	-
<b>Espesor de capa</b>	30-32	200	micrones
<b>Porcentaje de Infill</b>	100	10	%
<b>Forma de Infill</b>	Sólido	Panel	-
<b>Anisotropía</b>	No considerada	No considerada	-

Fuente: (Inc., 2018)

Elaboración propia.

### **Para torneado**

Se preparan probetas con forma de barra (cilíndrica) para una mejor sujeción, debido a la máquina herramienta. Se define un largo L de 60 [mm], considerando la distancia necesaria para el agarre, la zona de seguridad y distancia de medición de rugosidad. Luego, teniendo en cuenta la siguiente relación de la ecuación 2.1 para el largo-diámetro, con el propósito de evitar vibraciones y deficiencia en el acabado, se toma un valor de  $L/D=2$ , obteniendo un diámetro D de 30 [mm].

$$\frac{L}{D} \leq 10 \quad (2.1)$$

Fuente: (Romero, 2017)

La Tabla 2.12 indica las características principales del material de trabajo.

**Tabla 2.12 Características principales del material de trabajo para torneado.**

<b>Material</b>	<b>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</b>
<b>Forma</b>	Barra
<b>Longitud</b>	60 [mm]
<b>Diámetro</b>	30 [mm]

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2.9 refleja las probetas de ensayo fabricadas mediante la tecnología FDM.



**Figura 2.9 Probetas de tecnología FDM para torneado.**

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2.10 refleja las probetas de ensayo fabricadas por la tecnología MJP; a) pieza después de su fabricación (con cera) y, b) pieza luego de proceso de limpieza.



a)

b)

**Figura 2.10 Probetas de tecnología MJP para torneado.**

Fuente: Elaboración propia.

### **Para fresado**

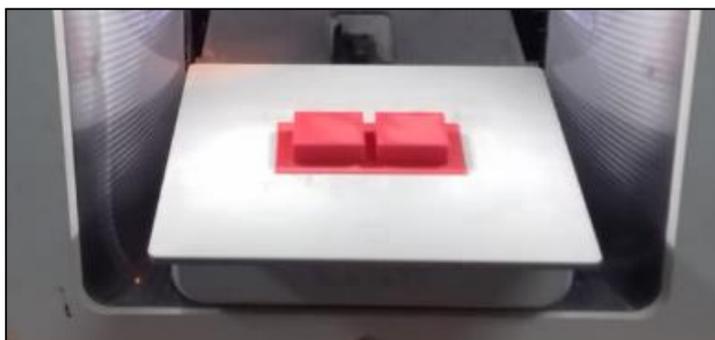
Se preparan piezas en forma de bloque (placa), debido a la operación de fresado y a la sujeción con la bancada de la fresadora. Las dimensiones de la pieza de trabajo se reflejan en la Tabla 2.13, para estas, se consideró el rango de medición del rugosímetro.

**Tabla 2.13 Características principales del material de trabajo para fresado.**

<b>Material</b>	<b>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</b>
<b>Forma</b>	Bloque
<b>Largo</b>	30 [mm]
<b>Ancho</b>	30 [mm]
<b>Alto</b>	10 [mm]

Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 2.11 y 2.12 se muestran las piezas recién fabricadas mediante la tecnología FDM y MJP, respectivamente.



**Figura 2.11 Probeta de tecnología FDM para fresado.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 2.12 Probeta de tecnología MJP para fresado.**

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al material como base de comparación, se consiguieron dos probetas, como refleja la Figura 2.13; a) para torneado b) para fresado. Las dimensiones de la pieza de trabajo para torneado son de largo 50 mm y diámetro 60 mm, y para fresado, dimensiones de 200x40x40 mm de largo, ancho y alto respectivamente.



a)



b)

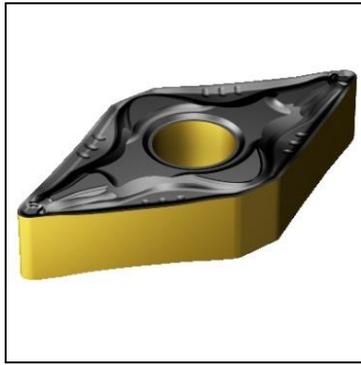
**Figura 2.13 Probeta de material Polytec 1000 (Acetal).**

Fuente: Elaboración propia.

#### **2.4.5 Herramienta de corte**

##### **Para torneado**

Se utiliza una herramienta negativa de carburo cementado (K10), estándar para operaciones de acabado, por lo que seleccionamos un inserto con código ISO "DNMG 150608-PM". Ver Figura 2.14.



**Figura 2.14 Inserto DNMG 150608-PM.**

Fuente: (Coromant S. , 2018)

Debido a su elevada dureza en un amplio intervalo de temperaturas, su alto módulo elástico, su alta conductividad térmica y su baja dilatación térmica son utilizados frecuentemente. (Schmid, 2008). A continuación, en la Tabla 2.14 se muestra los intervalos de condiciones de corte para el inserto seleccionado.

**Tabla 2.14 Profundidad de corte recomendada y avance de corte, métrico. Inserto T-Max P para torneado.**

Inserto	Profundidad de corte p [mm]		Avance de corte f [mm/rev]	
	Min.	Max.	Min.	Max.
<b>DNMG150608-PM</b>	0.50	6.00	0.15	0.50

Fuente: (Coromant, Turning Tools, 2015)

Elaboración propia.

### **Para fresado**

Se utiliza una fresa helicoidal de acero de alta velocidad (HSS) de diámetro 6 mm, ver Tabla 2.15.

**Tabla 2.15 Características de la herramienta de corte para fresado.**

<b>Material de herramienta de corte</b>	Acero de alta velocidad (HSS)
<b>Geometría</b>	Helicoidal
<b>Diámetro</b>	6 [mm]

Fuente: CAMPRO

Elaboración propia.

Los HSS son aceros altamente aleados que pueden mantener su dureza a elevadas temperaturas. Es muy utilizado en aplicaciones que involucran herramientas de formas complicadas, como fresas. (Groover, 2007)

La Figura 2.15 muestra la fresa helicoidal utilizada en operaciones comunes de acabado.



**Figura 2.15 Fresa helicoidal.**

Fuente: (DOCPLAYER, 2019)

#### **2.4.6 Selección de las condiciones de corte**

Con el objetivo de seleccionar las mejores condiciones de corte, parámetros de corte con los que se obtiene mejor maquinabilidad, se establecen criterios asociados a acabado superficial.

Además, debemos tener en cuenta que los **termoplásticos** tienen baja conductividad térmica, un bajo módulo elástico y se suavizan por la temperatura. En consecuencia, maquirarlos requiere herramientas afiladas con ángulos positivos de ataque (para reducir las fuerzas de corte), ángulos grandes de alivio, pequeñas profundidades de corte y avance, velocidades relativamente altas y soporte apropiado de la pieza de trabajo. Puede ser necesario el enfriamiento externo de la zona de corte para evitar que las virutas se vuelvan gomosas y se peguen a las herramientas. El enfriamiento suele obtenerse mediante una corriente de aire, niebla de vapor o aceites solubles en agua. (Schmid, 2008)

La Tabla 2.16 refleja el planteamiento del sub-problema para una mejor comprensión.

**Tabla 2.16 Objetivos características, medios, criterios para acabado superficial y restricciones para obtener las mejores condiciones de corte.**

Objetivo	Característica	Medios	Criterios asociados a acabado superficial	Restricciones
Obtener condiciones de corte que mejoren la maquinabilidad del material de prueba	Mejor acabado superficial	a) Velocidad de avances	a) Velocidades de avance bajos	<u>Rango de trabajo:</u>
		b) Velocidades rotacional	b) Velocidades medias y altas	a) Máquina herramienta
		c) Profundidades de corte	c) Profundidades bajas	b) Herramienta de corte

Fuente: Elaboración propia.

#### 2.4.6.1 Criterios de selección para condiciones de corte

Para conseguir un buen acabado superficial al mecanizar materiales plásticos, y por ende una mejor maquinabilidad, describimos los siguientes criterios:

- Avances - Velocidades de avances: Con velocidades bajas se obtiene mejores resultados de rugosidad. (Francisco Mata, 2010) (Francisco Mata Cabrera, 2011)
- Velocidad de corte: Conseguimos un mejor acabado superficial con velocidades de corte relativamente altas o medias. (Francisco Mata Cabrera, 2011) (Schmid, 2008)
- Profundidad de corte: Mejores resultados de maquinabilidad se obtienen con profundidades de corte bajas. (Francisco Mata Cabrera, 2011)

## 2.4.6.2 Modelo de ensayo

Se realizará un conjunto de ensayos a cinco diferentes avances (velocidades de avances, para fresado), así también cinco velocidades de corte (asociada a velocidad rotacional) y cinco profundidades de corte, con el fin de determinar las condiciones aptas para un criterio de acabado.

**Tabla 2.17 Condiciones de corte para plásticos técnicos para operaciones de fresado y torneado.**

	Milling			Turning			cutting speed [fpm]	feed rate [in/rev]
	number of teeth	cutting speed [fpm]	feed rate [in/rev]	clearance angle	rake angle	side angle		
TECAFINE PE, PP	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6-10	0-5	45-60	820-1640	0.004-0.018
TECAFINE PMP	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6-10	0-5	45-60	820-1640	0.004-0.018
TECARAN ABS	Z1-Z2	985-1640	0.004-0.018	5-15	25-30	15	655-1640	0.008-0.018
TECANYL	Z1-Z2	985	0.006-0.018	5-10	6-8	45-60	985	0.004-0.018
TECAFORM AD, AH	Z1-Z2	985	0.006-0.018	6-8	0-5	45-60	985-1700	0.004-0.016
TECAMID, TECARIM, TECAST	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6-10	0-5	45-60	820-1640	0.004-0.018
TECADUR/TECAPET	Z1-Z2	985	0.006-0.018	5-10	0-5	45-60	985-1310	0.008-0.016
TECANAT	Z1-Z2	985	0.006-0.016	5-10	6-8	45-60	985	0.004-0.018
TECAFLON PTFE, PVDF	Z1-Z2	490-1640	0.004-0.018	5-10	5-8	10	490-1640	0.004-0.012
TECAPEI	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	10	0	45-60	1150-1310	0.004-0.012
TECASON S, P, E	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6	0	45-60	1150-1310	0.004-0.012
TECATRON	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6	0-5	45-60	820-1640	0.004-0.018
TECAPEEK	Z1-Z2	820-1640	0.004-0.018	6-8	0-5	45-60	820-1640	0.004-0.018
TECATOR	Z1-Z2	197-325	0.002-0.014	6-8	0-5	7-10	325-395	0.002-0.003
TECASINT	Z1-Z2	295-325	0.002-0.014	2-5	0-5	7-10	325-395	0.002-0.003
Reinforced/filled TECA products*	Z1-Z2	260-1475	0.002-0.016	6-8	2-8	45-60	490-655	0.004-0.018

\* Reinforcing agents/fillers: Glass fibres, glass beads, carbon fibres, graphite, mica, talcum, etc.

● Preheat material to 250 °F  
● Caution when using coolants: susceptible to stress cracking

Fuente: (Ensinger, 2017)

Como valor referencial de la velocidad de corte para el ensayo, se espera elegir una dentro del intervalo presentado en la Tabla 2.17, para el material de prueba (TECARAN ABS, rectángulo color rojo), pero, se percibe que la velocidad máxima alcanzada por las máquinas herramientas disponibles, están por debajo del intervalo mostrado.

La Tabla 2.18 muestra, en particular, las condiciones de corte para el ABS en sistema métrico, a partir de la tabla anterior. Se considera

para torneado, pieza de diámetro 30mm y, para fresado, herramienta de diámetro 6mm.

**Tabla 2.18 Velocidad de corte y avance en sistemas inglés e internacional.**

Sistema de unidades	Inglés		Internacional		
Parámetros	Velocidad de corte [ft/min]	Avance [in/rev]	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]	Velocidad rotacional [RPM]
<b>Torneado</b>	655 – 1.640	0,008 - 0,018	199,64 - 499,87	0,20 - 0,45	2.118,25 – 5.303,79
<b>Fresado</b>	985 – 1.640	0,004 - 0,018	300,23 - 499,87	0,10 - 0,45	15.927,70 – 2.6518,93

Elaboración Propia.

Entonces, respecto a cada proceso de mecanizado, se tiene que:

### **Para torneado**

Se opta por seleccionar un intervalo de trabajo para plásticos en general, como se observa en la Tabla 2.19. Para torno, el avance esta dado en mm/rev.

Luego, la Tabla 2.20 muestra un conjunto de intervalos principales de las condiciones de corte como: el disponible por el torno (se omite avance y profundidad ya que no consideramos restricciones para estos), el del inserto y el recomendado para operaciones de torneado en general.

**Tabla 2.19 Recomendaciones generales para operaciones de torneado.**

<b>Recomendaciones generales para operaciones de torneado</b>	
<b>Material de la pieza de trabajo</b>	Termoplásticos y termofijos
<b>Herramienta de corte</b>	Carburo con recubrimiento de TiN
<b>Velocidad [m/min]</b>	90 – 230
<b>Velocidad del husillo [rpm]</b>	954,93 – 2.440,38
<b>Avance [mm/rev]</b>	0,08 - 0,35
<b>Profundidad de corte [mm]</b>	0,12 - 0,50

Fuente: (Schmid, 2008)

Elaboración propia.

**Tabla 2.20 Intervalos de condiciones de corte.**

Parámetro de corte	Velocidad del husillo [rpm]	Avance [mm/rev]	Profundidad [mm]
Torno CNC	750 – 2.500	-	-
Inserto K10	1432 – 2.440	0,15 – 0,50	0,50 – 6,00
Operaciones de torneado para plásticos	955 – 2.440	0,08 - 0,35	0,12 – 0,50

Elaboración propia, en base a referencias de fabricantes.

De modo que, los valores referenciales para cada parámetro de corte seleccionados según criterio técnico son:

- Velocidad rotacional: Se toma la máxima velocidad permitida por la máquina herramienta, la misma que es aproximadamente el máximo valor del intervalo recomendado, 2.500 rpm.
- Avance: La teoría indica que a menores avances se obtiene mejor acabado, pero se opta por tomar el menor avance permitido por el inserto, con el fin de desprestigiar variaciones en el radio de punta y considerar el avance como la única influencia; 0,150 mm/rev.
- Profundidad de corte: Al igual que el avance, se toma el menor valor recomendado para el inserto. Considerando que sea mayor que 1/3 del radio de punta RE para evitar imperfecciones en la superficie. (Coromant, El futuro de la fabricación es ahora, 2018). 0,500 mm.

La Tabla 2.21 ilustra las condiciones de corte referenciales para torneado.

**Tabla 2.21 Condiciones de corte referenciales para torneado.**

Velocidad del husillo [rpm]	Avance [mm]	Profundidad [mm]
2.500	0,150	0,500

Elaboración propia.

### **Para fresado**

La Tabla 2.22 muestra dos intervalos de condiciones de corte recomendados para operaciones de fresado.

**Tabla 2.22 Velocidades de Corte y Avance para fresado.**

Fresado	Velocidad de corte	Avance
Plastics international	950-1.600 ft/min	Máx 0,020 in/diente
Ensigner	985-1.640 ft/min	0,004-0,018 in/diente

Fuente: (Ensigner, 2017)

Es necesario obtener la velocidad rotacional del husillo a partir de la velocidad de corte recomendada en la Tabla 2.22, empleando la ecuación 2.2 que relaciona directamente ambos parámetros, establecida de la siguiente manera:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (2.2)$$

Donde;

$v$ : velocidad de corte

$D$ : diámetro de la fresa

Para este caso tomamos el valor de la velocidad de corte más alto que pertenezca al rango de las dos referencias utilizadas, mostradas en la Tabla 2.22.

$$v = 1.600 \frac{ft}{min} = 487.680 \frac{mm}{min}$$

Reemplazando en la ecuación 2.2

$$N = \frac{487.680 \text{ mm/min}}{\pi * 6 \text{ mm}}$$

Por lo tanto, la velocidad rotacional del husillo es igual a:

$$N = 25.872,23 \frac{rev}{min} \approx 26.000 \frac{rev}{min}$$

Según las especificaciones de la fresadora ROLAND CNC MDX-40A la velocidad máxima del husillo es de 15.000 rpm, por lo tanto, se tomará como fija esta velocidad rotacional para calcular la velocidad de avance lineal.

En el cálculo de la velocidad de avance lineal se utiliza la ecuación:

$$f_r = N n_t f \quad (2.3)$$

Donde;

$n_t$ : número de dientes de la fresa

$f$ : avance por diente cortante (carga de viruta)

Según los criterios establecidos anteriormente en la Tabla 2.22 debe utilizarse el menor avance por diente recomendado que corresponde al valor de 0,004 in/diente, reemplazando en la ecuación 2.3 tenemos:

$$f_r = 15.000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} * 4 \text{ diente} * 0,004 \frac{\text{in}}{\text{diente}}$$

$$f_r = 240 \frac{\text{in}}{\text{min}} \approx 6.096 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Según los datos obtenidos se desarrolla las siguientes condiciones de corte en la Tabla 2.23, para la operación de fresado.

**Tabla 2.23 Condiciones de corte para fresado.**

Herramienta	Velocidad de corte ([ft/min] – [m/min])	Velocidad del husillo [rpm]	Avance Lineal [mm/min]	Profundidad de corte [mm]
Fresa HSS 6 mm	1.600 – 487,68	15.000	6.096	0,075

Elaboración propia.

Los valores de referencia de los parámetros de corte para el fresado quedan establecidos de la siguiente manera:

- Velocidad rotacional: Se emplea la velocidad máxima que puede producirse en el husillo de la fresadora, se establece como el mayor valor al que puede realizarse cada experimento 15.000 rpm.
- Velocidad de avance: Menores velocidades de avances producen mejores acabados superficiales, en este caso emplearemos un valor máximo para la velocidad de avance, cercano al valor determinando con la ecuación 2.3. Ya que en la fresadora no se ha mecanizado para valores tan elevados de velocidades de avances, se recomendó fijar como tope 2.500 mm/ min.
- Profundidad de corte: En este caso se deben optar por tomar las menores profundidades posibles, y como se van a comparar dos tipos de impresiones, debemos tomar en cuenta que para la impresión MDF el espesor mínimo de capa es de 200 micras (0,2 mm), por lo tanto, este parámetro debe ser menor al espesor de capa mínimo.

La Tabla 2.24 refleja las condiciones de corte referenciales para la operación de fresado.

**Tabla 2.24 Condiciones de corte para el fresado.**

Velocidad del husillo [rpm]	Avance [mm/min]	Profundidad [mm]
15.000	Menor a 2.500	Menor a 0,2

Elaboración propia.

### 2.4.6.3 Alternativas de condiciones de corte

#### Para torneado

A partir de la Tabla 2.21 se generan las alternativas de condiciones de corte, como se muestra en la Tabla 2.25. Se realizan variaciones del 25% a partir del valor referencial, esto es:

- Velocidad rotacional (rpm): Para la velocidad, se obtiene la diferencia de los límites superior e inferior, 1.550 rpm. A partir del valor referencial se realizan decrementos del 25% de esa diferencia, es decir 400 rpm.
- Avance (mm/rev): Para el avance, se realizan incrementos del 25% del valor referencial, esto es 0,0375 mm/rev.
- Profundidad de corte (mm): Al igual que el avance, se aumenta el 25% del valor inicial de profundidad, es decir 0,125 mm.

**Tabla 2.25 Alternativas de condiciones de corte para torneado.**

Torneado					
Diámetro de pieza [mm]		30			
Ítem	Velocidad del husillo [rpm]	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm]	Velocidad de avance [mm/min]	Profundidad [mm]
1	900	9.549,30	0,150	1.432,39	0,500
2	1.300	13.793,43	0,188	2.586,27	0,625
3	1.700	18.037,56	0,225	4.058,45	0,750
4	2.100	22.281,69	0,263	5.848,94	0,875
5	2.500	26.525,82	0,300	7.957,75	1,000

Elaboración propia.

### Para fresado

De la Tabla 2.24 se obtienen las alternativas de condiciones de corte, como se muestra en la Tabla 2.26. Se realizan variaciones del 25% a partir del valor referencial, esto es:

- Velocidad del husillo (rpm): En este caso la velocidad límite establecido es de 15.000 rpm, y a partir de este valor estimaremos cinco valores de velocidades decreciendo 2.500 rpm para cada caso.

**Tabla 2.26 Alternativas de condiciones de corte para fresado.**

Fresado			
Diámetro de pieza [mm]		6	
Ítem	Velocidad del husillo [rpm]	Velocidad de avance [mm/min]	Profundidad [mm]
1	5.000	500	0,050
2	7.500	1.000	0,075
3	10.000	1.500	0,100
4	12.500	2.000	0,125
5	15.000	2.500	1,150

Elaboración propia.

- Avance (mm/rev): Para el avance, se sabe que el máximo valor debe ser de 2.500 mm/min, continuando con la variación empleada en el caso anterior (decreciendo 500 mm/min para cada ensayo) se tiene que el valor mínimo sería de 500 mm/ min.
- Profundidad de corte (mm): Es un caso especial, ya que aquí se incrementan a cada valor 0,025 mm.

Una vez obtenidas las alternativas de las condiciones de corte, procedemos a generar la combinación de parámetros para la operación de mecanizado en particular.

**Combinación de las alternativas de condiciones de corte e introducción al método de selección**

Se mantiene constante dos parámetros de corte y, se combinan con cada valor del tercero. De aquí, por medio de criterios de acabado superficial (medición de rugosidad media) se obtiene el mejor valor (posterior al mecanizado). Luego, se fija este valor y se repite el proceso para el siguiente parámetro. De igual forma con la condición de corte restante. Un mejor detalle del procedimiento se mostrará en el procedimiento experimental.

Para ilustrar de mejor forma las combinaciones de las alternativas de condiciones de corte, presentamos la Tabla 2.27. Según investigación previa, de las tres condiciones de corte definidas, el avance es el más influyente en criterios de acabado superficial. Por lo que será el primero en ser seleccionado.

**Tabla 2.27 Alternativas de condiciones de corte.**

Tecnología 1. Modelado por deposición fundida (FDM)			
Avance [mm/rev]			
N.º	f [mm/rev]	N [rpm]	p [mm]
1	0,150	2.500	0,500
2	0,188		
3	0,225		
4	0,263		
5	0,300		
Velocidad del husillo [rpm]			
N.º	N [rpm]	f [mm/rev]	p [mm]
6	2.100	Mejor avance	0,500
7	1.700		
8	1.300		
9	900		
Profundidad [mm]			
N.º	p [mm]	N [rpm]	f [mm/rev]
10	0,625	Mejor velocidad	Mejor avance
11	0,750		
12	0,875		
13	1,000		

Elaboración propia

A fin de tener un mejor control y organización de las probetas ensayadas, proponemos en la Tabla 2.28 un código para identificar estas probetas.

**Tabla 2.28 Propuesta de identificación de probetas ensayadas.**

N.º	Tecnología de impresión	Operación de mecanizado	Condiciones de corte			Código interno (CI)
			N [rpm]	f [mm/rev]	p [mm]	
1	MJP	Cilindrado	2.500	0,150	0,500	1MC-N2500-f0,150-p0,500
2	MJP	Cilindrado	2.500	0,188	0,500	2MC-N2500-f0,188-p0,500
3	MJP	Cilindrado	2.500	0,225	0,500	3MC-N2500-f0,225-p0,500
4	MJP	Cilindrado	2.500	0,263	0,500	4MC-N2500-f0,263-p0,500
5	MJP	Cilindrado	2.500	0,300	0,500	5MC-N2500-f0,300-p0,500

Elaboración propia

## 2.5 Metodología experimental

En esta sección se explican los pasos a seguir para determinar la maquinabilidad de piezas fabricadas por manufactura aditiva (de dos tipos de tecnologías) mediante dos operaciones de mecanizado. Comprenderá de tres fases. En la primera se determina el mejor avance (velocidad de avance en fresado); en la segunda, la mejor velocidad rotacional y; la tercera la profundidad de corte.

### 2.5.1 Probetas de prueba

Partimos desde la medición inicial de rugosidad superficial de una muestra de probetas de cada tecnología.

#### **Mecanizado**

Se recomienda que la primera probeta en mecanizar sea de la tecnología MJP, ya que la estructura interna del material nos permite realizar con menos restricciones el paso 5.

1. Crear el código G para cada operación de mecanizado correspondiente a la primera fase, definiendo una distancia de seguridad para torneado (longitud mínima entre la herramienta y el punto fijo del husillo más próximo).
2. Preparar la máquina herramienta.

3. Montar la pieza de trabajo y, comprobar que no existan vibraciones significativas en la pieza al girar el husillo.
4. Cargar el código y, revisar nuevamente que este correcto.
5. Definir el cero de la herramienta, se recomienda registrar la distancia entre el extremo de la pieza y un punto fijo del husillo como referencia de tal forma que se pueda ubicar la siguiente probeta a la misma distancia y ahorrar este paso.
6. Mecanizar la pieza de trabajo.
7. Desmontar e identificar la pieza de trabajo.
8. Ubicar la probeta de la siguiente tecnología que se mecanizará bajo los mis parámetros de corte, verificando si existen vibraciones. Repetir el paso 6 y 7.
9. Luego, repetir el procedimiento para las probetas restantes desde el paso 3 al 8 considerando la distancia referencial al ubicar la probeta de ensayo para poder omitir el paso 5.

### **Medición de rugosidad**

1. Preparar las probetas de ensayo, consiste en definir los puntos referenciales de medición.
2. Preparar el equipo de medición.
3. Ubicar una pieza de trabajo.
4. Medir y registrar el valor de rugosidad superficial Ra en cada punto referencial. Repetir este paso hasta obtener tres mediciones confiables (error de medición menor al 12%), generando doce datos.
5. Luego, repetir desde el paso 3 hasta el 5 para las demás piezas de trabajo.

### **Análisis de datos**

1. Tabular los datos obtenidos de cada probeta, calculando principalmente la rugosidad Ra promedio (media aritmética), la desviación estándar y el error relativo de la media.
2. Generamos una gráfica a partir de los resultados reflejados.

3. Por medio de la gráfica, concluimos que el mejor parámetro es el que presente una menor rugosidad superficial (mejor acabado).

Ahora, se repite el procedimiento para las dos fases restantes.

### **2.5.2 Probeta de material base**

Se busca también observar la aptitud del material base frente al mecanizado, maquinabilidad. Por lo que se mecaniza la pieza de trabajo de este material para las mejores condiciones de corte obtenidos para cada tecnología. Se mide la rugosidad inicial como referencia.

#### **Mecanizado**

1. Crear el código G para cada operación de mecanizado, definiendo una distancia de seguridad para torneado (longitud mínima entre la herramienta y el punto fijo del husillo más próximo).
2. Preparar la máquina-herramienta.
3. Montar la pieza de trabajo y, comprobar que no existan vibraciones significativas en la pieza al girar el husillo.
4. Cargar el código y, revisar nuevamente que este correcto.
5. Definir el cero de la herramienta.
6. Mecanizar la pieza de trabajo.
7. Desmontar e identificar la pieza de trabajo.

#### **Medición de rugosidad**

1. Preparar la probeta de ensayo, consiste en definir los puntos referenciales de medición.
2. Preparar el equipo de medición.
3. Ubicar una pieza de trabajo.
4. Medir y registrar el valor de rugosidad superficial Ra en cada punto referencial. Repetir este paso hasta obtener tres mediciones confiables (error de medición menor al 12%), generando doce datos.

Después, realizamos los mismos pasos para la condición de corte restante. Una vez terminado este proceso, pasamos al análisis de datos.

### **Análisis de datos**

1. Tabular los datos obtenidos de cada ensayo, calculando principalmente la rugosidad Ra promedio (media aritmética), la desviación estándar y el error relativo de la media.
2. Generamos una gráfica a partir de los resultados reflejados.
3. Por medio de la gráfica, concluimos que las mejores condiciones de corte para este material son las que reflejen menor rugosidad superficial (mejor acabado).

### **Cálculo de maquinabilidad**

A partir del mejor valor de rugosidad superficial del material base y empleando la ecuación 1.1, determinamos el índice de maquinabilidad de la probeta ensayada bajo los mejores parámetros de corte de cada tecnología.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Operaciones de torneado

#### 3.1.1 Rugosidad inicial

- Tecnología MJP:  $R_a (inicial) = 4.718 \mu m$ .
- Tecnología FDM: Fuera de rango (F.R.), como muestra en la Figura 0.2 en Apéndice C. Por lo que se asume una rugosidad igual al máximo valor del intervalo de medición,  $40 \mu m$ .
- Material Polytec 1000 (Acetal):  $R_a (inicial) = 0.444 \mu m$

#### 3.1.2 Primera fase de ensayos – Avance

Primero se analizará el efecto del avance [mm/rev] sobre la rugosidad superficial media, para los dos tipos de tecnología de impresión 3D.

La Tabla 3.1 muestra las mediciones de rugosidad obtenidas para cada probeta de cada tipo de tecnología 3D, ensayadas a diferentes avances. La columna “N.º (número de la probeta ensayada)” es una referencia de la identificación de la pieza ensayada.

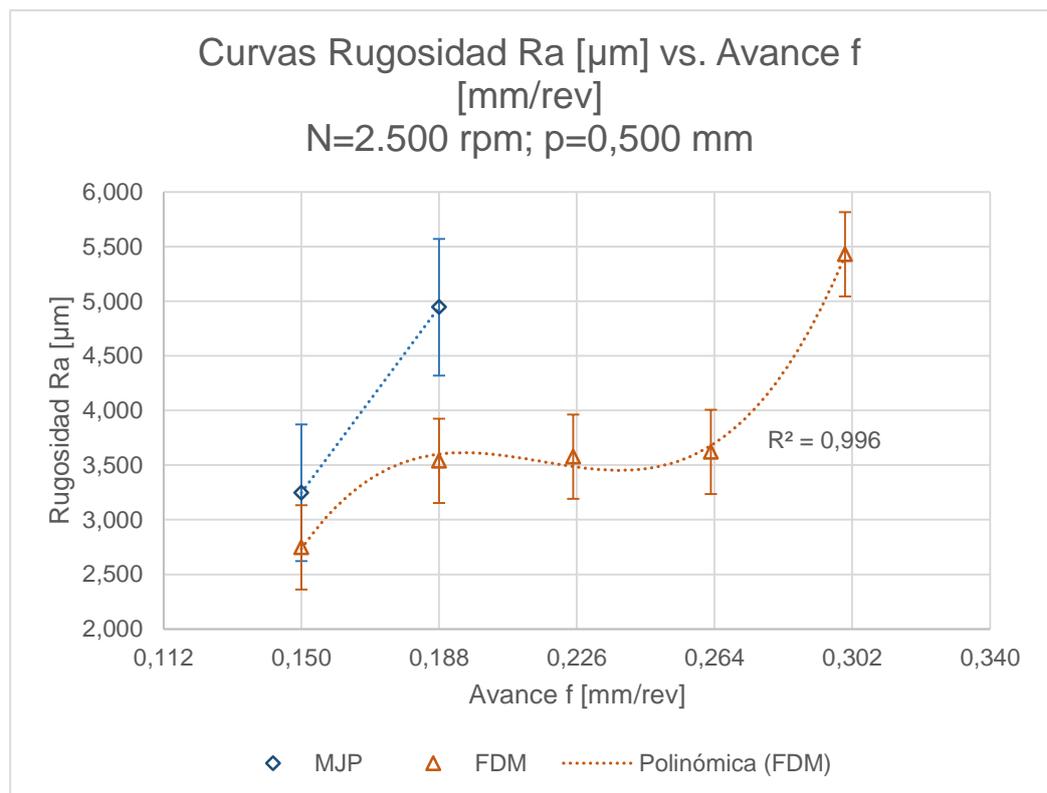
**Tabla 3.1 Medición de rugosidad superficial media de la primera fase del ensayo para torneado.**

N.º (número de la probeta ensayada)	Avance f [mm/rev] (parámetro de corte)	Rugosidad Ra [ $\mu m$ ] (MJP)	Rugosidad Ra [ $\mu m$ ] (FDM)
1	0,150	3,247	2,747
2	0,188	4,946	3,540
3	0,225	F.R.	3,577
4	0,263	F.R.	3,619
5	0,300	F.R.	5,429

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para avances mayores a 0,225 mm/rev no se puede determinar un valor de rugosidad (según el equipo utilizado e inspección tacto-visual), para las piezas fabricadas por la tecnología MJP. Ver Figuras 0.4, 0.5 y 0.6 en Anexo C.

La Figura 3.1 refleja la evolución de la rugosidad superficial media con el avance para cada probeta de cada tipo de tecnología de impresión. En la curva de la tecnología MJP se puede observar que, a medida que se incrementa el avance la rugosidad aumenta de manera brusca. En la curva de la tecnología FDM presenta una tendencia polinómica; se observa como la rugosidad aumenta con el incremento del avance. Las condiciones de corte con las que se mecanizaron las probetas número uno (1), de cada tecnología, presentan el mejor acabado superficial (menor rugosidad).



**Figura 3.1 Evolución de la rugosidad superficial media en función del avance, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3 Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional

Luego, se analiza el efecto de la velocidad de rotación [rpm] sobre la rugosidad superficial media, para las dos tecnologías de impresión 3D.

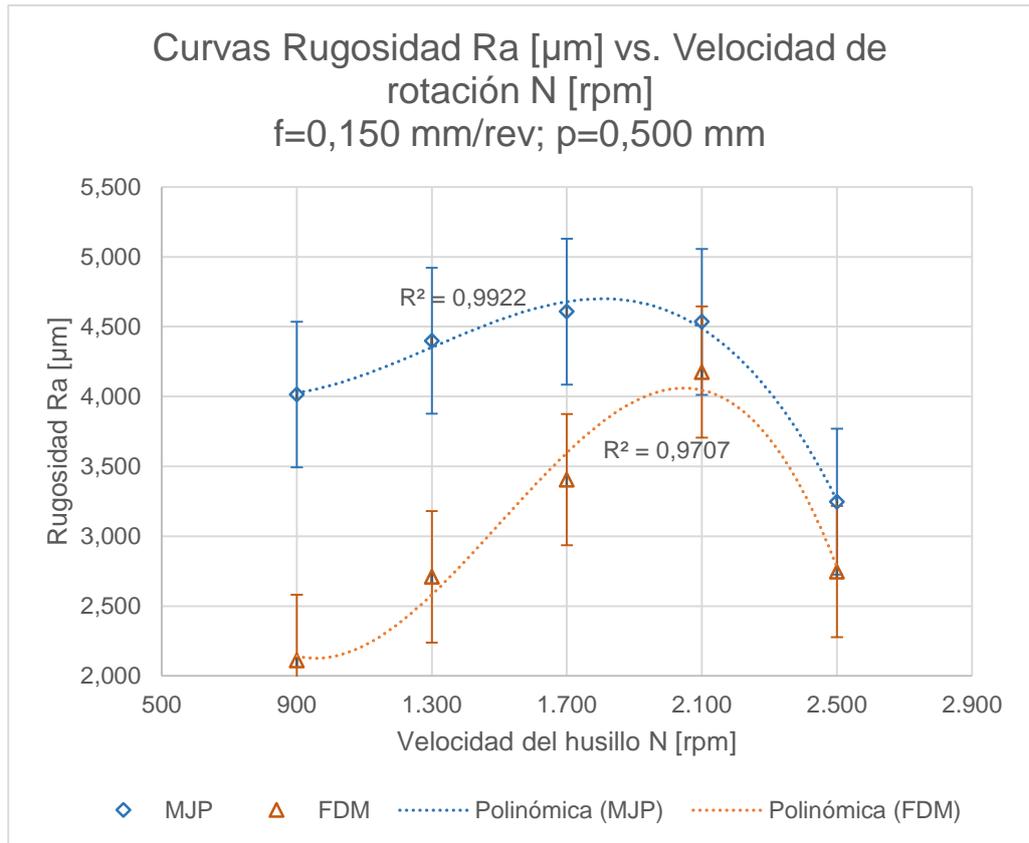
La Tabla 3.2 muestra las mediciones de rugosidad obtenidas para cada probeta de cada tipo de tecnología, maquinadas a diferentes velocidades de rotación.

**Tabla 3.2 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para torneado.**

<b>N.º</b> <i>(número de la probeta ensayada)</i>	<b>Velocidad del husillo N</b> <b>[rpm]</b> <i>(parámetro de corte)</i>	<b>Rugosidad Ra</b> <b>[µm]</b> <i>(MJP)</i>	<b>Rugosidad Ra</b> <b>[µm]</b> <i>(FDM)</i>
1	2.500	3,247	2,747
6	2.100	4,535	4,175
7	1.700	4,608	3,404
8	1.300	4,399	2,709
9	900	4,014	2,111

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.2 refleja el comportamiento de la rugosidad superficial media para diferentes velocidades de rotación para cada probeta de cada tipo de tecnología de impresión 3D. Las curvas de rugosidad de las tecnologías de impresión MJP y FDM presentan un comportamiento polinómico ascendente hasta cierto punto y, luego, a la máxima velocidad de rotación ensayada el valor de rugosidad desciende en los dos casos. Siendo esta disminución del valor de rugosidad, más significativo en la probeta de la tecnología MJP. Las condiciones de corte a las que se mecanizó la probeta número uno (1), para la tecnología MJP, y la probeta número nueve (9), para la tecnología FDM, reflejan el mejor acabado superficial.



**Figura 3.2 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad del husillo, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.4 Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte

Finalmente, se analiza el efecto de la profundidad de corte sobre la rugosidad superficial media, para los dos tipos de tecnología de impresión.

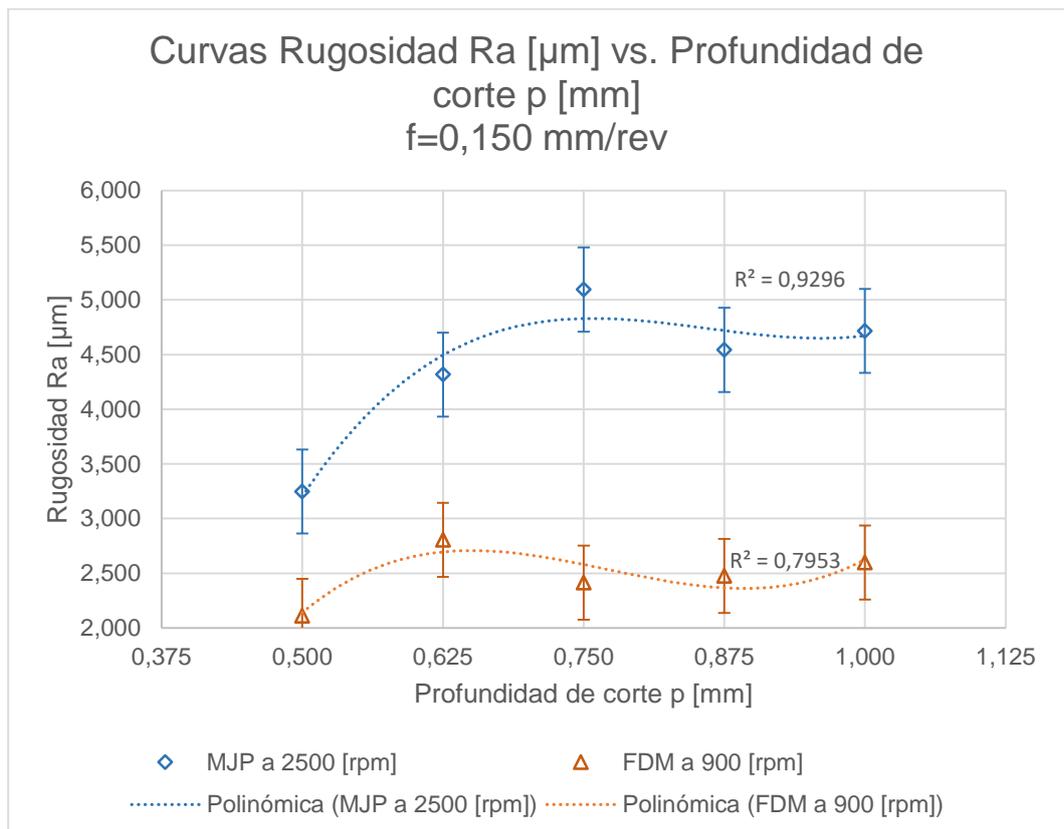
La Tabla 3.3 muestra las mediciones de rugosidad obtenidas para cada probeta de cada tipo de tecnología de impresión 3D, ensayadas a diferentes profundidades de corte. Siendo en la primera fila de datos, la probeta uno (1) para el tipo de tecnología MJP y la probeta nueve (9) para el tipo de tecnología FDM.

**Tabla 3.3 Medición de rugosidad superficial media de la tercera fase del ensayo para torneado.**

N.º (número de la probeta ensayada)	Profundidad de corte p [mm] (parámetro de corte)	Rugosidad Ra [µm] (MJP a 2.500 [rpm])	Rugosidad Ra [µm] (FDM a 900 [rpm])
1; 9	0,500	3,247	2,111
10	0,625	4,317	2,806
11	0,750	5,094	2,415
12	0,875	4,542	2,477
13	1,000	4,716	2,599

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.3 refleja la evolución de la rugosidad superficial media con la profundidad de corte utilizada para cada probeta de cada tipo de tecnología de impresión.



**Figura 3.3 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la profundidad de corte, para ambas tecnologías de impresión 3D, en torneado.**

Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de rugosidad para las dos tecnologías de impresión presentan un comportamiento polinómico ascendente. No obstante, la curva de rugosidad de la tecnología FDM muestra un comportamiento relativamente constante, en referencia al valor de rugosidad inicial.

Las condiciones de corte a las que se mecanizó la probeta número uno (1), para la tecnología MJP, y la probeta número nueve (9), para la tecnología FDM, nuevamente reflejan el mejor acabado superficial respecto a las profundidades de corte ensayadas.

## **3.2 Operaciones de fresado**

### **3.2.1 Rugosidad inicial**

Antes de mecanizar el material se tomaron mediciones de referencia y se observó el comportamiento de estas.

- Tecnología MJP:  $R_{a\text{ inicial}} = 4.397 \mu m$
- Tecnología FDM: Fuera de rango, se asume  $R_a = 40 \mu m$ , máxima medición de rugosidad del rugosímetro SGR-4500. Ver Figura 0.2 en Apéndice C.
- Material Polytec 1000 (Acetal):  $R_{a\text{ inicial}} = 1.524 \mu m$

Las mediciones de rugosidades para las probetas maquinadas se realizaron en sentido transversal y longitudinal a la dirección de avance. Debido a que, las mediciones realizadas en el sentido transversal presentaron valores con menor error estándar relativo en comparación con las mediciones en el sentido longitudinal, se decidió realizar el análisis de rugosidad con las mediciones obtenidas en el sentido transversal.

### **3.2.2 Primera fase de ensayos – Velocidad de avance**

Primero se analizó el comportamiento de la rugosidad superficial media en relación a diferentes velocidades de avance [mm/min], para las probetas de los dos tipos de tecnología de impresión 3D.

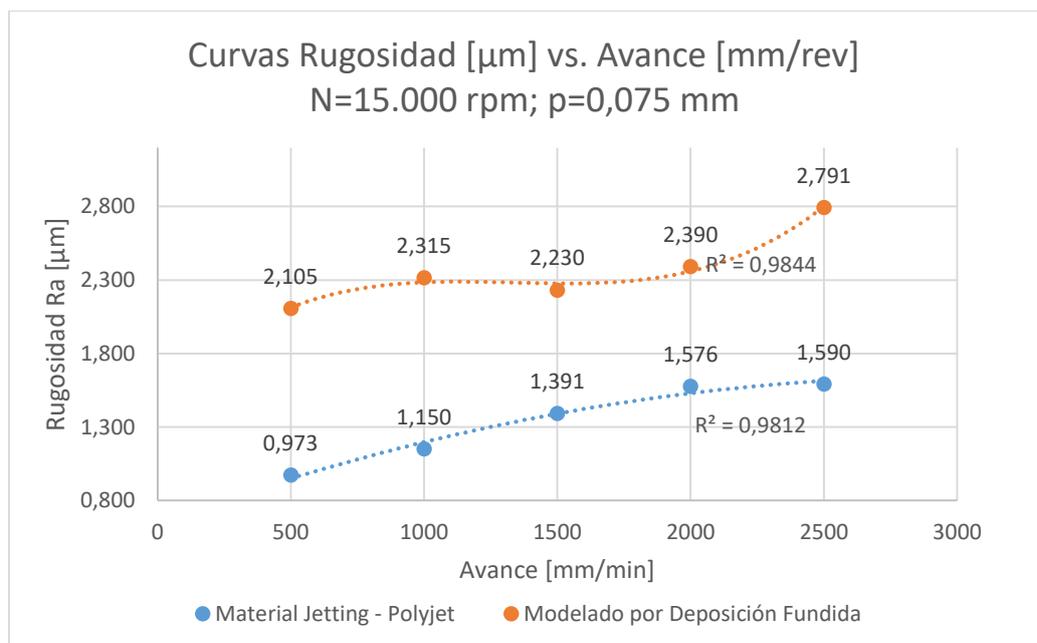
La Tabla 3.4 muestra las mediciones de rugosidad superficial obtenidos para los diferentes avances ensayados, manteniendo la velocidad de rotación (15.000 rpm) y profundidad de corte (0,075 mm) constantes. De los parámetros de cortes establecidos, el avance de 500 mm/min generó la mejor rugosidad superficial.

**Tabla 3.4 Medición de rugosidad superficial media de la primera fase del ensayo para fresado.**

N.º (número de la probeta ensayada)	Velocidad de avance $f_n$ [mm/min] (parámetro de corte)	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ] (MJP)	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ] (FDM)
1	500	0,973	2,105
2	1.000	1,150	2,315
3	1.500	1,391	2,230
4	2.000	1,576	2,390
5	2.500	1,590	2,791

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.4 se puede observar el comportamiento de la rugosidad superficial, tanto para el tipo de tecnología de impresión Polyjet como para la tecnología de Moldeado por Deposición Fundida.



**Figura 3.4 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad de avance, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado.**

Fuente: Elaboración propia

La curva de rugosidad de las piezas impresas con la tecnología Polyjet guarda una relación cuadrática, pero se logra apreciar que a medida que la velocidad de avance incrementa la rugosidad superficial aumenta. En el caso de la tecnología FDM, no se observan cambios bruscos de los valores de rugosidad, en referencia al valor de rugosidad inicial. Sin embargo, se puede apreciar un incremento mayor del valor de rugosidad con la máxima velocidad de avance ensayada.

### 3.2.3 Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional

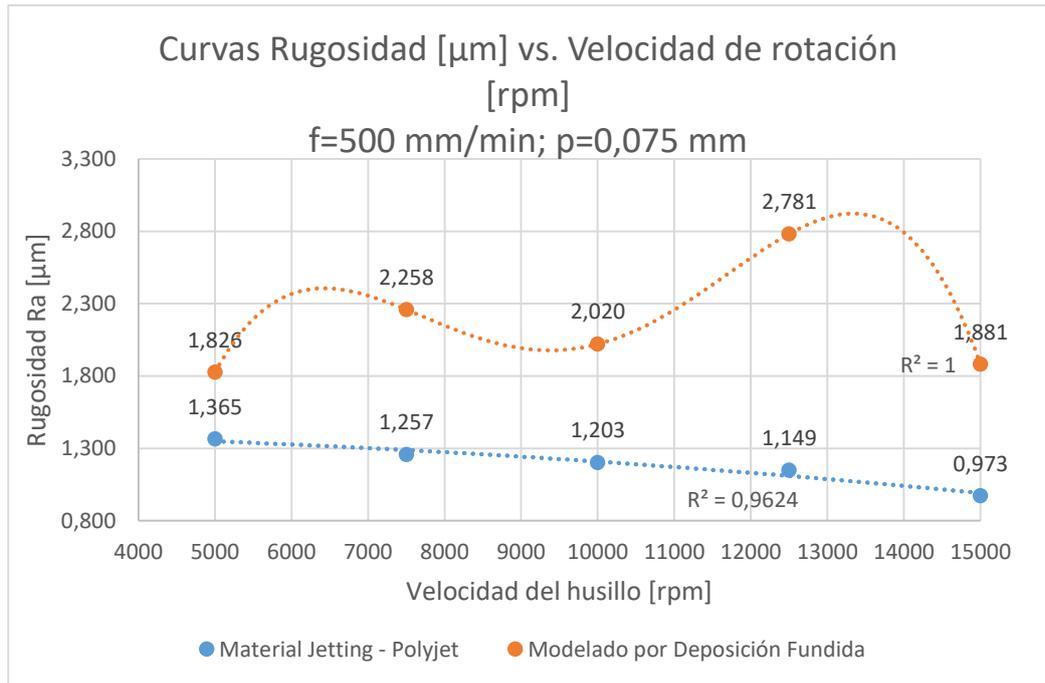
Luego, se analiza el efecto de la velocidad de rotación sobre la rugosidad superficial media, para los dos tipos de tecnología de impresión.

En la Tabla 3.5 se observa que en el caso de la tecnología MJP la velocidad de rotación que obtuvo la mejor rugosidad superficial fue el mayor valor ensayado (15.000 rpm); mientras que, para la tecnología FDM la velocidad de rotación que obtuvo el mejor acabado superficial, fue el menor valor ensayado (5.000 rpm).

**Tabla 3.5 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para fresado.**

<b>N.º</b> <i>(número de la probeta ensayada)</i>	<b>Velocidad del husillo [rpm]</b> <i>(parámetro de corte)</i>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b> <i>(MJP)</i>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b> <i>(FDM)</i>
<b>6</b>	5000	1,365	1,826
<b>7</b>	7.500	1,257	2,258
<b>8</b>	10.000	1,203	2,020
<b>9</b>	12.500	1,149	2,781
<b>1</b>	15.000	0,973	1,881

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.5 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la velocidad del husillo, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado.**

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 3.5 la curva de rugosidad presentó un comportamiento especial para el tipo de impresión FDM; aquí se determinó que para los valores más bajos de velocidad rotacional se obtienen valores bajos de rugosidad, a diferencia de cuando se emplearon velocidades altas. En las piezas impresas con la tecnología MJP, el comportamiento de la curva de rugosidad mejora (muestra valores más bajos) con el aumento de la velocidad de rotación.

### 3.2.4 Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte

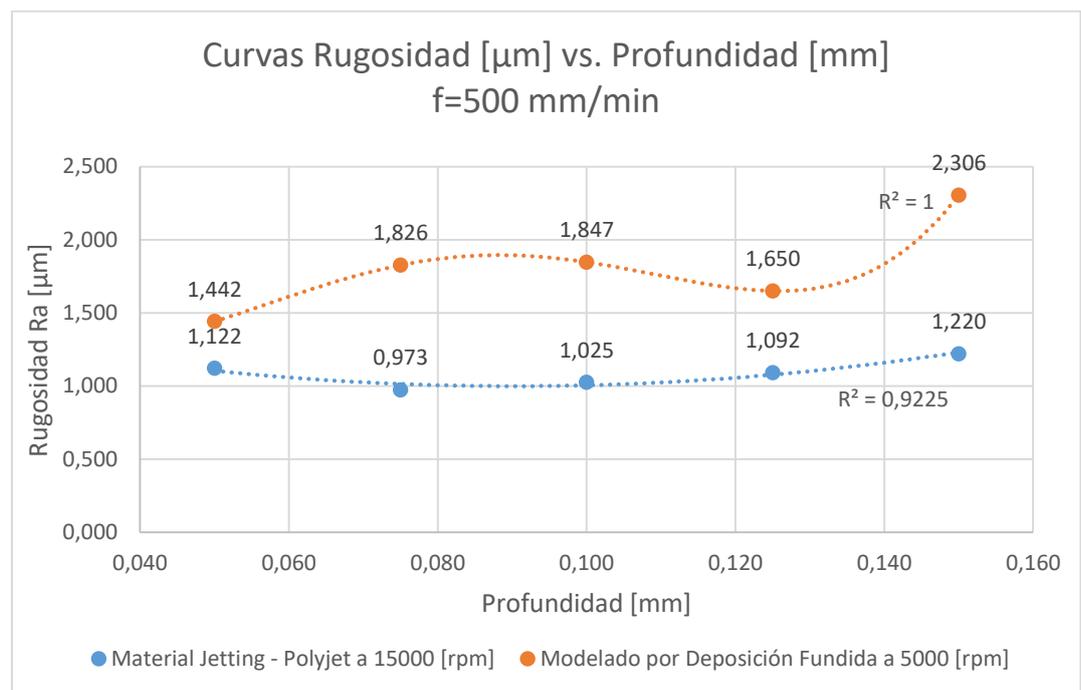
Finalmente, se analiza el comportamiento de la rugosidad superficial media en relación a la profundidad de corte, para los dos tipos de tecnología de impresión 3D.

**Tabla 3.6 Medición de rugosidad superficial media de la segunda fase del ensayo para fresado.**

N.º (número de la probeta ensayada)	Profundidad de corte [mm] (parámetro de corte)	Rugosidad Ra [µm] (MJP)	Rugosidad Ra [µm] (FDM)
10	0,050	1,122	1,442
1; 6	0,075	0,973	1,826
11	0,100	1,025	1,847
12	0,125	1,092	1,650
13	0,150	1,220	2,306

Fuente: Elaboración propia.

Como se describe en la Tabla 3.6 para la tercera fase de ensayos, se varió el parámetro de profundidad de corte y se conservaron constante los valores de velocidad de avance y de rotación, obtenidos previamente.



**Figura 3.6 Evolución de la rugosidad superficial media en función de la profundidad de corte, para ambas tecnologías de impresión 3D, en fresado**

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en la segunda fase de ensayos, la rugosidad presentó un comportamiento distinto entre ambas tecnologías de impresión; para el caso de la tecnología MJP, el menor valor de rugosidad superficial fue obtenido con la profundidad de corte 0,075 mm, y en el caso de la

tecnología FDM, la menor rugosidad se obtuvo con la menor profundidad establecida (0,050 mm).

Como es mostrado en la Figura 3.6 en el caso de la tecnología MJP, se observó un comportamiento creciente de la rugosidad superficial, a medida que aumenta la profundidad de corte. Existe un punto (0,050 mm) donde a pesar de ser la más baja profundidad de corte, se presenta una rugosidad elevada ( $R_a = 1,122 \mu m$ ). Para el caso de la tecnología FDM, no se observó un comportamiento estrictamente creciente, debido a que se presentaron ciertos datos aberrantes, pero se obtuvo que el mejor acabado superficial ocurre en ese punto (0,050 mm).

### 3.3 Ensayos en el material base Polytec 1000 - Acetal

Se analiza el efecto de las mejores condiciones de corte encontradas anteriormente en torneado y fresado sobre la rugosidad superficial media para el material Polytec 1000 (Acetal).

#### 3.3.1 Para torneado

La Tabla 3.7 muestra las mediciones de rugosidad obtenidas al mecanizar el material base con los distintos grupos de condiciones de corte encontrados para torneado (mejores condiciones de corte que obtuvieron la menor rugosidad para las tecnologías de impresión ensayadas). La columna "N.º Ensayo" indica el grupo de condición de corte, siendo cero (0) la probeta sin mecanizar, uno (1) y dos (2) la probeta mecanizada con las mejores condiciones de corte para el tipo de tecnología MJP y FDM, respectivamente.

**Tabla 3.7 Medición de rugosidad media del material base para torneado.**

N.º Ensayo	Rugosidad Ra [ $\mu m$ ] (Polytec 100 – Acetal)
0	0,444
1	1,196
2	1,479

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2 Para fresado

En la Tabla 3.8 se muestran los valores de rugosidad obtenidos con las condiciones de corte para fresado. La columna “N.º Ensayo” indica el grupo de condición de corte utilizado, siendo cero (0) la probeta sin mecanizar, uno (1) y dos (2) la probeta mecanizada con las mejores condiciones de corte para las tecnologías MJP y FDM, respectivamente.

**Tabla 3.8 Medición de rugosidad media del material base para fresado.**

N.º Ensayo	Rugosidad Ra [µm] (Polytec 100 – Acetal)
0	1,524
1	1,416
2	0,831

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Cálculo del Índice de Maquinabilidad (IM)

Para el cálculo del IM, se emplea la ecuación 1.1.

#### Para torneado

- Tecnología MJP:

$$IM_{material\ de\ prueba} = \frac{1,196}{3,247}$$

$$IM_{material\ de\ prueba} = \mathbf{0,368}$$

- Tecnología FDM:

$$IM_{material\ de\ prueba} = \frac{1,479}{2,111}$$

$$IM_{material\ de\ prueba} = \mathbf{0,701}$$

#### Para Fresado

- Tecnología MJP:

$$IM_{material\ de\ prueba} = \frac{0,831}{0,973}$$

$$IM_{material\ de\ prueba} = 0,854$$

- Tecnología FDM:

$$IM_{material\ de\ prueba} = \frac{1,416}{1,442}$$

$$IM_{material\ de\ prueba} = 0,982$$

De acuerdo a los índices de maquinabilidad obtenidos bajo el criterio de acabado superficial (rugosidad), la tecnología FDM obtuvo valores de maquinabilidad más altos que la tecnología MJM. Una hipótesis para explicar este resultado es que, como se utiliza la rugosidad como criterio principal de medición, las probetas fabricadas con la tecnología MJM cuentan con un buen acabado superficial al salir del equipo de impresión, por lo que, la rugosidad obtenida con el maquinado posterior no fue tan representativo. Caso contrario, las probetas fabricadas con la tecnología FDM al salir del equipo de impresión cuentan con un mal acabado superficial, por lo cual, con el maquinado posterior la rugosidad mejoró de manera más significativa, lo que se vio reflejado al calcular los índices de maquinabilidad para cada tecnología. Sin embargo, es importante mencionar que, para las dos tecnologías de impresión 3D, el mecanizado mejoró la rugosidad superficial en relación a su valor de rugosidad inicial (sin mecanizar). Para la tecnología MJM el porcentaje de mejora de la rugosidad superficial fue de 31.2% y 77.9% para las operaciones de torneado y fresado, respectivamente; y para la tecnología FDM el porcentaje de mejora de la rugosidad fue de 94.7% y 96.4% para las operaciones de torneado y fresado, respectivamente.

### 3.5 Análisis de Costos

Debido a que este trabajo es de tipo investigativo, se realizó un análisis de costos básico, detallando los costos de fabricación de las piezas analizadas y el alquiler de los equipos empleados para la experimentación. Los costos mencionados se muestran en las Tablas 3.9 y 3.10.

**Tabla 3.9 Costos de alquiler de máquinas herramientas.**

Máquina Herramienta	Alquiler precio/tiempo [\$/h]	Tiempo empleado [h]	Costo de alquiler [\\$]
ROLAND MDx-40A	12	10	120
Torno paralelo DMTG CKE6136z	20	6	120
Subtotal (\$)			240

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.10 Costos de fabricación de las probetas.**

Tecnología de impresión		Alquiler precio/tiempo [\$/h]	Tiempo empleado [h]	Costo del material precio/peso (\$/gr)	Peso del material [gr]	Costo del material [\\$]	Costo Total [\\$]
<b>ProJet 3510SD</b>	Cilindro	10	12	0,9	782	703,8	976,8
	Placa				170	153,0	
<b>Cube</b>	Cilindro	5	5	0,5	782	391,0	501,0
	Placa				170	85,0	
Subtotal (\$)							1477,8

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 3.11 se refleja el valor aproximado del costo total de fabricación y experimentación para el desarrollo del presente proyecto investigativo.

**Tabla 3.11 Valor total final de costos de fabricación y experimentación.**

<b>Total [\\$]</b>	1717,8
--------------------	--------

Fuente: Elaboración propia.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Con los resultados obtenidos y las gráficas desarrolladas podemos concluir que la metodología diseñada cumplió con el objetivo principal de medir la maquinabilidad de piezas impresas en 3D. Además, se logró analizar la influencia de cada parámetro de corte evaluado sobre la rugosidad obtenida en la pieza maquinada y se obtuvieron las condiciones de corte con las que se logra mejorar la calidad superficial (rugosidad).

Las principales conclusiones que se pudieron obtener de los resultados obtenidos son:

- Respecto a las piezas manufacturadas por la tecnología Material Jetting– Polyjet (MJP), para ambas operaciones de mecanizado, la mejor respuesta al maquinado se consigue con velocidades de avance bajas, velocidades rotacionales altas y profundidades bajas.
- Para la tecnología MJP, en torneado, los valores de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte para los cuales se obtuvo un mejor acabado superficial son: 0,15 mm/rev; 2.500 rpm y 0,5 mm, respectivamente.
- Para la tecnología MJP, en torneado, se obtuvo un índice de maquinabilidad de 0,368; lo que señala que presenta una baja disposición al mecanizado por este proceso (poca mejora de su rugosidad superficial), respecto al material base (Polytec 1000 – Acetal).
- Para la tecnología MJP, en fresado, los valores de velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte para los cuales se consiguió una mejor calidad de superficie son: 500 mm/min; 15.000 rpm y 0,075 mm, respectivamente.
- Para la tecnología MJP, en fresado, se obtiene un índice de maquinabilidad igual a 0,854; lo que señala que tiene alta maquinabilidad

por este proceso (grande mejora de la rugosidad superficial), respecto al material base.

- Respecto a las piezas fabricadas por la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM), para ambas operaciones de mecanizado, la mejor calidad superficial se obtiene con velocidades de avance bajas, velocidades rotacionales medias y profundidades bajas. Para fresado, la velocidad rotacional muestra mayor influencia en el mecanizado, bajo criterios de acabado.
- Para la tecnología FDM, en torneado, los valores de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte para los cuales se logró un mejor acabado superficial son: 0,15 mm/rev; 900 rpm y 0,5 mm, respectivamente y el índice de maquinabilidad alcanzado es de 0,701; lo que significa que es un material medianamente mecanizable por este proceso, respecto al material base.
- Para la tecnología FDM, en fresado, los valores de velocidad de avance, velocidad rotacional y profundidad de corte para los cuales se consiguió una mejor calidad de superficie son: 500 mm/min; 5.000 rpm y 0,05 mm, respectivamente y el índice de maquinabilidad obtenido es igual a 0,982; lo que indica que es un material con alta maquinabilidad, respecto al material base.
- Las piezas impresas por la tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM), presentan un índice de maquinabilidad más elevado, en ambos procesos de mecanización.
- Finalmente, el avance es el parámetro de corte que mayor influencia presentó en el mecanizado de estas piezas, bajo criterios de acabado.

## 4.2 Recomendaciones

- Realizar una limpieza adecuada de las piezas impresas por la tecnología Material Jetting – Polyjet es importante para un correcto análisis, ya que de esto depende la rugosidad inicial que se mide.
- Para obtener un rango de profundidad de corte más amplio al mecanizar las piezas fabricadas por la tecnología de impresión FDM (reducir fallas en la superficie), se recomienda colocar el máximo porcentaje de Infill posible

en los parámetros de impresión y así, darle un mayor espesor de capa superficial que sea maquinable. Además, para el proceso de torneado, se recomienda, utilizar un método de sujeción de la pieza tipo boquilla para un apriete más homogéneo.

- Para ampliar y profundizar el estudio de la maquinabilidad de piezas impresas en 3D, se debe experimentar una mayor cantidad de valores de parámetros de corte, para obtener curvas de rugosidad más detalladas. Además, se deben ensayar integrando más tecnologías de impresión 3D.
- Para investigaciones futuras, adaptar este tipo de metodología experimental, enfocada a procesos de fabricación similares, pero empleando otro tipo de materiales como los metales.

# BIBLIOGRAFÍA

## Libros

- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. México: Mc Graw Hill.
- Inc., 3. S. (2018). *3D Systems*. Obtenido de [https://www.3dsystems.com/sites/default/files/projet\\_3500\\_plastic\\_0115\\_usen\\_web.pdf](https://www.3dsystems.com/sites/default/files/projet_3500_plastic_0115_usen_web.pdf)
- Schmid, S. K.-S. (2008). *MANUFACTURA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*. México: Pearson Educación.

## Páginas web

- Corporation, R. D. (2019). *ROLAND*. Obtenido de <https://www.rolanddga.com/es/productos/3d/mdx-40a-fresadora-sobremesa>
- INDUSTRY, D. (2019). *phase II*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/phase-ii/product-25675-654813.html>
- s.a., M. (22 de Diciembre de 2018). *CATÁLOGO TORNOS PARALELOS C.N.C. SERIE CKE*. Obtenido de CATÁLOGO TORNOS PARALELOS C.N.C. SERIE CKE: [www.micfasa.com.ar](http://www.micfasa.com.ar)

## Artículos de revista tomados de Internet

- (ATIGA), J. d. (2017). Oportunidades Industria 4.0 en Galicia. *Estado del Arte de Fabricación Aditiva*, 21-27.
- CO.LTD, D. M. (10 de Diciembre de 2018). *MACH*. Obtenido de Machine tool expert: <https://dlmach.en.alibaba.com/>
- Coromant, S. (2015). Turning Tools. *Cutting tools from Sandvik Coromant*, 114.
- Coromant, S. (- de - de 2018). *El futuro de la fabricación es ahora*. Obtenido de Radio de punta de la plaquita y profundidad de corte: <https://www.sandvik.coromant.com/>
- Ensinger. (2017). Machining Recommendations for Semi-finished engineering Plastics. *Ensinger*, 15.

- Francisco Mata Cabrera, J. P. (2011). Mecanizado de materiales compuestos de matriz termoplástica. Efecto de la profundidad de pasada en las fuerzas de corte y el acabado superficial. *Tecnología y Desarrollo.*, 4.
- Francisco Mata, J. P. (2010). Definición de un índice de maquinabilidad para materiales compuestos de matriz termoplástica a partir del estudio experimental. *Científica*, 180.
- polypres. (2018). *POLYTEC 1000*. España: .
- Romero, N. F. (2017). Ensayo de arranque de viruta para la obtención de parámetros de mecanizado del Technyl. *Trabajo de titulación*, Chile.
- Systems, 3. (Noviembre de 2018). *3D Systems*. Obtenido de <https://es.3dsystems.com/>
- Ultimaker. (2017). *Ficha de datos técnicos ABS*. .: .
- Zahera, M. (2012). La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos. *XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2091-2095.

### **Artículos de revistas**

- Ramirez, E. (2018). *Guía para práctica de Laboratorio de Mecanización: Fresa CNC*. Guayaquil-Ecuador.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## Clave de código interno para identificación de piezas de trabajo

### Ejemplo

1	M	C	-	N2500	-	f0,150	-	p0,500
1	2	3		4		5		6

### Clave

1. Número de pieza ensayada por tecnología. Número entero.
2. Tecnología de impresión 3D.  
M: Material Jetting – Polyjet.  
F: Modelado por deposición fundida.
3. Operación de mecanizado.  
C: Cilindrado – torneado.  
P: Planeado – fresado.
4. Velocidad rotacional. Letra N seguida de cantidad de velocidad en rpm.
5. Avance. Letra f seguida de avance en mm/rev.
6. Profundidad de corte. Letra p seguida de profundidad de corte.

## Identificación de piezas de trabajo ensayadas

- Para torneado

Tabla 0.1 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología MJP para torneado.

IDENTIFICACIÓN DE PIEZAS ENSAYADA				
Tecnología: Material Jetting - Polyjet				
Operación de mecanizado: Torneado - Cilindrado				
Primera Fase: Avance f [mm/rev]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/rev]	p [mm]	
1	2.500	0,150	0,500	1MC-N2500-f0,150-p0,500
2		0,188		2MC-N2500-f0,188-p0,500
3		0,225		3MC-N2500-f0,225-p0,500
4		0,263		4MC-N2500-f0,263-p0,500
5		0,300		5MC-N2500-f0,300-p0,500
Segunda fase: Velocidad rotacional N [rpm]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/rev]	p [mm]	
6	2.100	0,150	0,500	6MC-N2100-f0,150-p0,500
7	1.700			7MC-N1700-f0,150-p0,500
8	1.300			8MC-N1300-f0,150-p0,500
9	900			9MC-N0900-f0,150-p0,500
Tercera Fase: Profundidad de corte p [mm]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/rev]	p [mm]	
10	2.500	0,150	0,625	10MC-N2500-f0,150-p0,625
11			0,750	11MC-N2500-f0,150-p0,750
12			0,875	12MC-N2500-f0,150-p0,875
13			1,000	13MC-N2500-f0,150-p1,000

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.2 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología FDM para torneado.**

<b>IDENTIFICACIÓN DE PIEZAS ENSAYADA</b>				
<b>Tecnología: Modelado por deposición fundida</b>				
<b>Operación de mecanizado: Torneado - Cilindrado</b>				
<b>Primera Fase: Avance f [mm/rev]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/rev]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>1</b>	2.500	0,150	0,500	1FC-N2500-f0,150-p0,500
<b>2</b>		0,188		2FC-N2500-f0,188-p0,500
<b>3</b>		0,225		3FC-N2500-f0,225-p0,500
<b>4</b>		0,263		4FC-N2500-f0,263-p0,500
<b>5</b>		0,300		5FC-N2500-f0,300-p0,500
<b>Segunda fase: Velocidad rotacional N [rpm]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/rev]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>6</b>	2.100	0,150	0,500	6FC-N2100-f0,150-p0,500
<b>7</b>	1.700			7FC-N1700-f0,150-p0,500
<b>8</b>	1.300			8FC-N1300-f0,150-p0,500
<b>9</b>	900			9FC-N0900-f0,150-p0,500
<b>Tercera Fase: Profundidad de corte p [mm]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/rev]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>10</b>	900	0,150	0,625	10FC-N0900-f0,150-p0,625
<b>11</b>			0,750	11FC-N0900-f0,150-p0,750
<b>12</b>			0,875	12FC-N0900-f0,150-p0,875
<b>13</b>			1,000	13FC-N0900-f0,150-p1,000

Fuente: Elaboración Propia.

- Para fresado

Tabla 0.3 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología MJP para fresado.

IDENTIFICACIÓN DE PIEZAS ENSAYADA				
Tecnología: Material Jetting - Polyjet				
Operación de mecanizado: Fresado - Planeado				
Primera Fase: Avance f [mm/min]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/min]	p [mm]	
1	15.000	500	0,075	1MP-N15000-f500-p0,075
2		1.000		2MP-N15000-f1000-p0,075
3		1.500		3MP-N15000-f1500-p0,075
4		2.000		4MP-N15000-f2000-p0,075
5		2.500		5MP-N15000-f2500-p0,075
Segunda fase: Velocidad rotacional N [rpm]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/min]	p [mm]	
6	5.000	500	0,075	6MP-N5000-f500-p0,075
7	7.500			7MP-N7500-f500-p0,075
8	10.000			8MP-N10000-f500-p0,075
9	12.500			9MP-N15000-f500-p0,075
Tercera Fase: Profundidad de corte p [mm]				
N.º	Condiciones de corte			Código interno
	N [rpm]	f [mm/min]	p [mm]	
10	15.000	500	0,050	10MP-N15000-f500-p0,5
11			0,100	11MP-N15000-f500-p0,1
12			0,125	12MP-N15000-f500-p0,125
13			0,150	13MP-N15000-f500-p0,15

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.4 Registro de piezas ensayadas, fabricadas por la tecnología FDM para fresado.**

<b>IDENTIFICACIÓN DE PIEZAS ENSAYADA</b>				
<b>Tecnología: Modelado por deposición fundida</b>				
<b>Operación de mecanizado: Fresado - Planeado</b>				
<b>Primera Fase: Avance f [mm/min]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/min]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>1</b>	15.000	500	0,075	1FP-N15000-f500-p0,075
<b>2</b>		1.000		2FP-N15000-f1000-p0,075
<b>3</b>		1.500		3FP-N15000-f1500-p0,075
<b>4</b>		2.000		4FP-N15000-f2000-p0,075
<b>5</b>		2.500		5FP-N15000-f2500-p0,075
<b>Segunda fase: Velocidad rotacional N [rpm]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/min]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>6</b>	5.000	500	0,075	6FP-N5000-f500-p0,075
<b>7</b>	7.500			7FP-N7500-f500-p0,075
<b>8</b>	10.000			8FP-N10000-f500-p0,075
<b>9</b>	12.500			9FP-N0900-f12500-p0,075
<b>Tercera Fase: Profundidad de corte p [mm]</b>				
<b>N.º</b>	<b>Condiciones de corte</b>			<b>Código interno</b>
	<b>N [rpm]</b>	<b>f [mm/min]</b>	<b>p [mm]</b>	
<b>10</b>	5.000	500	0,050	10FP-N5000-f500-p0,05
<b>11</b>			0,100	11FP-N5000-f500-p0,1
<b>12</b>			0,125	12FP-N5000-f500-p0,125
<b>13</b>			0,150	13FP-N5000-f500-p0,15

Fuente: Elaboración propia.

## APÉNDICE B

### Medición de rugosidad superficial media (Ra)

- Para torneado

- ❖ **Rugosidad inicial**

**Tabla 0.5 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJP para torneado.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha	11-ene-19	Temperatura	23,3°C			
Hora	09H30-11H30	Humedad	53,40%			
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
<b>0-1</b>	OMC1	a	3,920	4,420	Media Aritmética Ra [µm]	
			3,219		4,248	
			6,121		Valor máximo [µm]	
		b	4,012	4,562	6,121	Valor mínimo [µm]
			5,608		3,219	
			4,067		Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
		c	4,770	4,324	0,724	Desviación estándar [µm]
			4,298		0,851	
			3,903		Error estándar Relativo [%]	
		d	3,727	3,685	5,782	7,440
			3,694		Media Aritmética Ra [µm]	
			3,633		3,536	
<b>0-2</b>	OMC2	a	6,121	4,163	6,121	
			3,034		Valor máximo [µm]	
			3,333		6,121	
		b	2,741	3,422	4,127	Valor mínimo [µm]
			4,127		2,741	
			3,399		Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
		c	3,045	3,074	0,830	Desviación estándar [µm]
			2,754		0,911	
			3,424		Error estándar Relativo [%]	
		d	3,920	3,483	7,440	7,440
			3,264		Media Aritmética Ra [µm]	
			3,266		6,172	
<b>0-3</b>	OMC3	a	4,760	6,172	Media Aritmética Ra [µm]	

			8,117			6,693		
			5,638			Valor máximo [μm]		
			7,265			8,546		
		b		7,737	7,400			Valor mínimo [μm]
					8,546			4,760
					6,496			Varianza [μm <sup>2</sup> ]
		c		6,623	6,690			1,072
					6,684			Desviación estándar [μm]
					6,276			1,035
		d		6,242	6,249			Error estándar Relativo [%]
					6,200			4,465
					4,811			Media Aritmética Ra [μm]
		0-4	OMC4	a	4,811	4,916		4,396
4,688	Valor máximo [μm]							
5,249	5,707							
b				3,815	3,999			Valor mínimo [μm]
					3,681			3,389
					3,764			Varianza [μm <sup>2</sup> ]
c				5,147	4,748			0,533
					5,707			Desviación estándar [μm]
					4,987			0,730
d				3,705	4,006			Error estándar Relativo [%]
					3,389			4,796
					3,721			4,718
<b>Promedio de Medias aritméticas Ra [μm]</b>						4,718		

Fuente: Elaboración propia.

❖ Primera fase de ensayos – Avance

Tabla 0.6 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (avance) para torneado, tecnología MJP.

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Tecnología: Material Jetting - Polyjet					
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	23,7°C		
Hora:	09H30-11H30	Humedad:	52,60%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
1	1MC-N2500-f0,150-p0,500	a	3,334	3,276	Media Aritmética Ra [µm]
			3,330		3,247
			3,165		Valor máximo [µm]
		b	3,237	3,305	3,543
			3,349		Valor mínimo [µm]
			3,330		2,832
		c	2,922	2,939	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			2,832		0,047
			3,064		Desviación estándar [µm]
		d	3,543	3,468	0,218
			3,521		Error estándar Relativo [%]
			3,341		1,935
2	2MC-N2500-f0,188-p0,500	a	5,374	5,395	Media Aritmética Ra [µm]
			5,323		4,946
			5,489		Valor máximo [µm]
		b	4,099	4,139	5,709
			3,841		Valor mínimo [µm]
			4,477		3,841
		c	4,439	4,679	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			4,758		0,391
			4,839		Desviación estándar [µm]
		d	5,614	5,569	0,625
			5,709		Error estándar Relativo [%]
			5,385		3,651

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0.7 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (avance) para torneado, tecnología FDM.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida					
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	22,0°C		
Hora:	09H30-11H30	Humedad:	61,80%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
1	1FC-N2500-f0,150-p0,500	a	2,626	2,635	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			2,656		2,747
			2,624		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,161	3,033	3,161
			2,907		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,031		2,607
		c	2,745	2,665	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,643		0,034
			2,607		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	2,698	2,654	0,185
			2,626		Error estándar Relativo [%]
			2,638		1,941
2	2FC-N2500-f0,188-p0,500	a	3,937	3,950	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			4,007		3,540
			3,905		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,482	3,208	4,007
			2,977		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,165		2,977
		c	3,360	3,193	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			3,161		0,149
			3,059		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	3,715	3,809	0,385
			3,738		Error estándar Relativo [%]
			3,973		3,144
3	3FC-N2500-f0,225-p0,500	a	4,143	3,507	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			3,209		3,577
			3,169		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,273	3,429	4,143
			3,541		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,472		3,169
		c	3,872	3,885	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			3,904		0,109
			3,878		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	3,465	3,489	0,330
			3,784		Error estándar Relativo [%]

			3,219		2,660
4	4FC-N2500-f0,263-p0,500	a	3,566	3,548	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			3,583		3,619
			3,494		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,131	3,093	4,050
			3,145		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,003		3,003
		c	3,917	3,835	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			3,917		0,135
			3,672		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	4,050	4,002	0,368
			3,995		Error estándar Relativo [%]
			3,960		2,931
5	5FC-N2500-f0,300-p0,500	a	5,527	5,495	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			5,561		5,429
			5,397		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	5,274	5,351	5,788
			5,211		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			5,568		5,038
		c	5,260	5,291	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			5,038		0,042
			5,574		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	5,533	5,579	0,205
			5,417		Error estándar Relativo [%]
			5,788		1,089

Fuente: Elaboración propia.

❖ Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional

**Tabla 0.8 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para torneado, tecnología MJJ.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Tecnología: Material Jetting - Polyjet					
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	22,4°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	63,00%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
6	6MC-N2100-f0,150-p0,500	a	4,532	4,395	Media Aritmética Ra [µm]
			4,523		4,535
			4,131		Valor máximo [µm]
		b	5,480	5,275	5,480
			5,038		Valor mínimo [µm]
			5,308		3,919
		c	3,919	3,940	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			3,929		0,272
			3,971		Desviación estándar [µm]
		d	4,506	4,528	0,522
			4,645		Error estándar Relativo [%]
			4,434		3,322
7	7MC-N1700-f0,150-p0,500	a	4,997	5,105	Media Aritmética Ra [µm]
			5,209		4,608
			5,108		Valor máximo [µm]
		b	3,970	4,187	5,209
			4,216		Valor mínimo [µm]
			4,374		3,970
		c	4,326	4,282	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			4,048		0,180
			4,472		Desviación estándar [µm]
		d	4,868	4,857	0,424
			4,863		Error estándar Relativo [%]
			4,839		2,655
8	8MC-N1300-f0,150-p0,500	a	4,241	4,143	Media Aritmética Ra [µm]
			4,030		4,399
			4,158		Valor máximo [µm]
		b	4,439	4,417	4,837
			4,351		Valor mínimo [µm]
			4,460		4,030
		c	4,837	4,560	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			4,568		0,046
			4,275		Desviación estándar [µm]

9	9MC-N0900-f0,150-p0,500	d	4,433	4,477	0,215
			4,614		Error estándar Relativo [%]
			4,383		1,413
		a	4,095	4,083	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			4,113		4,014
			4,041		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,366	3,488	4,464
			3,550		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,549		3,366
		c	4,133	4,324	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			4,464		0,124
			4,375		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	4,026	4,161	0,352
			4,068		Error estándar Relativo [%]
			4,390		2,529

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.9 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para torneado, tecnología FDM.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida					
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	22,7°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	67,00%		
N.º	Cl	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
6	6FC-N2100-f0,150-p0,500	a	4,457	4,548	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			4,571		4,175
			4,615		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,816	3,518	4,692
			3,440		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,297		3,297
		c	4,630	4,518	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			4,231		0,221
			4,692		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	4,332	4,116	0,470
			4,020		Error estándar Relativo [%]
			3,996		3,249
7	7FC-N1700-f0,150-p0,500	a	3,512	3,564	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			3,426		3,404
			3,755		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	3,781	3,428	3,781
			3,180		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			3,322		3,170

		c	3,323	3,418	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			3,664		0,050
			3,266		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	3,281	3,207	0,224
			3,170		Error estándar Relativo [%]
			3,171		1,899
<b>8</b>	8FC-N1300-f0,150-p0,500	a	2,882	2,703	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			2,706		2,709
			2,522		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,554	2,577	3,065
			2,586		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			2,590		2,522
		c	2,735	2,610	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,573		0,034
			2,523		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	2,966	2,947	0,185
			3,065		Error estándar Relativo [%]
			2,811		1,968
<b>9</b>	9FC-N0900-f0,150-p0,500	a	2,030	1,937	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			1,823		2,111
			1,958		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,372	2,110	2,668
			1,966		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			1,992		1,649
		c	2,668	2,641	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,630		0,132
			2,624		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	1,649	1,758	0,364
			1,766		Error estándar Relativo [%]
			1,858		4,973

Fuente: Elaboración propia.

❖ Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte

Tabla 0.10 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para torneado, tecnología MJJ.

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	21,0°C			
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	68,00%			
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
10	10MC-N2500-f0,150-p0,625	a	4,103	4,067	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
			3,927		4,317	
			4,172		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	
		b	4,268	4,147	4,750	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			4,219		3,927	
			3,953		Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]	
		c	4,591	4,461	0,068	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			4,369		0,260	
			4,422		Error estándar Relativo [%]	
		d	4,400	4,594	1,742	
			4,750			
			4,633			
11	11MC-N2500-f0,150-p0,750	a	5,358	5,219	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
			4,877		5,094	
			5,422		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	
		b	5,503	5,491	5,664	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			5,664		4,558	
			5,307		Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]	
		c	4,573	4,817	0,132	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			4,889		0,364	
			4,990		Error estándar Relativo [%]	
		d	4,815	4,848	2,063	
			5,171			
			4,558			
12	12MC-N2500-f0,150-p0,875	a	5,011	4,732	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	
			4,734		4,542	
			4,450		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	
		b	4,879	4,684	5,011	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			4,407		4,092	
			4,765		Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]	
		c	4,466	4,446	0,068	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			4,297			
			4,574			

13	13MC-N2500-f0,150-p1,000	d	4,382	4,308	0,261
			4,449		Error estándar Relativo [%]
			4,092		1,660
		a	4,773	4,969	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			4,882		4,716
			5,253		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	4,719	5,006	5,294
			5,006		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			5,294		4,030
		c	4,591	4,679	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			4,583		0,148
			4,864		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	4,215	4,210	0,384
			4,384		Error estándar Relativo [%]
			4,030		2,352

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.11 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para torneado, tecnología FDM.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida					
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	23,3°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	55,50%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
10	10FC-N0900-f0,150-p0,625	a	3,18	3,194	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			3,221		2,806
			3,182		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,652	2,452	3,249
			2,338		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			2,365		2,338
		c	2,677	2,637	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,627		0,116
			2,606		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	2,568	2,940	0,340
			3,249		Error estándar Relativo [%]
			3,002		3,497
11	11FC-N0900-f0,150-p0,750	a	2,484	2,525	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			2,307		2,415
			2,784		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,206	2,294	2,818
			2,393		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			2,284		2,130

		c	2,390	2,323	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,130		0,043
			2,450		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	2,435	2,515	0,208
			2,293		Error estándar Relativo [%]
			2,818		2,484
<b>12</b>	12FC-N0900-f0,150-p0,875	a	2,979	2,860	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			2,774		2,477
			2,828		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,501	2,398	2,979
			2,402		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			2,290		2,164
		c	2,164	2,276	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,441		0,066
			2,223		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	2,345	2,372	0,258
			2,506		Error estándar Relativo [%]
			2,266		3,005
<b>13</b>	13FC-N0900-f0,150-p1,000	a	2,035	2,209	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			2,380		2,599
			2,212		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	2,403	2,592	3,387
			2,711		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			2,663		2,035
		c	2,553	2,615	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			2,630		0,115
			2,662		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	3,387	2,979	0,339
			2,808		Error estándar Relativo [%]
			2,742		3,764

Fuente: Elaboración propia.

❖ **Medición de rugosidad del material base Polytec 1000 – Acetal**

➤ **Medición 0.** Rugosidad inicial.

**Tabla 0.12 Control de medición de rugosidad inicial de la probeta del material base para torneado.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Material base: Polytec 1000 - Acetal					
Fecha:	22-ene-19	Temperatura:	21,2°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	53,00%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
0	OMB	a	0,334	0,333	Media Aritmética Ra [µm]
			0,340		0,444
			0,325		Valor máximo [µm]
		b	0,463	0,435	0,568
			0,421		Valor mínimo [µm]
			0,421		0,325
		c	0,568	0,551	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			0,565		0,007
			0,520		Desviación estándar [µm]
		d	0,410	0,456	0,084
			0,492		Error estándar Relativo [%]
			0,466		5,486

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Medición 1.** Ensayo realizado a las mejores condiciones de corte para la tecnología MJT.

**Tabla 0.13 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología MJT en torneado.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Material base: Polytec 1000 - Acetal					
Fecha:	22-ene-19	Temperatura:	22,4°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	55,00%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
1	1MB-N2500-f0,150-50,500	a	1,215	1,166	Media Aritmética Ra [µm]
			1,314		1,196
			0,968		Valor máximo [µm]
		b	1,338	1,144	1,338
			1,093		Valor mínimo [µm]
			1,001		0,968

	c	1,325	1,297	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
		1,309		0,016
		1,257		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
	d	1,221	1,176	0,126
		1,174		Error estándar Relativo [%]
		1,133		3,030

Fuente: Elaboración propia.

- **Medición 2.** Ensayo realizado a las mejores condiciones de corte para la tecnología FDM.

**Tabla 0.14 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología FDM en torneado.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados
Material base: Polytec 1000 - Acetal					
Fecha:	24-ene-19	Temperatura:	20,8°C		
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	70,30%		
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión
2	1MB-N900-f0,150-p0,500	a	1,513	1,478	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]
			1,477		1,479
			1,445		Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]
		b	1,477	1,525	1,594
			1,503		Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]
			1,594		1,319
		c	1,454	1,498	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,527		0,004
			1,514		Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
		d	1,441	1,416	0,066
			1,487		Error estándar Relativo [%]
			1,319		1,281

Fuente: Elaboración propia.

- Para fresado

- ❖ **Rugosidad inicial**

**Tabla 0.15 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJP para fresado, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Material Jetting - Polyjet							
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	23,3°C				
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	53,40%				
MEDICIÓN LONGITUDINAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
0-1	OMP1	a	0,963	0,975	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			0,986		0,727	0,086	
		b	0,346	0,356	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			0,366		0,986	0,294	
		c	0,882	0,851	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			0,82		0,346	16,482	
0-2	OMP2	a	0,886	0,878	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			0,87		0,867	0,005	
		b	0,918	0,917	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			0,915		0,918	0,069	
		c	0,884	0,808	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			0,731		0,731	3,265	
0-3	OMP3	a	0,360	0,336	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			0,311		0,460	0,010	
		b	0,531	0,500	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			0,468		0,550	0,102	
		c	0,542	0,546	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			0,55		0,311	9,055	

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.16 Control de medición de rugosidad inicial de probetas de tecnología MJF para fresado, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Material Jetting - Polyjet							
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	23,3°C				
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	53,40%				
MEDICIÓN TRANSVERSAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
0-1	OMP1	a	3,779	3,563	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			3,346		4,305	0,392	
		b	4,929	4,905	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			4,88		4,929	0,626	
		c	4,483	4,449	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			4,415		3,346	5,937	
0-2	OMP2	a	1,880	1,883	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,886		1,853	0,008	
		b	1,789	1,769	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,748		2,001	0,090	
		c	2,001	1,909	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,816		1,748	1,975	
0-3	OMP3	a	2,272	2,223	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			2,173		3,818	2,798	
		b	3,288	3,357	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			3,426		5,876	1,673	
		c	5,876	5,875	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			5,873		2,173	17,885	

Fuente: Elaboración propia.

❖ Primera fase de ensayos – Velocidad de avance

**Tabla 0.17 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología MJT, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Material Jetting - Polyjet							
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	23,7°C				
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	52,60%				
MEDICIÓN LONGITUDINAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
1	1MP-N15000-f500-p0,075	a	1,125	1,096	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,067		1,141	0,002	
		b	1,181	1,189	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,197		1,197	0,047	
		c	1,116	1,118	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,12		1,067	1,699	
2	2MP-N15000-f1000-p0,075	a	1,449	1,431	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,412		1,500	0,004	
		b	1,579	1,517	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,455		1,579	0,060	
		c	1,471	1,497	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,522		1,412	1,626	
3	3MP-N15000-f1500-p0,075	a	1,384	1,349	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,313		1,378	0,002	
		b	1,414	1,393	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,371		1,414	0,041	
		c	1,337	1,375	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,413		1,313	1,206	
4	4MP-N15000-f2000-p0,075	a	1,477	1,546	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,615		1,486	0,015	
		b	1,374	1,367	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	

			1,359		1,628	0,124
		c	1,606	1,617	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,628		1,359	3,400
5	5MP-N15000-f2500-p0,075	a	1,801	1,816	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,831		1,748	0,005
		b	1,723	1,796	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,869		1,899	0,074
		c	1,721	1,810	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,899		1,721	1,728

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0.18 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología MJP, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	23,7°C			
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	52,60%			
MEDICIÓN TRANSVERSAL						
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
1	1MP-N15000-f500-p0,075	a	0,982	0,962	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			0,941		0,973	0,001
		b	0,939	0,925	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			0,911		0,997	0,033
		c	0,997	0,962	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			0,926		0,911	1,396
2	2MP-N15000-f1000-	a	1,165	1,186	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,207		1,150	0,003
		b	1,113	1,080	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,047		1,207	0,056
		c	1,171	1,165	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,159		1,047	1,992
3	3MP-	a	1,439	1,431	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,422		1,391	0,004
		b		1,412	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,348			

			1,475		1,475	0,064
		c	1,356	1,332	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,308		1,308	1,869
4	4MP-N15000-f2000-	a	1,640	1,580	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			1,52		1,576	0,005
		b	1,546	1,537	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			1,527		1,695	0,072
		c	1,541	1,618	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,695		1,520	1,864
5	5MP-N15000-f2500-	a	1,586	1,564	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			1,542		1,590	0,003
		b	1,633	1,590	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			1,547		1,684	0,057
		c	1,552	1,618	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,684		1,542	1,465

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 0.19 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD				Resultados		
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida						
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	22°C			
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	61,80%			
MEDICIÓN LONGITUDINAL						
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
1	1FP-N15000-f500-p0,075	a	2,064	2,119	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			2,173		1,744	0,159
		b	1,932	1,873	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			1,813		2,173	0,399
		c	1,236	1,261	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,286		1,236	9,329
2	2FP-N15000-	a	1,302	1,299	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			1,296		1,381	0,008

		b	1,481	1,396	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			1,311		1,481	0,092
		c	1,361	1,282	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,203		1,203	2,711
3	3FP-N15000-f1500-p0,075	a	1,361	1,359	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,357		1,553	0,286
		b	2,211	2,233	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			2,255		2,255	0,535
		c	1,087	1,091	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,094		1,087	14,051
4	4FP-N15000-f2000-p0,075	a	1,417	1,326	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,234		1,584	0,036
		b	1,748	1,669	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			1,59		1,748	0,191
		c	1,587	1,643	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,698		1,234	4,911
5	5FP-N15000-f2500-p0,075	a	1,828	1,780	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,731		2,202	0,158
		b	2,067	2,156	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			2,244		2,711	0,398
		c	2,711	2,650	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			2,589		1,731	7,371

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.20 Control de medición de rugosidad de las probetas de la primera fase de ensayos (velocidad de avance) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD				Resultados
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida				
Fecha:	11-ene-19	Temperatura:	22°C	
Hora:	14H30-16H30	Humedad:	61,80%	
MEDICIÓN TRANSVERSAL				

N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
					Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
1	1FP-N15000-f500-p0,075	a	1,898	1,890	2,105	0,027
			1,881		2,313	0,163
		b	2,105	2,043	2,313	0,163
			1,981		1,881	3,161
		c	2,313	2,135	1,881	3,161
			1,956			
2	2FP-N15000-f1000-p0,075	a	2,212	2,020	2,315	0,045
			1,828		2,448	0,212
		b	2,448	2,351	2,448	0,212
			2,254		1,828	3,742
		c	2,285	2,313	1,828	3,742
			2,34			
3	3FP-N15000-f1500-p0,075	a	2,200	2,111	2,230	0,017
			2,021		2,421	0,130
		b	2,278	2,237	2,421	0,130
			2,196		2,021	2,378
		c	2,212	2,317	2,021	2,378
			2,421			
4	4FP-N15000-f2000-p0,075	a	2,644	2,745	2,390	0,080
			2,846		2,846	0,283
		b	2,127	2,254	2,846	0,283
			2,381		2,127	4,832
		c	2,399	2,268	2,127	4,832
			2,136			
5	5FP-N15000-f2500-p0,075	a	3,006	2,928	2,791	0,046
			2,849		3,006	0,214
		b	2,803	2,743	3,006	0,214
			2,682		2,405	3,137
		c	2,565	2,485	2,405	3,137
			2,405			

Fuente: Elaboración propia.

❖ Segunda fase de ensayos – Velocidad rotacional

**Tabla 0.21 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología MJP, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Material Jetting - Polyjet							
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	22,4°C				
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	63,00%				
MEDICIÓN LONGITUDINAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [µm]	Promedio parcial Ra [µm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
6	6MP-N5000-f500-p0,075	a	1,849	1,864	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,879		1,806	0,002	
		b	1,773	1,769	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,765		1,879	0,047	
		c	1,795	1,785	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,774		1,765	1,065	
7	7MP-N7500-f500-p0,075	a	1,240	1,273	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,305		1,261	0,001	
		b	1,26	1,241	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,221		1,305	0,032	
		c	1,283	1,258	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,232		1,221	1,044	
8	8MP-N10000-f500-p0,075	a	1,035	1,049	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,062		1,078	0,053	
		b	0,891	0,851	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			0,81		1,399	0,230	
		c	1,307	1,353	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,399		0,810	8,707	
9	9MP-N15000-f500-p0,075	a	1,171	1,183	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]	
			1,195		1,051	0,022	
		b	1,098	1,056	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]	
			1,014		1,195	0,149	

		c	0,884	0,860	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			0,836		0,836	5,785

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.22 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología MJ, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	22,4°C			
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	63,00%			
MEDICIÓN TRANSVERSAL						
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
6	6MP-N5000-f500-p0,075	a	1,379	1,336	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,293		1,365	0,004
		b	1,401	1,363	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,325		1,451	0,060
		c	1,316	1,384	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,451		1,293	1,793
7	7MP-N7500-f500-p0,075	a	1,269	1,259	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,249		1,257	0,004
		b	1,183	1,169	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,154		1,320	0,061
		c	1,32	1,291	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,262		1,154	1,972
8	8MP-N10000-f500-p0,075	a	1,124	1,123	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,121		1,203	0,005
		b	1,281	1,274	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,267		1,281	0,068
		c	1,203	1,205	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,207		1,121	2,308
9	9MP-N15000-f500-p0,075	a	1,116	1,088	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,06		1,149	0,002
		b	1,183	1,156	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,129		1,183	0,047

		c	1,148	1,110	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,071		1,060	1,653

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.23 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida						
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	27,2°C			
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	67,00%			
MEDICIÓN LONGITUDINAL						
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
6	6FP-N5000-f500-p0,075	a	1,725	1,777	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,828		1,896	0,078
		b	2,233	2,218	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			2,202		2,233	0,280
		c	1,731	1,637	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,543		1,543	6,018
7	7FP-N7500-f500-p0,075	a	1,476	1,458	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,44		1,369	0,143
		b	1,704	1,715	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,725		1,725	0,378
		c	0,927	0,891	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			0,854		0,854	11,275
8	8FP-N10000-f500-p0,075	a	0,854	0,846	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			0,837		1,381	0,561
		b	0,963	0,907	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			0,851		2,327	0,749
		c	2,327	2,324	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			2,321		0,837	22,136
9	9FP-	a	2,648	2,652	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			2,656		3,004	0,111

	b	3,036	2,865	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
		2,694		3,352	0,333
	c	3,329	3,341	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
		3,352		2,648	4,530

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.24 Control de medición de rugosidad de las probetas de la segunda fase de ensayos (velocidad rotacional) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD				Resultados		
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida						
Fecha:	15-ene-19	Temperatura:	27,2°C			
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	67,00%			
MEDICIÓN TRANSVERSAL						
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
6	6FP-N5000-f500-p0,075	a	1,781	1,760	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,739		1,826	0,020
		b	1,675	1,666	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,657		2,023	0,142
		c	2,023	1,965	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,906		1,657	3,178
7	7FP-N7500-f500-p0,075	a	2,446	2,437	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			2,427		2,258	0,018
		b	2,242	2,247	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			2,252		2,446	0,133
		c	2,087	2,180	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			2,272		2,087	2,403
8	8FP-N10000-f500-p0,075	a	1,927	1,966	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			2,004		2,020	0,006
		b	1,98	1,999	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			2,017		2,154	0,076
		c	2,154	2,100	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			2,046		1,927	1,543
9	9FP-	a	2,982	2,883	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			2,784		2,781	0,151

		b	3,089	3,075	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			3,061		3,089	0,389
		c	2,273	2,255	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			2,236		2,236	5,713

Fuente: Elaboración propia.

### ❖ Tercera fase de ensayos – Profundidad de corte

**Tabla 0.25 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología MJ, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD				Resultados		
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	21,0°C			
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	68,00%			
MEDICIÓN LONGITUDINAL						
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
10	10MP-N15000-f500-p0,05	a	1,138	1,122	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,105		1,150	0,001
		b	1,192	1,146	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,1		1,192	0,038
		c	1,119	1,102	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,084		1,084	1,364
11	11MP-N15000-f500-p0,01	a	1,172	1,179	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,185		1,229	0,054
		b	1,509	1,521	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,533		1,533	0,233
		c	1,005	1,011	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,016		1,005	7,738
12	12MP-N15000-f500-p0,125	a	1,083	1,052	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]
			1,021		1,078	0,001
		b	1,072	1,058	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
			1,043		1,083	0,028
		c	1,08	1,052	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			1,023		1,021	1,072
13	13M P-	a	0,957	1,001	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]

			1,045		1,103	0,011
		b	1,108	1,081	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			1,053		1,245	0,106
		c	1,245	1,222	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,198		0,957	3,929

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.26 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología MJT, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados	
Tecnología: Material Jetting - Polyjet						
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	21,0°C			
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	68,00%			
MEDICIÓN TRANSVERSAL						
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Promedio parcial Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Media Aritmética y Medidas de dispersión	
10	10MP-N15000-f500-p0,05	a	1,012	1,016	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,02		1,122	0,026
		b	1,002	0,995	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			0,987		1,351	0,163
		c	1,351	1,317	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,282		0,987	5,917
11	11MP-N15000-f500-p0,01	a	1,218	1,196	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,173		1,025	0,022
		b	0,965	0,978	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			0,99		1,218	0,148
		c	0,893	0,875	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			0,857		0,857	5,883
12	12MP-N15000-f500-p0,125	a	1,087	1,062	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,037		1,092	0,012
		b	0,971	0,989	Valor máximo [ $\mu\text{m}$ ]	Desviación estándar [ $\mu\text{m}$ ]
			1,006		1,233	0,110
		c	1,218	1,226	Valor mínimo [ $\mu\text{m}$ ]	Error estándar Relativo [%]
			1,233		0,971	4,124
13	13MP-N15000	a	1,234	1,240	Media Aritmética Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Varianza [ $\mu\text{m}^2$ ]
			1,245		1,220	0,000

	b	1,194	1,205	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]
		1,216		1,245	0,019
	c	1,231	1,236	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
		1,241		1,194	0,634

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.27 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología FDM, medición longitudinal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida							
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	23,3°C				
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	55,50%				
MEDICIÓN LONGITUDINAL							
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
10	10FP-N5000-f500-p0,05	a	0,986	0,898	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			0,81		1,137	0,032	
		b	1,151	1,125	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,098		1,276	0,179	
		c	1,273	1,275	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,276		0,810	6,437	
11	11FP-N5000-f500-p0,01	a	1,838	1,810	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,782		1,581	0,039	
		b	1,457	1,447	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,436		1,838	0,198	
		c	1,447	1,415	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,383		1,383	5,121	
12	12FP-N5000-f500-p0,125	a	1,631	1,621	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,611		1,539	0,033	
		b	1,303	1,277	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,25		1,684	0,183	
		c	1,684	1,616	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,548		1,250	4,844	
13	13FP-N5000-f500-p0,15	a	1,671	1,714	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,756		1,910	0,119	
		b	1,656	1,724	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	

		1,792		2,403	0,346
	c	2,403	2,380	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
		2,357		1,656	7,386

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 0.28 Control de medición de rugosidad de las probetas de la tercera fase de ensayos (profundidad de corte) para fresado, tecnología FDM, medición transversal.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Tecnología: Modelado por Deposición Fundida							
Fecha:	16-ene-19	Temperatura:	23,3°C				
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	55,50%				
MEDICIÓN TRANSVERSAL							
N,º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
10	10FP-N5000-f500-p0,05	a	1,283	1,292	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,3		1,442	0,018	
		b	1,443	1,415	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,387		1,601	0,135	
		c	1,601	1,589	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,576		1,283	3,820	
11	11FP-N5000-f500-p0,01	a	1,793	1,732	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,671		1,847	0,007	
		b	1,905	1,888	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,87		1,905	0,082	
		c	1,843	1,844	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,845		1,671	1,817	
12	12FP-N5000-f500-p0,125	a	1,468	1,414	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,36		1,650	0,033	
		b	1,843	1,806	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,769		1,843	0,181	
		c	1,639	1,612	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,585		1,360	4,477	
13	13FP-N5000-f500-p0,15	a	1,993	1,916	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,838		2,306	0,106	
		b	2,695	2,613	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			2,531		2,695	0,326	

		c	2,23	2,169	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]
			2,107		1,838	5,773

Fuente: Elaboración propia.

## ❖ Medición de rugosidad del material base Polytec 1000 – Acetal

### ➤ Medición 0. Rugosidad inicial.

**Tabla 0.29 Control de medición de rugosidad inicial de la probeta del material base para fresado.**

CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD					Resultados		
Material base: Polytec 1000 - Acetal							
Fecha:	22-ene-19	Temperatura:	21,2°C				
Hora:	9H30-11H30	Humedad:	53,00%				
MEDICIÓN LONGITUDINAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
0	OMB	a	1,500	1,464	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			1,427		1,273	0,161	
		b	0,749	0,761	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			0,772		1,598	0,402	
		c	1,589	1,594	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,598		0,749	12,883	
MEDICIÓN TRANSVERSAL							
N.º	CI	Punto referencial	Rugosidad Ra [μm]	Promedio parcial Ra [μm]	Media Aritmética y Medidas de dispersión		
0	OMB	a	1,956	2,054	Media Aritmética Ra [μm]	Varianza [μm <sup>2</sup> ]	
			2,152		1,524	0,180	
		b	1,143	1,161	Valor máximo [μm]	Desviación estándar [μm]	
			1,179		2,152	0,424	
		c	1,373	1,358	Valor mínimo [μm]	Error estándar Relativo [%]	
			1,343		1,143	11,367	

Fuente: Elaboración propia.

- **Medición 1.** Ensayo realizado a las mejores condiciones de corte para la tecnología MJP.

**Tabla 0.30 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología MJP en fresado.**

<b>CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD</b>				<b>Resultados</b>		
<b>Material base: Polytec 1000 - Acetal</b>						
<b>Fecha:</b>	22-ene-19	<b>Temperatura:</b>	21,2°C			
<b>Hora:</b>	14H30-16H30	<b>Humedad:</b>	53,00%			
<b>MEDICIÓN LONGITUDINAL</b>						
<b>N.º</b>	<b>CI</b>	<b>Punto referencial</b>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b>	<b>Promedio parcial Ra [µm]</b>	<b>Media Aritmética y Medidas de dispersión</b>	
<b>1</b>	<b>1MB</b>	<b>a</b>	0,485	0,479	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			0,473		0,565	0,010
		<b>b</b>	0,521	0,526	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			0,531		0,692	0,099
		<b>c</b>	0,687	0,690	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			0,692		0,473	7,153
<b>MEDICIÓN TRANSVERSAL</b>						
<b>N.º</b>	<b>CI</b>	<b>Punto referencial</b>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b>	<b>Promedio parcial Ra [µm]</b>	<b>Media Aritmética y Medidas de dispersión</b>	
<b>1</b>	<b>1MB</b>	<b>a</b>	0,754	0,738	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			0,722		0,831	0,010
		<b>b</b>	0,802	0,809	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			0,815		0,986	0,098
		<b>c</b>	0,905	0,946	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			0,986		0,722	4,836

Fuente: Elaboración propia.

- **Medición 2.** Ensayo realizado a las mejores condiciones de corte para la tecnología FDM.

**Tabla 0.31 Control de medición de rugosidad de la probeta del material base ensayada bajo las mejores condiciones de corte obtenidas para la tecnología FDM en fresado.**

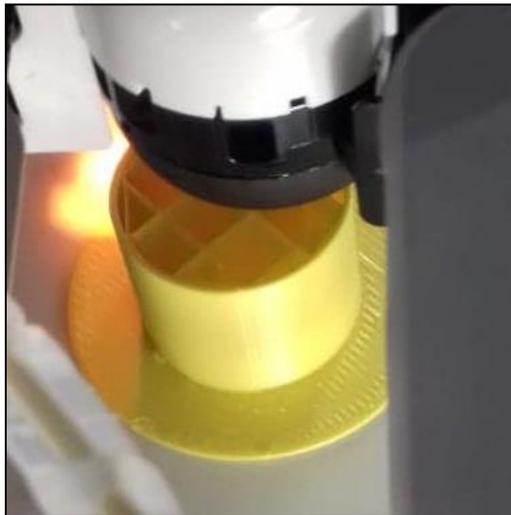
<b>CONTROL DE MEDICIÓN DE RUGOSIDAD</b>					<b>Resultados</b>	
<b>Material base: Polytec 1000 - Acetal</b>						
<b>Fecha:</b>	22-ene-19	<b>Temperatura:</b>	21,2°C			
<b>Hora:</b>	9H30-11H30	<b>Humedad:</b>	53,00%			
<b>MEDICIÓN LONGITUDINAL</b>						
<b>N.º</b>	<b>CI</b>	<b>Punto referencial</b>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b>	<b>Promedio parcial Ra [µm]</b>	<b>Media Aritmética y Medidas de dispersión</b>	
<b>2</b>	<b>2MB</b>	<b>a</b>	2,933	2,973	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			3,013		1,792	0,837
		<b>b</b>	1,183	1,188	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			1,192		3,013	0,915
		<b>c</b>	1,214	1,217	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,219		1,183	20,841
<b>MEDICIÓN TRANSVERSAL</b>						
<b>N.º</b>	<b>CI</b>	<b>Punto referencial</b>	<b>Rugosidad Ra [µm]</b>	<b>Promedio parcial Ra [µm]</b>	<b>Media Aritmética y Medidas de dispersión</b>	
<b>2</b>	<b>2MB</b>	<b>a</b>	1,644	1,614	Media Aritmética Ra [µm]	Varianza [µm <sup>2</sup> ]
			1,583		1,416	0,038
		<b>b</b>	1,483	1,447	Valor máximo [µm]	Desviación estándar [µm]
			1,41		1,644	0,195
		<b>c</b>	1,171	1,187	Valor mínimo [µm]	Error estándar Relativo [%]
			1,202		1,171	5,625

Fuente: Elaboración propia.

## APÉNDICE C

### Fotos

- Para torneado



**Figura 0.1 Estructura o forma de Infill de pieza fabricada por tecnología FDM.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.2 Ilustración de una medición “Fuera de Rango” (F.R.) en una pieza fabricada por tecnología FDM.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.3 Piezas de trabajo de la primera fase de ensayo de la tecnología MJP para torneado.**

Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

**Figura 0.4 Piezas de trabajo de la tecnología MJP N. °3; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).**

Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

**Figura 0.5 Piezas de trabajo de la tecnología MJN N. 04; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).**

Fuente: Elaboración propia.



a)

b)

**Figura 0.6 Piezas de trabajo de la tecnología MJN N. 05; a) primer ensayo, b) segundo ensayo (repetición).**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.7 Piezas de trabajo de la primera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.8 Pieza de trabajo N.º 3 de la primera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.9** Piezas de trabajo de la segunda fase de ensayo de la tecnología MJP para torneado y, la mejor probeta de la primera fase (N.º1).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.10** Piezas de trabajo de la segunda fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado y, la mejor probeta de la primera fase (N.º1).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.11** Pieza de trabajo N.º 8 de la segunda fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.12** Piezas de trabajo de la tercera fase de ensayo de la tecnología MJF para torneado y, la mejor probeta de la segunda fase (N.º1).

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.13 Piezas de trabajo de la tercera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado y, la mejor probeta de la segunda fase (N.º9).**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.14 Pieza de trabajo N.º 13 de la tercera fase de ensayo de la tecnología FDM para torneado, presenta fallas en la superficie.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.15** Pieza de trabajo N.º 1 de la tecnología MJP para torneado, presenta el mejor acabado superficial.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.16** Pieza de trabajo N.º 9 de la tecnología FDM para torneado, presenta el mejor acabado superficial.

Fuente: Elaboración propia.

- Para fresado



**Figura 0.17** Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado.  
Fuente: Elaboración propia.



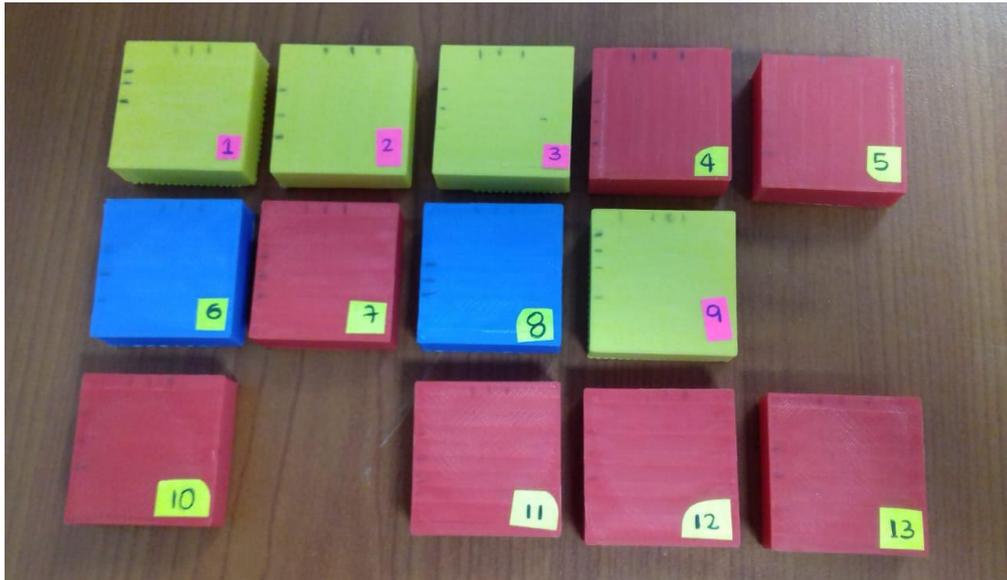
**Figura 0.18** Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.19** Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, rotuladas  
 Fuente: Elaboración propia.

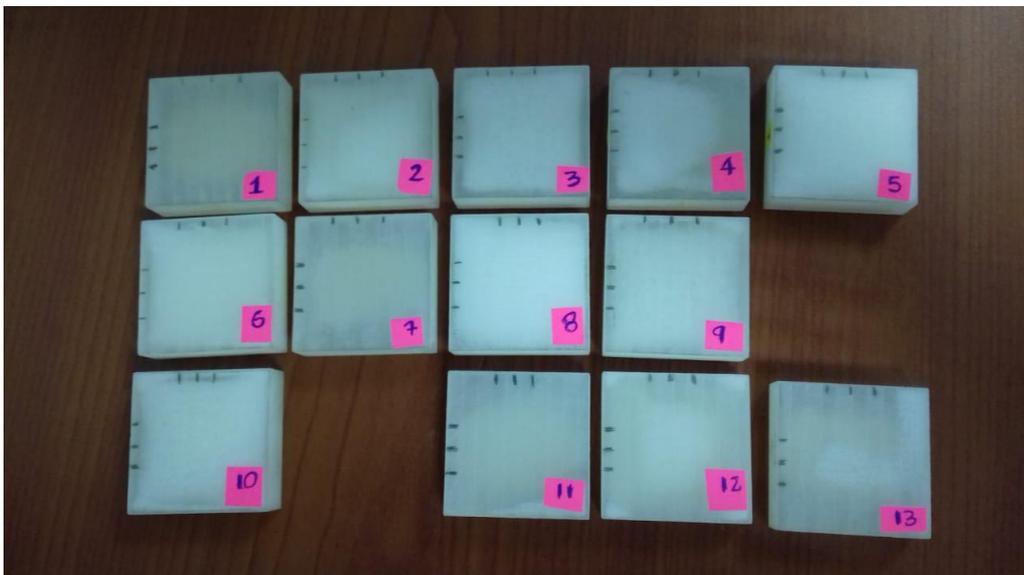


**Figura 0.20** Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado, rotuladas.  
 Fuente: Elaboración propia.



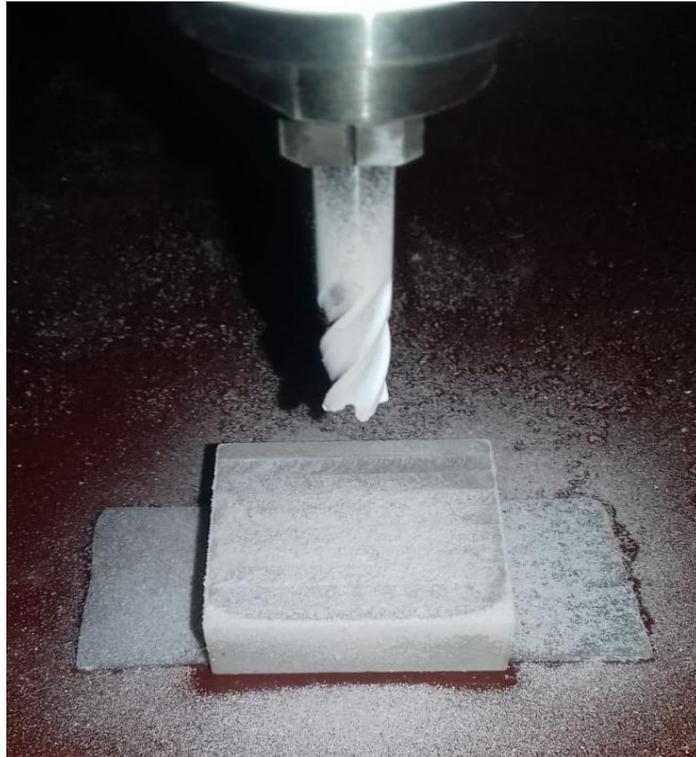
**Figura 0.21** Piezas de trabajo de la tecnología FDM para fresado, después del mecanizado.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.22** Piezas de trabajo de la tecnología MJF para fresado, después del mecanizado.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.23 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, durante el mecanizado.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 0.24 Piezas de trabajo de la tecnología MJP para fresado, durante la medición de rugosidad superficial.**  
Fuente: Elaboración propia

# APÉNDICE D

## Planos

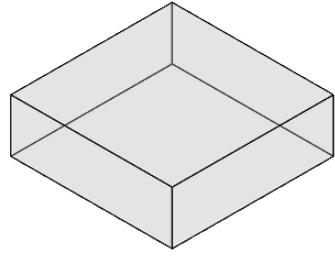
A continuación, se muestran los planos de los dos tipos de piezas a ensayar, estos son:

- Plano 1. Placa
- Plano 2. Eje

4 3 2 1

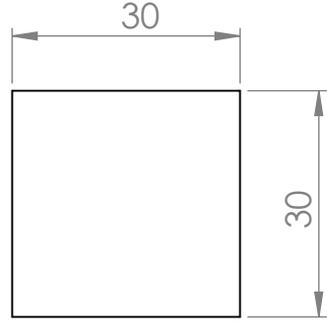
F

F



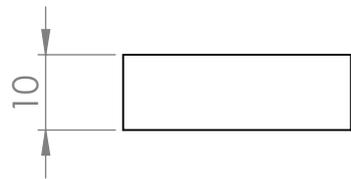
E

E



D

D



C

C

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.	Jessica Bayas S.		13/11/2018	
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:	<b>Placa</b>	
N.º DE DIBUJO	<b>Pieza 1</b>	A4
PESO: 9.63gr	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

A

A

4 3 2 1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

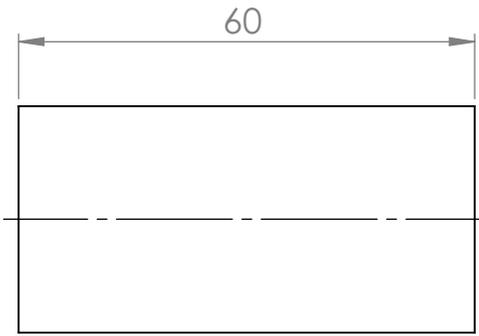
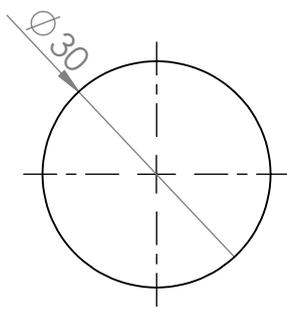
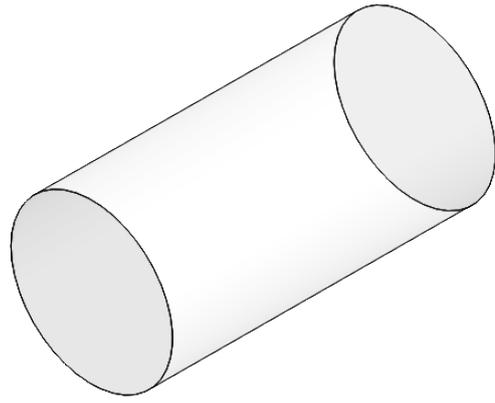
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ. Jessica Bayas s.			FIRMA	FECHA 14/11/2018	TÍTULO: <h1>Eje</h1>	
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.						
			MATERIAL: ABS PC	N.º DE DIBUJO	PIEZA 2	A4
			PESO: 45.38gr	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1	

4

3

2

1

A

A