



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Micro-maquinado Multi-ejes CNC aplicado a implantes dentales en aleación de Titanio Ti-6Al-4V

Mario José Remolina León

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2021

Micro-maquinado Multi-ejes CNC aplicado a implantes dentales en aleación de Titanio Ti-6Al-4V

Mario José Remolina León

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magíster en Ingeniería - Materiales y Procesos

Director (a):

Profesor Ernesto Córdoba Nieto

Línea de Investigación:

Meso/micro-maquinado multi-ejes CNC

Grupo de Investigación:

Grupo de Trabajo en Nuevas Tecnologías de Diseño y Manufactura-Automatización

DIMA UN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá, Colombia

2021

Dedicado a mis padres y a mis hermanas quienes siempre me alentaron en la generación de conocimiento a pesar del “ruido” que conllevan situaciones en la vida.

A mis familiares, allegados y amigos que fallecieron en la pandemia iniciada en Colombia en marzo del 2020.

“Se debe tener confianza en uno mismo y esa confianza debe estar basada en la realidad”

Robert James “Bobby” Fischer

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Mario José Remolina León

13/09/2021

Agradecimientos

Agradecimiento a la Profesora PhD Elisa Virginia Vázquez Lepe, quien brindo la posibilidad de trabajar en colaboración con el TEC de Monterrey (México) y quien coordinó la generación de trabajo directo en el Parque de Investigación e Innovación Tecnológica de Monterrey (PIIT).

Agradecimiento especial a los PhD Heiddy Paola Quiroz y Jorge Arturo Calderón pertenecientes a la Facultad de Ciencias – Departamento de Física, quienes dieron la orientación precisa para la evaluación pertinente del estado de micro-deformación y alentaron en el proceso.

Agradecimiento al Centro Metalmecánico - SENA en cabeza del Ing. Jairo Iván Marín, quienes apoyaron con su gestión el proceso de desarrollo de la investigación.

Resumen

El micro-maquinado mecánico es una operación de micro-fabricación destacada en el área del corte de metales, especialmente cuando se aplica a materiales de ingeniería como las aleaciones de titanio. En la actualidad, el micro-mecanizado de aleaciones de titanio sigue siendo un gran desafío debido a las propiedades metalúrgicas del material. Esto se ve reflejado en los altos costos de producción en aplicaciones mecánicas, biomédicas, nucleares, químicas y navales. Se propone una metodología estadística basada en el método de superficies de respuesta (RSM) para obtener información sobre el comportamiento de los parámetros de corte en la generación de rugosidad superficial, altura de rebaba y variación de rasgos geométricos de micro-herramienta de corte en operaciones tales como el micro-taladrado convencional, micro-fresado plano y esférico. Lo anterior aplicado sobre aleación de titanio Ti-6Al-4V, adicionando una aproximación a la parte térmica y de micro-deformación en el proceso de corte, complementando finalmente, con un estudio de uso de la mecánica de materiales tradicional al proceso de micro-fabricación de pines por micro-torneado en aleación AISI 12L14.

La aplicación de la metodología estadística presentó detalles sobre los parámetros de corte e interacciones entre estos, los cuales tienen marcada influencia en la rugosidad superficial, la altura de rebaba y en los rasgos geométricos de micro-herramienta, tales como: cutting edge radius (r), major cutting edge (S), distance apex to end of clearance roundness (S_α), minimum distance of edge to apex (Δr), minor cutting edge (S'), face (A_γ), major first flank ($A_{\alpha 1}$) respectivamente. Las superficies generadas muestran las tendencias de los parámetros de corte para cada atributo evaluado. Se lograron valores preliminares de micro-deformación y tamaño de cristalito por medio del método Williamson-Hall, agregando termografías del proceso de micro-fresado plano. Se obtuvo, con la aplicación del modelo de la mecánica de materiales, para el esfuerzo a flexión de una viga en cantiléver, estimaciones precisas de la ecuación de la curva de la viga elástica en un 60% sobre la longitud en la fabricación de un micro-pin generado por micro-torneado.

Palabras clave: Micro-maquinado, Titanio Ti-6Al-4V, AISI 12L14, Método de Superficie de Respuesta, Mecánica de materiales.

Abstract

Multi-axis CNC micro-machining applied to dental implants in Titanium alloy Ti-6Al-4V

Mechanical micro-machining is a prominent micro-fabrication operation in the area of metal cutting, especially when is applied to engineering materials such as titanium alloys. At present, the micro-machining of titanium alloys remains a great challenge due to the metallurgical properties of this type of alloys. This is reflected in the high production costs in mechanical, biomedical, nuclear, chemical and naval applications. A statistical methodology based on the response surfaces method (RSM) is proposed to obtain information on the behavior of the cutting parameters in the generation of surface roughness, burr height and variation of geometrics features of micro-cutting tool in operations such as conventional micro-drilling, flat end-micro-milling and ball end-micro-milling, all above on titanium alloy Ti-6Al-4V, adding an approach to the thermal and micro-deformation part in the cutting process, finally complementing, with the application of traditional materials mechanics to the micro-manufacturing process of pins by micro-turning in AISI 12L14 alloy.

The statistical methodology application revealed which cutting parameters and interactions between them significantly affect surface roughness, burr height and geometric features of the cutting micro-tool, such as: cutting edge radius (r), major cutting edge (S), distance apex to end of clearance roundness (S_α), minimum distance of edge to apex (Δr), minor cutting edge (S'), face (A_γ), major first flank ($A_{\alpha 1}$) respectively. The generated surfaces show the trends of the cutting parameters for each attribute evaluated. Preliminary values of micro-strain and crystallite size were achieved by the Williamson-Hall method, adding micro-milling process thermographs. With the material mechanics model application for the cantilever beam bending, precise estimates of the elastic beam curve equation were obtained in 60% on the length in the manufacture of a micro-pin generated by micro-turning.

Keywords: Micro-machining, Ti-6Al-4V titanium, 12L14 Steel, Surface Response Method, Materials mechanics.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Abstract	XI
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	1
Introducción	3
1. Estado del Arte.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Contexto parámetros de corte en el μ -maquinado.....	12
1.3 Conclusiones.....	13
2. Materiales y Métodos.....	15
2.1 Procedimiento Experimental Micro-Fresado (Plano y Esférico) / Micro - Taladrado	17
2.1.1 Materiales	17
2.1.2 Caracterización de μ -Herramientas	18
2.1.3 Diseños de Experimentos	22
2.1.4 Diseño básico de Probetas	25
2.1.5 Montaje y Alistamiento.....	26
2.1.6 Caracterización de probetas realizadas y μ -herramientas utilizadas ...	29
2.1.7 Método Estadístico de Evaluación	31
2.1.8 Aproximación a Esfuerzos Residuales y Análisis Térmico	33
2.2 Micro-Torneado	34
2.2.1 Materiales	34
2.2.2 Herramienta y Porta-inserto	34
2.2.3 Procedimiento de Micro-Corte	35
2.2.4 Modelo Propuesto – Mecánica de Materiales	36
3. Resultados y Discusión.....	38
3.1 Resultados Micro-Fresado (Plano y Esférico) / Micro-Taladrado	38

3.1.1	Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-taladrado	44
3.1.2	Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-fresado plano	51
3.1.3	Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-fresado esférico.....	62
3.1.4	Análisis de Radios de curvatura de filo de micro-herramientas	65
3.1.5	Análisis de Esfuerzos Residuales y Térmicos	66
3.2	Resultados Micro-Torneado.....	68
3.2.1	Fabricación del micro-pin	68
3.2.2	Discusión de resultados	71
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	72
4.1	Conclusiones	72
4.2	Recomendaciones	78
A.	Anexo: Prueba de datos	79
B.	Anexo: Fundamentación teórica de conceptos estadísticos.....	81
	Bibliografía	83

Lista de figuras

	Pág.
Figura 0-1:	Mapa/Síntesis trabajo realizado 5
Figura 1-1:	Clasificación de técnicas de micro-fabricación (adaptado de [3])..... 8
Figura 1-2:	Parámetros experimentales..... 12
Figura 2-1:	Rasgos básicos del Raw Material – Metalografía/granulometría/micro- dureza..... 17
Figura 2-2:	Características geométricas promedio. Micro-broca..... 18
Figura 2-3:	Características geométricas promedio. Micro-fresa esférica. 19
Figura 2-4:	Características geométricas promedio. Micro-fresa plana. 20
Figura 2-5:	Ejemplo de corte transversal. Micro-broca 21
Figura 2-6:	Ejemplo toma de rugosidad Mayor First Flank $A\alpha_1$. Micro-broca..... 22
Figura 2-7:	Esquema diseño de experimentos factorial 2^4 sin réplica. Ejemplo con valores de rugosidad superficial (micro-fresado plano). 23
Figura 2-8:	Estrategia de micro-corte. Micro-fresado esférico..... 24
Figura 2-9:	Esquema del Central Composite Design realizado experimentalmente.. 25
Figura 2-10:	Esquemas de probetas. A) Micro-fresado plano. B) Micro-fresado esférico. C) Micro-taladrado. Medidas en milímetros..... 26
Figura 2-11:	Montaje micro-herramienta..... 27
Figura 2-12:	Verificación de runout. Equipo Zoller Smile 400. 27
Figura 2-13:	Alistamiento/Montaje. A) Esquema prensa HERBERT (medidas en mm). B) Montaje probeta micro-fresado esférico..... 28
Figura 2-14:	Problemas en micro-perforación experimentación previa. De izquierda a derecha: 6mm/min – 6000RPM, 4mm/min – 6000RPM, 5mm/min – 3500RPM, 4mm/min – 3500RPM..... 29
Figura 2-15:	Probetas obtenidas. A) Micro-fresado esférico. B) Micro-fresado plano. C) Micro-taladrado. D) Cortes transversales micro-taladrado..... 29
Figura 2-16:	Ejemplo toma de medidas de A) Altura de rebaba y B) Rugosidad para probeta de micro-taladrado. 30
Figura 2-17:	Evaluación de micro-fresa plana / Parte y nomenclatura Standard ISO 3001-2 [59]..... 30
Figura 2-18:	Evaluación del Cutting edge radius para μ -brocas. 31
Figura 2-19:	Diagrama de flujo. Manejo de datos. 32
Figura 2-20:	Superficie micro-maquinada para ensayo DRX 33
Figura 2-21:	Termograma del proceso de micro-fresado plano – probeta DRX 34
Figura 2-22:	Característica de inserto utilizado [72]..... 35
Figura 2-23:	Esquema Pull-Type Collet 35

Figura 2-24:	Esquema comparativo montaje/viga en cantilever [74]	36
Figura 3-1:	Surface Response – Cutting edge radius $r = 5\mu m$	43
Figura 3-2:	Surface Response – Cutting edge radius $r = 5\mu m$ (top view)	44
Figura 3-3:	RSM - Cutting edge radius (r) Major cutting edge S	45
Figura 3-4:	RSM - Distance apex to end of clearance roundness ($S\alpha$)	47
Figura 3-5:	RSM - Distance apex to end of rake roundness ($S\gamma$)	47
Figura 3-6:	Comparación de magnitudes entre los rasgos $S\alpha$ y $S\gamma$	48
Figura 3-7:	Minimum distance of edge to apex (Δr)	49
Figura 3-8:	RSM - Surface roughness	50
Figura 3-9:	RSM - Burr height	51
Figura 3-10:	Geometría Minor cutting edge S'	52
Figura 3-11:	RSM - Cutting edge radius (r) Minor cutting edge S' Deviation	53
Figura 3-12:	Característica Major cutting edge S	53
Figura 3-13:	RSM - Cutting edge radius (r) Major cutting edge S Deviation	54
Figura 3-14:	Esquema de operación de entrada al material (ramping)	55
Figura 3-15:	Localización rasgo Face $A\gamma$	55
Figura 3-16:	RSM - Face $A\gamma$ Deviation	56
Figura 3-17:	Rasgo geométrico Major first flank $A\alpha 1$	57
Figura 3-18:	RSM - Major first flank $A\alpha 1$ Deviation	58
Figura 3-19:	Variación de rasgos evaluados en micro-fresado plano.	59
Figura 3-20:	RSM - Roughness	60
Figura 3-21:	Visualización rasgo Burr height micro-fresado plano.	61
Figura 3-22:	RSM - Burr height	61
Figura 3-23:	RSM - Surface roughness	63
Figura 3-24:	RSM - Burr height	64
Figura 3-25:	Variación radio de curvatura de filo en micro-herramientas	65
Figura 3-26:	Difractograma	67
Figura 3-27:	Gráfico Williamson-Hall	68
Figura 3-28:	Micro-pin (medidas en mm).	69
Figura 3-29:	Gráfica comparativa teórico-práctica de la experimentación.	70
Figura 4-1:	Filo recreado (BUE) Micro-taladrado $n = 3750RPM, vf = 6mm/min, ap = 2mm$	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Definición propuesta para micro-maquinado	8
Tabla 2-1: Recursos requeridos para la investigación.....	15
Tabla 2-2: Tamaño de grano promedio – Aleación de titanio Ti-6Al-4V	18
Tabla 2-3: Parámetros de corte utilizados en el proceso de micro-fresado plano.	23
Tabla 2-4: Parámetros de corte utilizados en el proceso de micro-fresado esférico....	24
Tabla 2-5: Parámetros de corte. Micro-taladrado.....	25
Tabla 2-6: Runout promedio.	28
Tabla 2-7: Parámetros de corte – Ensayo DRX	33
Tabla 2-8: Composición Acero 12L14 [70][71].	34
Tabla 2-9: Parámetros de Corte Teóricos [73]	35
Tabla 2-10: Parámetros de corte experimentales	36
Tabla 3-1: Rasgos de investigación evaluados	38
Tabla 3-2: Tabla inicial de tratamiento de datos.....	39
Tabla 3-3: Valores con aplicación del Método MAD.....	40
Tabla 3-4: Contribuciones porcentuales por factor.....	41
Tabla 3-5: Medidas diámetros.....	69
Tabla 3-6: Cálculo del error absoluto	70

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
n	Revoluciones por minuto	RPM	
v_f	Velocidad de avance	mm/min	
S_a	Surface roughness parameter	μm	ISO 4287:1997 standard
R_a	Profile roughness parameter	μm	ISO 4287:1997 standard
r	Cutting edge radius	μm	
S	Major cutting edge	μm	
S'	Minor cutting edge	μm	
S_α	Distance apex to end of clearance roundness	μm	
S_γ	Distance apex to end of rake roundness	μm	
Δr	Minimum distance of edge to apex	μm	
A_γ	Cara de desprendimiento		
$A_{\alpha 1}$	Major first flank/Cara de Incidencia		
a_p	Profundidad de corte	mm	
a_e	Ancho de corte	mm	
E_{hlk}	Módulo de elasticidad	Pa	σ/ϵ
HF	Ácido fluorhídrico		
HNO_3	Ácido nítrico		
$TiAlN$	Nitruro de titanio aluminio		
TiN	Nitruro de titanio		

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
\emptyset	Diámetro	[L]	$2\pi r$
α	Fase de aleación de Ti/Ángulo de incidencia	[°]	
β	Fase de aleación de Ti/Ángulo de cuña	[°]	
ω	Ángulo de hélice	[°]	
2φ	Ángulo de plano principal	[°]	
γ	Ángulo de desprendimiento	[°]	
σ	Esfuerzo	Pa	$E\epsilon$

Subíndices

Subíndice	Término
------------------	----------------

<i>f</i>	Avance por diente [mm/tooth]
----------	------------------------------

Abreviaturas

Abreviatura	Término
--------------------	----------------

RSM	Response surface method
MQL	Minimum quantity lubrication
EDM	Electrical discharge machining
MAD	Median Absolute Deviation
BUE	Build-up edge/Filo recrecido
UDM	Uniform Deformation Model
PVD	Physical Vapor Deposition
MEMS	Micro-electromechanical system

Introducción

Es bien sabido que la producción de dispositivos a micro-escala de forma rápida, económica y de calidad es una tendencia en el mundo [1]. Varias industrias como la electrónica, biomédica, automotriz, aeroespacial, entre otras, han puesto sus miras en este tipo de micro-manufactura [2]. El micro-maquinado mecánico es una operación de micro-corte que está dentro de las tecnologías de micro-manufactura en desarrollo. Este proceso pertenece al grupo de micro-fabricación no litográfica [3], al cual pertenecen las operaciones de micro-taladrado, micro-fresado plano/esférico y micro-torneado.

Los procedimientos de taladrado están relacionados con el 75% de todas las operaciones de corte de metales [4][5]. Diferentes tipos de procesos de micro-taladrado se encuentran en la actualidad. Estos se dividen, según autores, en convencionales y no convencionales [2][6][7]. Los más representativos para el grupo convencional son el micro-taladrado con micro-broca helicoidal, el taladrado con micro-broca tipo pala, la perforación con micro-broca en forma de D y la extracción con micro-broca revestida. El micro-fresado se considera como uno de los tipos más favorables entre las técnicas de micro-corte debido a su mayor flexibilidad y aplicabilidad en una amplia gama de materiales. Esta técnica es aún más prominente cuando se utiliza la fresa de punta esférica debido a su capacidad adicional de terminar planos complejos y producir varias superficies micro-texturizadas en 3D [8][9][10]. El micro-torneado está definido como un proceso de remoción de material convencional miniaturizado. Para llevar a cabo el proceso de micro-corte, la pieza de trabajo y la herramienta deben moverse entre sí para separar la micro-capa de material en forma de viruta [11].

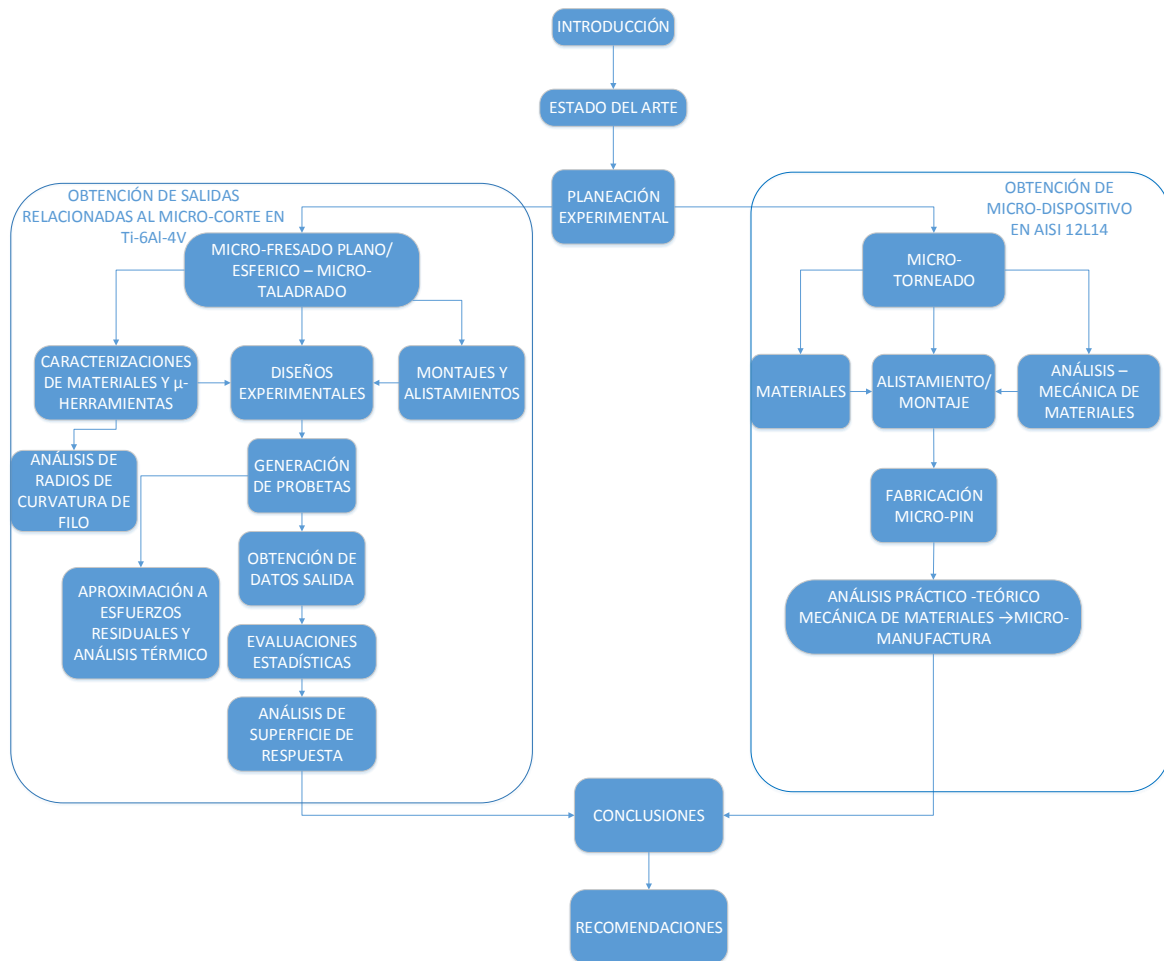
Varias de las investigaciones realizadas sobre el proceso de micro-maquinado se enfocan en la variación experimental de parámetros para comprender diversos fenómenos y

características del micro-corte. A pesar de ello, la relación entre estos aún no se ha establecido con exactitud [8].

De igual forma, es bien conocido el uso de aleaciones de titanio en un amplio espectro de las industrias aeronáutica, médica, automotriz, nuclear, química y naval, entre otras [12]. Este tipo de aleaciones, especialmente las aleaciones con fases $\alpha + \beta$, poseen una combinación de propiedades físico-químico-metalúrgicas que la han convertido en un material excelente para aplicaciones en las industrias mencionadas. Algunas de sus propiedades son: resistencia a la corrosión, alta relación resistencia-peso, resistencia a la erosión, bajo módulo de elasticidad, baja conductividad térmica, reactividad química y resistencia a altas temperaturas [12][4][13]. La combinación de estas propiedades hace que el mecanizado de este material siga siendo un reto en la industria manufacturera [7]. Esto se refleja en el alto costo del desarrollo de dispositivos en aleaciones de titanio debido a que se ha clasificado como un material difícil de mecanizar. Sin embargo y a pesar de la exigencia a superar, pocas investigaciones sobre la maquinabilidad de las aleaciones de titanio muestran algunas propiedades del comportamiento mecánico del material en el proceso de micro-mecanizado [14][15]. Por tanto, es necesario desarrollar metodologías estadístico-matemáticas para obtener parámetros de corte que reduzcan los costos de producción y el desperdicio de material.

En este trabajo se propone una metodología estadística basada en el desarrollo del método de superficies de respuesta (RSM) con el fin de obtener información sobre la influencia de los parámetros de corte en la generación de rugosidad superficial, la altura de rebaba y variación de rasgos geométricos de micro-herramienta sobre aleación de titanio Ti-6Al-4V, complementado con un estudio evaluativo relacionado a la mecánica de materiales en la fabricación de micro-pines por micro-torneado en acero AISI 12L14.

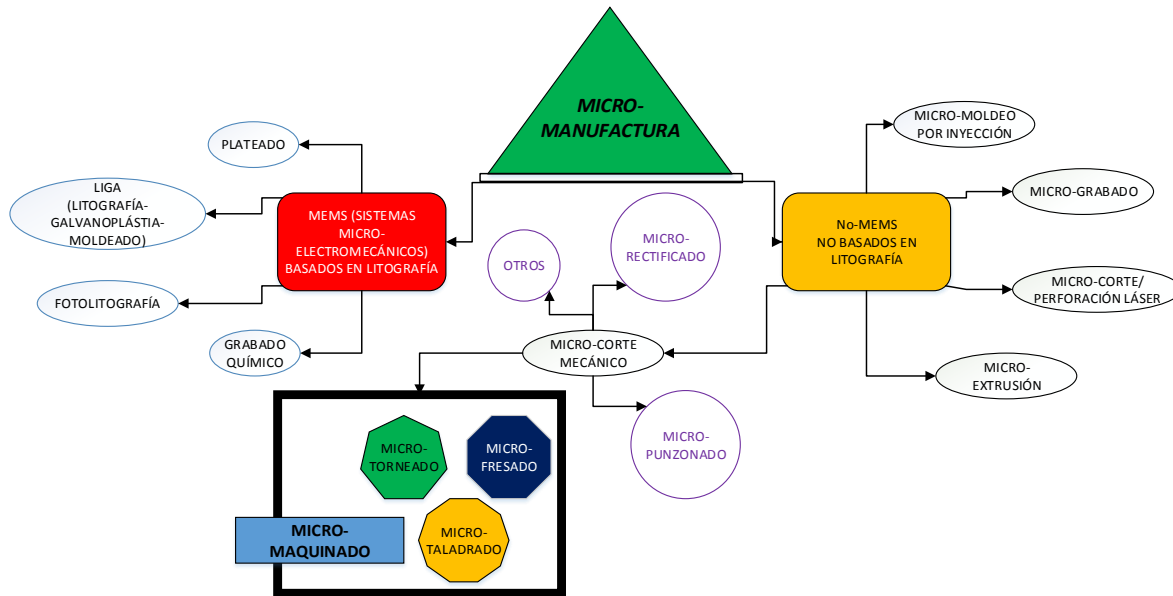
Figura 0-1: Mapa/Síntesis trabajo realizado



1.Estado del Arte

1.1 Introducción

Actualmente, se ha evidenciado un creciente interés por obtener una mayor precisión y miniaturización en un amplio abanico de actividades de manufactura [16]. Se sabe de paso, que la producción de dispositivos a micro-escala de forma rápida, económica y de calidad es una tendencia en el mundo [1]. Varias industrias como la electrónica, biomédica, automotriz, aeroespacial, entre otras, han puesto sus miras en este tipo de micro-fabricación [2]. Aplicaciones específicas a dichos campos incluyen celdas de combustible a micro-escala, reactores micro-químicos fluidicos que requieren micro-bombas, válvulas y dispositivos de mezcla, sistemas de micro-fluidos, micro-agujeros para fibra óptica, micro-toberas para chorros de alta temperatura, micro-moldes, implantes dentales, entre otros [17]. La tecnología crece a pasos agigantados esperando con ello mejorar la calidad de vida y el crecimiento económico mundial. Basado en esto, la creación de dispositivos y aplicaciones a escalas microscópicas han aportado en los últimos 30 años al desarrollo de la micro-fabricación no litográfica o non-MEMS por sus siglas en inglés (non-micro-electromechanical system). La micro-manufactura no litográfica **Figura 1-1**, incluye técnicas como micro-EDM (Electrical Discharge Machining o Electro-erosión), micro-corte mecánico, micro-corte/perforación láser, micro-extrusión, micro-grabado, micro-estampado y micro-moldeo por inyección [3].

Figura 1-1: Clasificación de técnicas de micro-fabricación (adaptado de [3]).

El micro-maquinado mecánico es una operación de micro-corte que está dentro de las tecnologías en desarrollo. Este proceso de micro-manufactura, no tiene actualmente una distinción universal dentro de una clasificación, por lo cual, es posible orientarlo a múltiples características de proceso. La **Tabla 1-1** proporciona un resumen de la definición propuesta disponible en la literatura revisada.

Tabla 1-1: Definición propuesta para micro-maquinado

<i>Investigadores</i>	<i>Año</i>	<i>Definición</i>
V. S. Kathavate et al [18]	2015	"Este es un proceso que utiliza fresas planas. Por lo general, estas herramientas oscilan en diámetros de 100 a 500 μm y los radios de los fillos varían de 1 a 10 μm "
D. Carou et al [19]	2017	"En el micro-maquinado, los tamaños de las piezas están en un rango micrométrico de 1 a 999 μm "
R. S. Anand y K. Patra [20]	2014	"Micro-maquinado mecánico: tolerancia 1 μm "
A. Gupta et al [21] y Asma Perveen et al [22]	2018	"El micro-maquinado se define como un proceso de mecanizado, en el que el espesor de capa del material eliminado mediante una pasada de filo, oscila entre 1-999 μm "

X. Liu et al [17]	2004	“La geometría de la herramienta, es decir, el radio del filo, es comparable en tamaño a la geometría de corte, es decir, la carga de viruta”
D. Dornfeld et al [23]	2006	“El micro-maquinado se define estrictamente como el corte mecánico de características con enganche de la herramienta inferior a 1mm con filos de corte definidos geoméricamente.”
J. Chae et al [24]	2005	“El mecanizado micro-mecánico es otro método de fabricación para crear dispositivos y componentes en miniatura con características que van desde decenas de micrómetros hasta unos pocos milímetros de tamaño.”
A. Aramcharoen et al [25]	2008	“Se adapta la visión de que si se utilizan fresas de diámetro pequeño (1–999 μ m), o si el grosor de la viruta no deformada es comparable al radio del filo de corte o al tamaño de grano del material, este presenta un desafío para el fresado y podría considerarse como micro-maquinado.”
T. Masuzawa et al [26]	1997	“La frontera micro-macro se establece alrededor de las 200 μ m con algunas variaciones entre los diferentes métodos.”, “Este término cambia según los niveles contemporáneos de las tecnologías convencionales”.
T. Masuzawa [27]	2000	“El Comité Científico Técnico de los Procesos de Mecanizado Físico y Químico del CIRP, adoptó como rango de 1 a 500 μ m”
G. Bissacco et al [28]	2008	“En el micro-maquinado, la profundidad de corte se reduce a unas pocas micras y su magnitud es del mismo orden que el radio del filo de la herramienta.”
Petar Piljek et al [3]	2014	“El micro-maquinado se refiere al micro-corte mecánico que utiliza filo(s) de corte determinados geoméricamente (micro-torneado, micro-fresado y micro-taladrado, etc.), realizado en máquinas de precisión convencionales o micro-máquinas.”
M.A. Câmara et al [3]	2012	“El micro-maquinado se define en función de las dimensiones de la herramienta de corte, que debe estar dentro del rango de 1 a 1000 μ m, sin embargo, el aspecto más relevante en relación con el alcance de este grupo de operaciones reside en el hecho de que el espesor de viruta

		sin cortar y el tamaño de grano del material de trabajo poseen dimensiones comparables al radio del filo de corte.”
E. Brinksmeier et al [3]	2012	“Rango de operación y calidad superficial alcanzable micro-maquinado: Tamaño de área maquinada $1 - 10^5 mm^2$, remoción de volumen en un paso de mecanizado $10^{-3} a 10^2 mm^3$, tasa de remoción de material $10^{-5} a 1 mm^3 s^{-1}$, error geométrico relativo 10^{-7} a 10^{-5} , rugosidad superficial (S_a) $1 - 10^2 nm$.”
Herrero et al [29]	2006	“La discusión sobre el significado de “micro-tecnologías” no es nueva y los límites dimensionales aún son confusos. Los límites razonablemente aceptados se muestran a continuación: Micro-tecnologías: de 0.5 a 499 μm en 2D/3D.”
B. Boswell et al [30]	2018	“Técnicamente, el micro-corte se puede caracterizar por la relación entre la unidad de material extraído y el tamaño del radio del filo de la herramienta, lo que sugiere que el radio del borde de la herramienta en el mecanizado micro-mecánico es el elemento clave en el corte con respecto al tamaño de grano del material.”
L. Uriarte et al [31]	2007	“Aunque esta técnica (micro-fresado) es muy similar al fresado a escala convencional, la gran reducción de dimensiones (una escala alrededor de 40/1), hace que aparezcan fenómenos y mecanismos de corte que casi nunca se encuentran en una escala convencional. Esta reducción de escala se puede ver en algunos de los parámetros habituales del micro-fresado: avance por diente inferior a $1 \mu m$, profundidad de corte 2-15 μm , velocidad de rotación del husillo superior a 50000rpm y diámetro de herramienta inferior a 0.3mm.”
V.K. Jain [32]	2008	“El micro-maquinado engloba todos aquellos procesos en los que se elimina material a nivel de micras.”
R. C. Dorf et al [33]	1994	“En el micro-maquinado, el objetivo es producir mini y micro-sistemas (típicamente de 1cm o menos en tamaño), con micro-componentes (típicamente de 1 a 100 μm de tamaño), con tolerancias suficientes para lograr la funcionalidad y repetitividad requeridas.”

Alting, L et al [33] y M. J. Madou [34]	2003 - 2002	“Finalmente se adoptó el rango de 1 a 500µm para delinear los límites superior e inferior del micro-maquinado. Sin embargo, es muy común cambiar este rango de 0.1 a 100µm e incluir, además del tamaño de un componente, su precisión o textura superficial.”
---	-------------------	--

Uno de los campos de aplicación en crecimiento del micro-maquinado mecánico es la fabricación de implantes dentales. Existe una gran variedad de formas en las cuales una persona puede sufrir una lesión que comprometa la mandíbula o la boca. Cuando las lesiones provocan la pérdida de una o más piezas dentales, puede ser necesario su reemplazo, siendo el implante dental una posible solución a dicho inconveniente. Según la AAID (American Academy of Implant Dentistry), más de 3 millones de personas en los Estados Unidos tienen implantes y anualmente se agregan 500000 personas a este número [35][36]. El titanio puro (Ti) y las aleaciones de Ti son materiales estándar bien establecidos para implantes dentales debido a su combinación favorable de resistencia mecánica, estabilidad química y biocompatibilidad [37]. Para implantes orales, el concepto de osteointegración fue descubierto por Brånemark y sus colaboradores, teniendo este, una importante influencia en los tratamientos clínicos [38]. Hace ya más de 50 años que se mecanizó el primer implante oral y desde entonces se ha reconocido que las rugosidades superficiales de estos dispositivos, desempeñan un papel vital en las interacciones moleculares, la respuesta celular y la osteointegración [39]. En la actualidad, se investiga el desarrollo de superficies rugosas [36][40] en conjunto con la búsqueda de parámetros de micro-corte mecánico sobre aleaciones de titanio para mejorar acabados de producto (eliminación o disminución de rebabas) [41][42][43][44][45], desgaste de micro-herramienta (tool-life) especialmente para micro-fresado esférico y plano [46][47][48][49], utilización de mínima lubricación/refrigeración en corte [50], entre otros.

El estudio descrito por M. Hasan et al [2] está limitado a características relacionadas con el micro-taladrado. Realiza una clasificación entre micro-taladrado convencional y no convencional generando comparaciones entre ellos. Sobre rugosidad superficial, señala un estudio en el cual obtienen, sobre inconel 718, rugosidades superficiales del rango de 0.1-0.25µm, con micro-brocas helicoidales (Ø400µm) de carburo de tungsteno. A. J. Mian [51] exclusivamente revisó temas afines al micro-corte en el fresado plano. Cita autores relacionados con el proceso de generación de superficie en el micro-fresado de materiales

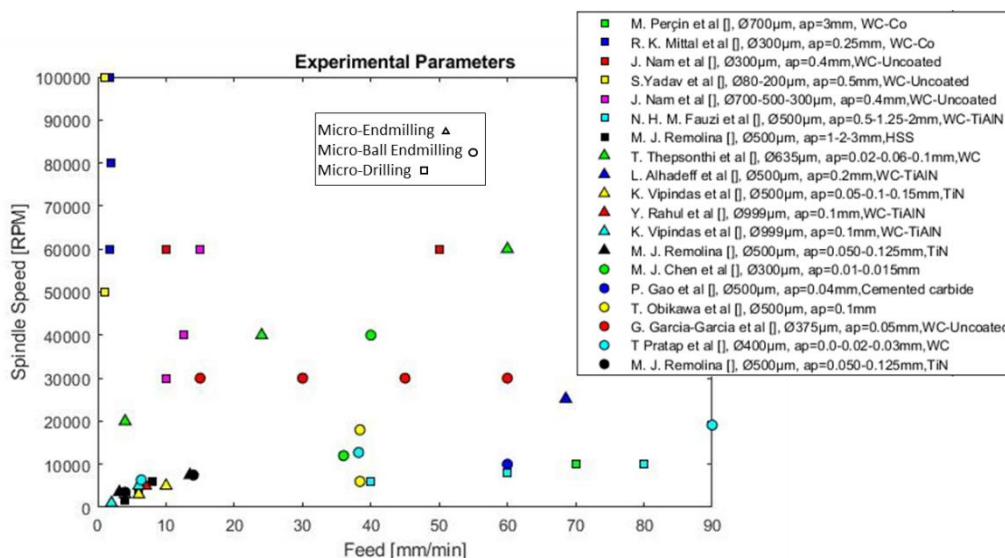
de trabajo tanto monofásicos como multi-fásicos. B. Boswell et al [30] reporta el micro-corte mecánico en sus diferentes formas (micro-taladrado, micro-torneado y micro-fresado), sin embargo sus descripciones del fenómeno de micro-corte son generales, sin enfocarse en materiales y enfatizando en el requerimiento de equipos generadores de altas RPM (por encima de las 100000RPM para procesos de micro-fresado y micro-taladrado). B. Z. Balázs et al [52] describe únicamente cuestiones relacionadas al proceso de micro-fresado plano. Sus autores consultados, recomendaron establecer el avance por diente a un valor ligeramente superior al del filo del radio de corte para optimizar la rugosidad de la superficie.

La revisión de la literatura se basó en la búsqueda de parámetros de corte de micro-maquinado tales como: avance [mm/min], velocidad de husillo [RPM], profundidad de corte [mm], entre otros, aplicados a 3 procesos de micro-maquinado (micro-taladrado, micro-torneado y micro-fresado) con el fin de dar un contexto de fondo y contribuir a comprender aún más la influencia de estas características en el proceso.

1.2 Contexto parámetros de corte en el μ -maquinado

La **Figura 1-2** expone parámetros de corte utilizados en el micro-maquinado en diferentes investigaciones experimentales. Las operaciones de micro-corte se aplicaron sobre la aleación de titanio Ti-6Al-4V.

Figura 1-2: Parámetros experimentales



1.3 Conclusiones

La mayoría de las investigaciones realizadas consultadas en el área del micro-maquinado se han generado por debajo de las 30000RPM y avances menores a 40mm/min esto para las 3 operaciones de micro-corte. A pesar de la no uniformidad por parte de los investigadores en el uso de parámetros de corte, se recalca un grupo de investigadores que trabajó el micro-maquinado sobre la aleación de titanio Ti-6Al-4V con parámetros de corte menores a 10000RPM y avances no mayores a 15mm/min. Puede haber una serie de factores que deben investigarse más a fondo para comprender el micro-maquinado de la aleación Ti-6Al-4V a bajas RPM (por ejemplo: el comportamiento de la aleación a altas velocidades de deformación (deformación instantánea)), no obstante, vale la pena recalcar que la mayoría de las máquinas CNC convencionales están equipadas con límites de velocidad de husillo baja (menores a 12000RPM) [53], lo cual limita aspectos de investigación y desarrollos industriales.

2. Materiales y Métodos

La **Tabla 2-1**, registra los insumos necesarios para el desarrollo de la investigación. La experimentación fue desarrollada en dos máquinas herramientas: un centro de mecanizado Leadwell V-20 con traslación de ejes 510mm (eje X), 350mm (eje Y) y 400mm (eje Z), velocidad máxima de husillo de 60-8000RPM, potencia de husillo de 5.5Kw con resolución de máquina de 1 μ m. Un torno suizo Jinn Fa Series 32 AB con una máxima longitud de torneado de 200mm, máximo diámetro de torneado husillo principal de 32mm, rango de velocidad de husillo de 200-7000RPM, potencia máxima de husillo principal de 7.5Kw y resolución de 1 μ m.

Tabla 2-1: Recursos requeridos para la investigación

Insumo	Referencia	Función
Aleación de Titanio	Ti-6Al-4V	Raw Material
Acero al Carbono	12L14	Raw Material
Centro de mecanizado	Leadwel-V20	Generación de corte
Torno suizo	Jinn Fa JSL Series 32 AB	Generación de corte
Software CAD/CAM	MasterCam X	Generación de trayectorias de corte
Software Estadístico	R-Statistics	Desarrollo de diseño de experimentos
Software Computo Numérico	Matlab	Desarrollo de RSM
Cono	BT40-SLA VERTEX	Sujeción Chuck
Chuck	ST25-ER16M-2-70L VERTEX	Sujeción Collet
Collet	ER-16 VERTEX	Sujeción herramienta

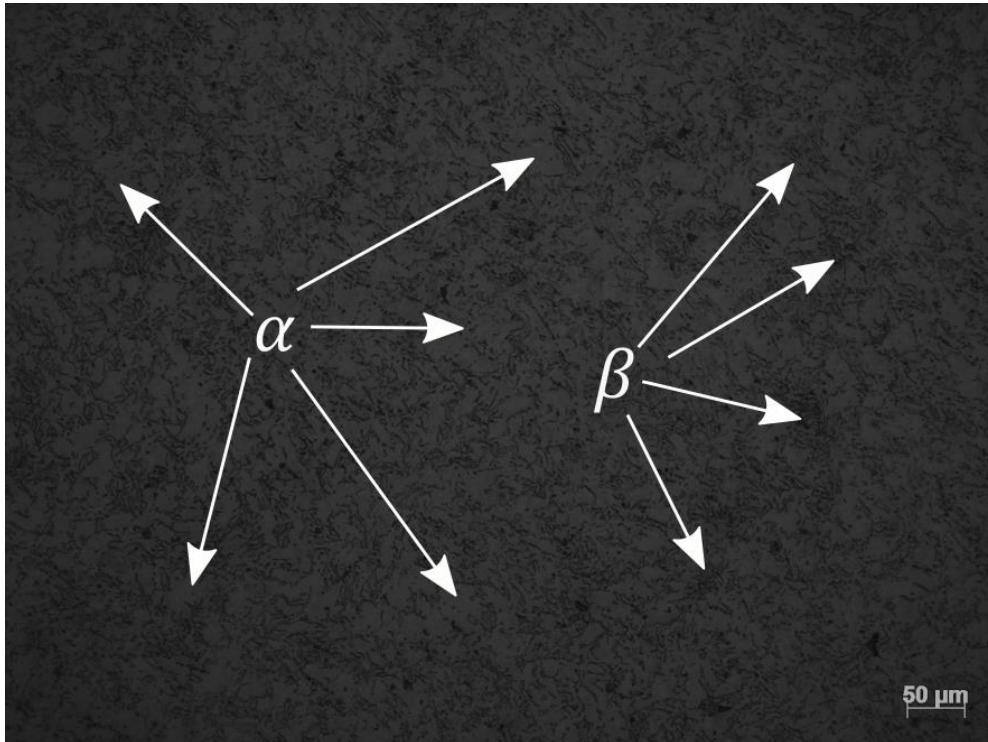
Micro-Fresa Plana (16)	Zhuzhou OBT Carbide Tools Co., Ltd. Ref X1101	Herramienta de corte
Micro-Fresa Esférica (16)	Zhuzhou OBT Carbide Tools Co., Ltd. Ref X1102	Herramienta de corte
Micro-Broca (18)		Herramienta de corte
Inserto	KENNAMETAL VBGT160404LF - KC5025	Herramienta de corte
Porta inserto	KENNAMETAL SVJBL1616H11	Sujeción inserto
Prensa	HERBERT	Sujeción Material
Pull-Type Collet	HE HENG ENTERPRISE LIMITED	Boquilla husillo principal
Preseador	Zoller Smile 400	Alistamiento de herramienta
Sistema óptico de medición 3D	Alicona InfiniteFocus	Medición de rugosidades, radios de curvatura de filo, escaneo de herramientas.
Microscopio Confocal	Carl Zeiss LSM 700	Medición de rugosidad
Micro-durómetro	LECO M-400-G2	Medida micro-dureza Vickers
Interferómetro	Bruker GT-K Contour WLI	Medida altura de rebaba
Difractómetro RX	PANalytical X'Pert-PRO	Medida de difracción de Rayos X
Microscopio de Barrido Electrónico - SEM	Tescan Vega-3 LMU	Verificación de composición
Cámara Termográfica	FLIR T440	Termografía

2.1 Procedimiento Experimental Micro-Fresado (Plano y Esférico) / Micro-Taladrado

2.1.1 Materiales

El material utilizado en esta sección de la experimentación fue un bloque de 10mm x 20mm x 40mm de aleación de titanio Ti-6Al-4V para cada proceso de micro-corte. Dicho material pertenece al grupo de aleaciones de titanio ($\alpha + \beta$). Esta aleación, es más resistente que las aleaciones de titanio monofásicas y admite tratamiento térmico, forja y estampado [54]. Las medidas del bloque, fueron seleccionadas por recomendación del Standard ISO 8688-2 Tool life testing milling – Part 2 [55]. El raw material fue sometido a pruebas metalográficas como se muestra en la **Figura 2-1**. Se pueden observar las fases que componen la aleación (fase α - claros, fase β - oscuros). El reactivo utilizado en el análisis metalográfico fue Kroll (Composición: 1-3 mL HF , 2-6 mL HNO_3 , 1000 mL H_2O) [56].

Figura 2-1: Rasgos básicos del Raw Material – Metalografía/granulometría/micro-dureza.



El tamaño de grano calculado de la aleación **Tabla 2-2**, fue determinado siguiendo el ASTM E112 - Standard Test Method for Determining Average Grain Size [57].

Tabla 2-2: Tamaño de grano promedio – Aleación de titanio Ti-6Al-4V

Grain size number G	Average grain size [mm]	Grains/mm ²
11	0.00691	15870

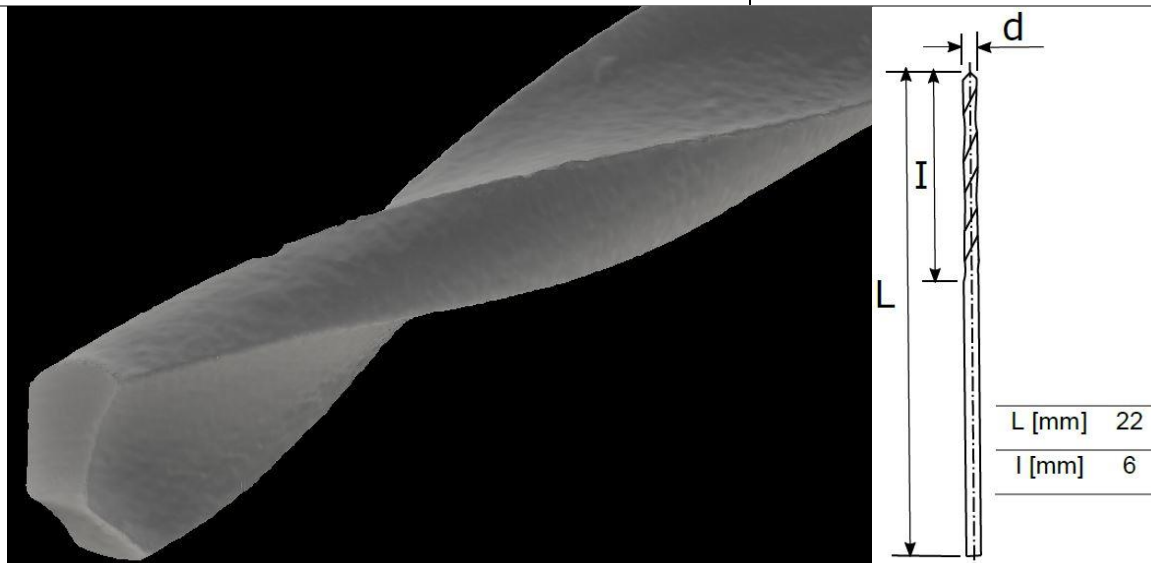
La micro-dureza del stock de aleación de titanio fue evaluada siguiendo la recomendación del ASTM E384-16 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials [58], obteniendo un promedio de micro-dureza de $H_{10} - 25$ de 294.

2.1.2 Caracterización de μ -Herramientas

Para el proceso de micro-corte, las herramientas utilizadas fueron caracterizadas geométricamente como se muestra en las **Figura 2-2, 2-3, 2-4**, con el fin de asegurar la trazabilidad de la investigación. La caracterización geométrica se llevó a cabo en un sistema óptico de medición 3D Alicona InfiniteFocus ajustado con los siguientes parámetros: Objetivo Optics 5X, Brightness 124ms, Contrasts 1.12, Vertical Resolution $0.50\mu\text{m}$, Lateral Resolution $< 7.04\mu\text{m}$, Range 360° , Axial Length 2.815mm, Number of Points $\sim 0.5\text{M}$, Ring Light lower right $\frac{1}{4}$.

Figura 2-2: Características geométricas promedio. Micro-broca.

d [μm]	Material	Coated	Helix Angle ω [$^\circ$]	Rake Angle γ [$^\circ$]	Flank Angle α [$^\circ$]	Main Plane Angle 2ϕ [$^\circ$]
499.462	HSS	Uncoated	14.47	-1.6309	23.25	91
Cutting edge radius average [μm]						4.0165



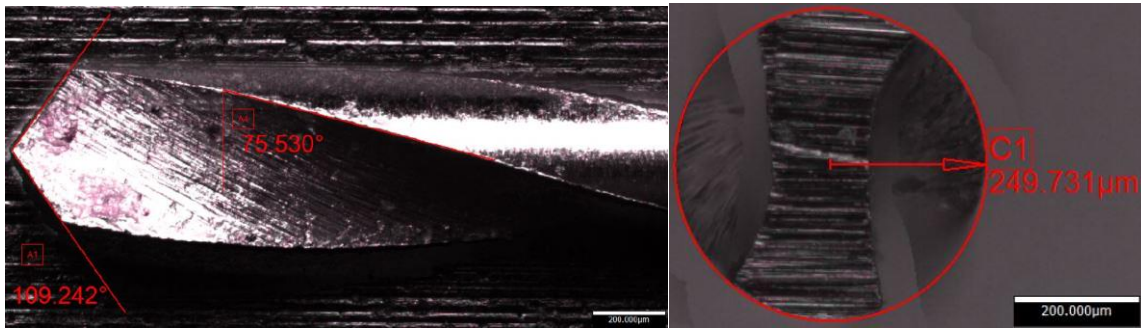


Figura 2-3: Características geométricas promedio. Micro-fresa esférica.

Z=2 d [μm]	L [mm]	D [mm]	I [mm]	Material	Coated	Helix Angle ω [°]	Rake Angle γ [°]	Flank Angle α [°]
501.936	50	4	1	Carbide	TiN	30.611	4.723	23.342
Cutting edge radius average [μm]							3.888	

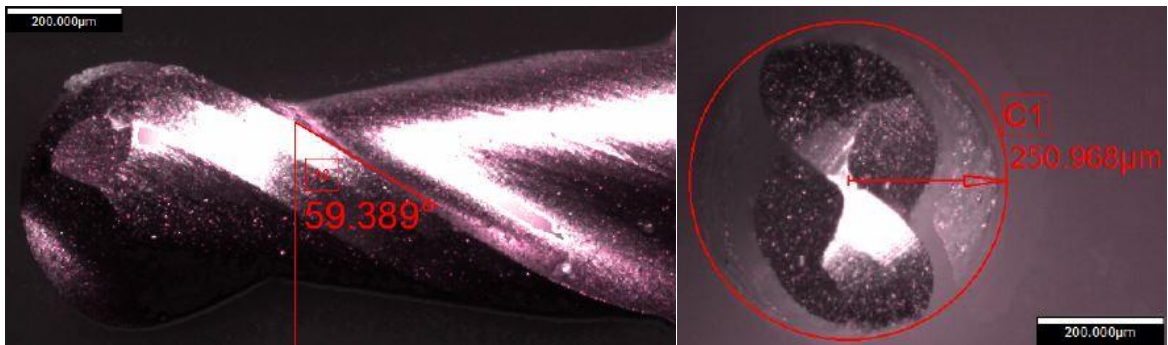
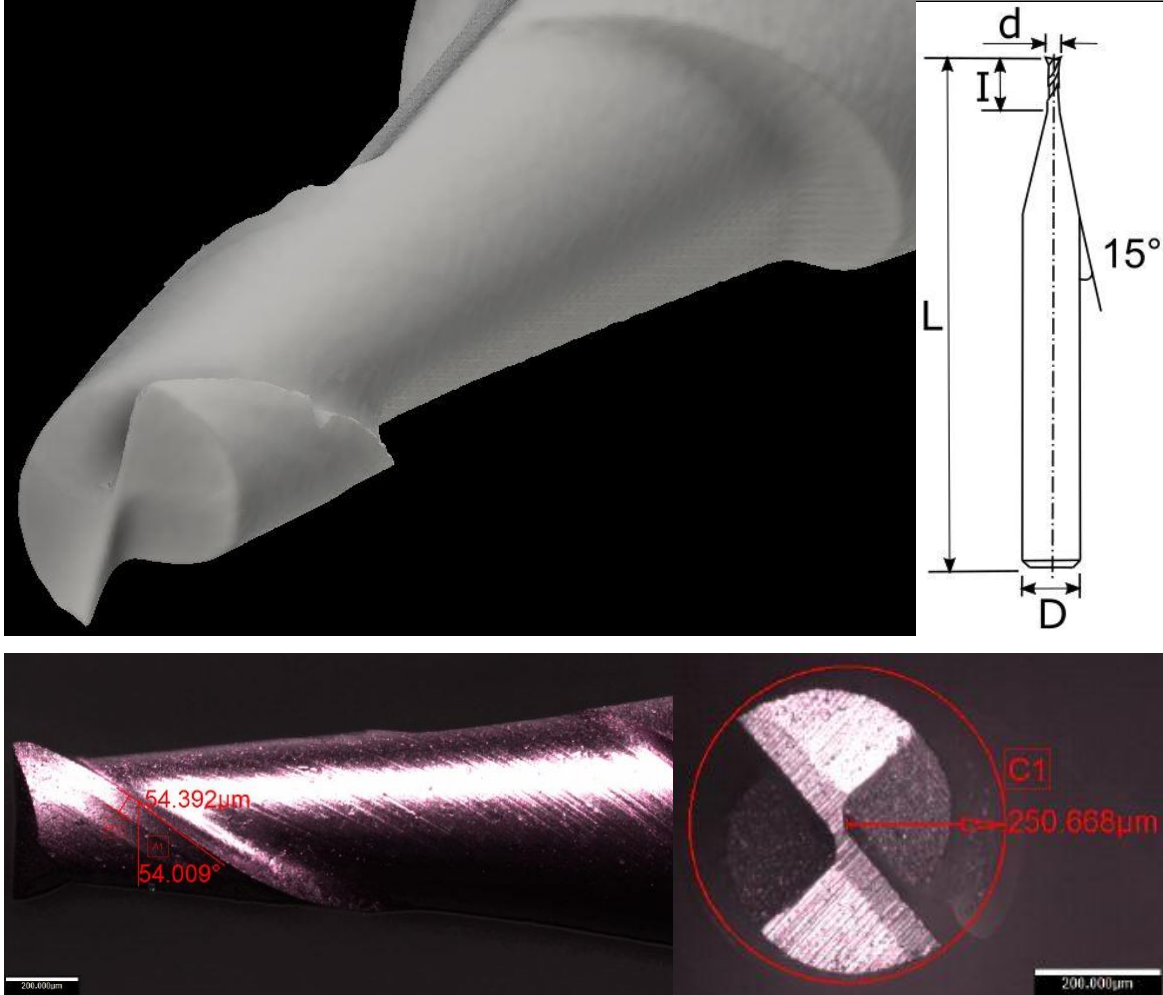


Figura 2-4: Características geométricas promedio. Micro-fresa plana.

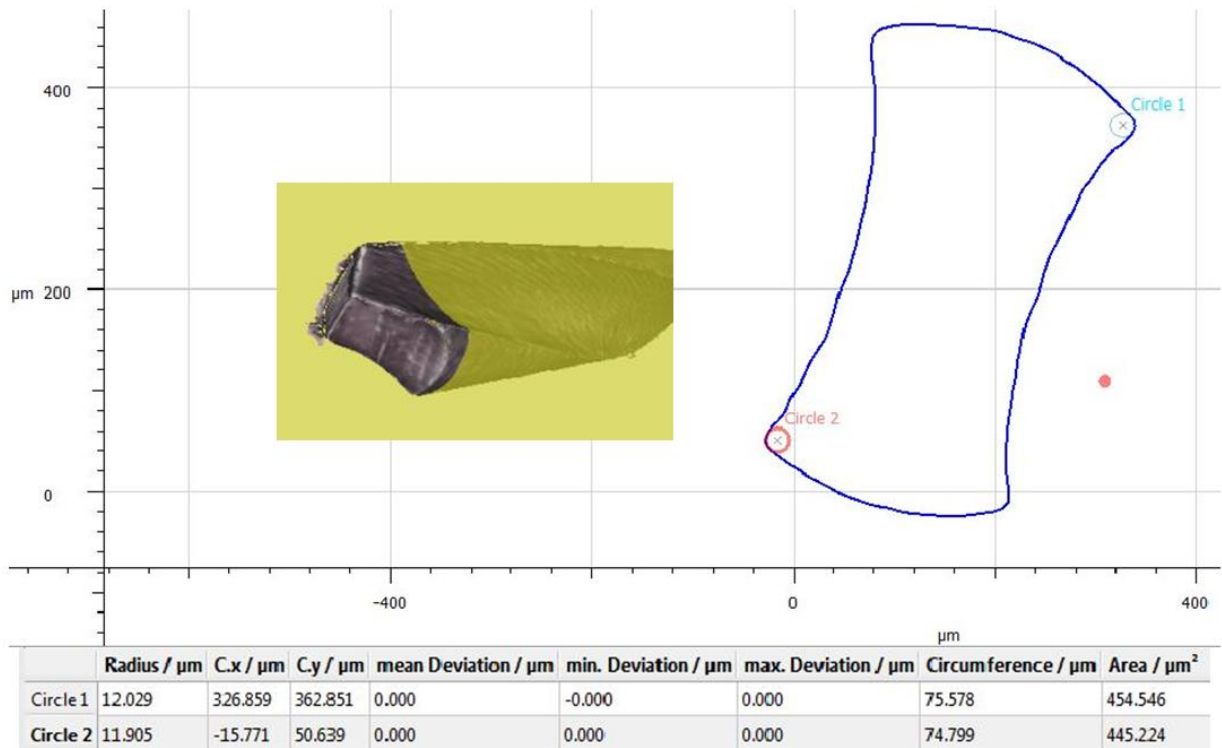
Z=2 d [μm]	L [mm]	D [mm]	I [mm]	Material	Coated	Helix Angle ω [°]	Rake Angle γ [°]	Flank Angle α [°]
501.336	50	4	1	Carbide	TiN	35.991	-6.001	30.018
Main Plane Angle φ [°]							45	
Cutting edge radius average [μm]							6.454	



El Cutting edge radius average fue medido seccionalmente de acuerdo a la nomenclatura del Standard ISO 3001-2 Basic quantities in cutting and grinding – Part 1 [59]. El radio de curvatura del filo de las micro-herramientas fue calculado por medio del módulo EdgeMasterModule perteneciente al sistema óptico de medición 3D Alicona InfiniteFocus.

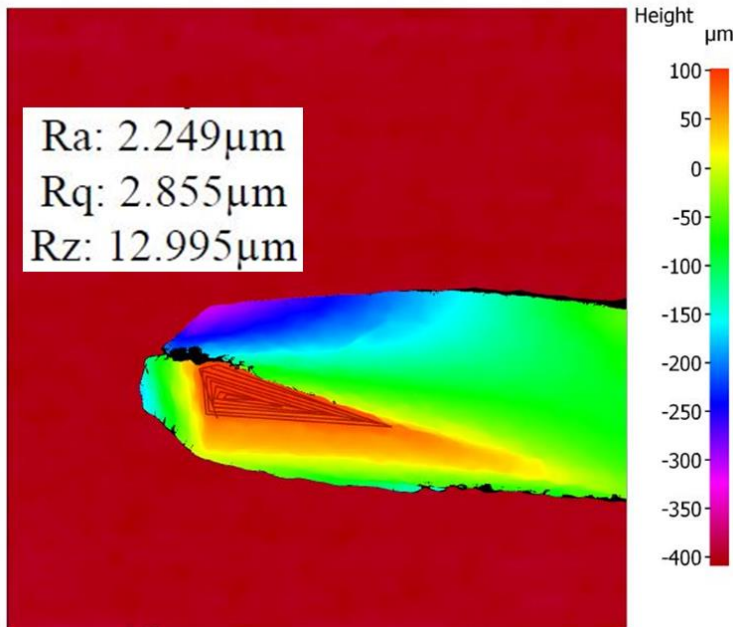
En la caracterización geométrica de las micro-herramientas, se realizó una evaluación del radio de curvatura de filo por medio de cortes transversales sobre los escaneos generados previamente (**Figura 2-5**). Los cortes fueron realizados desde el Major cutting edge S de las micro-herramientas cubriendo una longitud de 800 μm a 1200 μm cada 100 μm . Dicho procedimiento se realizó en el equipo Alicona sobre el módulo MeasureSuite 5.3 – ContourMeasurement.

Figura 2-5: Ejemplo de corte transversal. Micro-broca



De acuerdo al Standard ISO 8688 [55], una de las condiciones solicitadas reportada para los estudios relacionados con el estándar es la rugosidad de flanco. Para el desarrollo de la investigación fue evaluada la rugosidad del Mayor First Flank $A_{\alpha 1}$ para cada una de las micro-herramientas, un ejemplo se muestra en la **Figura 2-6**. La toma de medidas fue realizada bajo los estándares ISO 4287/4288/25178, con un filtro de onda Lambda C L_c igual a 800 μm y una longitud del perfil de 4mm. Para la micro-fresa plana se obtuvo una rugosidad promedio $Ra = 3.599\mu\text{m}$ y para la micro-fresa esférica $Ra = 4.807\mu\text{m}$.

Figura 2-6: Ejemplo toma de rugosidad Mayor First Flank $A_{\alpha 1}$. Micro-broca



2.1.3 Diseños de Experimentos

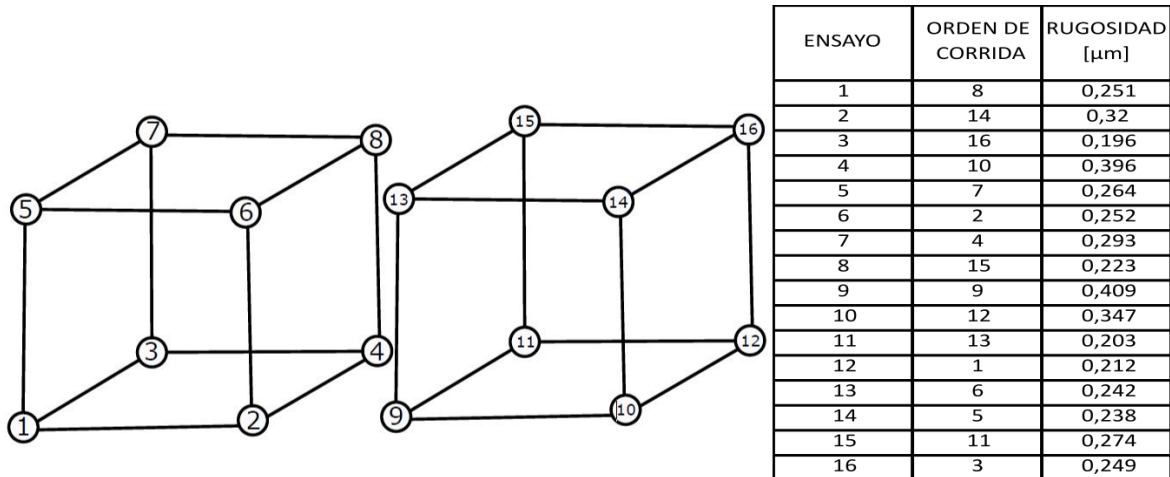
Para el desarrollo de la experimentación se plantearon diseños factoriales debido a las ventajas que proporcionan [60]:

- Son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez (monofactorial).
- Se realizan cuando puede haber interacciones presentes en el proceso con el fin de evitar llegar a conclusiones incorrectas.
- Permiten la estimación de los efectos de un factor con varios niveles de los factores restantes generando conclusiones válidas para el rango de parámetros experimentales.

Para la experimentación en el área del micro-fresado plano y micro-fresado esférico, se plantearon diseños de experimentos factoriales 2^k (k factores, cada uno con 2 niveles). Se realizó un diseño factorial 2^4 (**Figura 2-7**) con un total de 16 observaciones para cada réplica del experimento en cada proceso de micro-corte. La experimentación para los dos casos expuestos anteriormente, consta de 1 réplica debido a restricción de costos. Para obtener estimaciones confiables, la distancia entre los niveles alto y bajo tienen que ser considerablemente amplia [60]. En los casos respectivos, los parámetros de corte seleccionados alcanzan a tener mínimo una relación de 2 referente a los niveles (-) y (+).

Este tipo de réplica es común en los experimentos de exploración cuando hay un número significativamente grande de factores bajo evaluación.

Figura 2-7: Esquema diseño de experimentos factorial 2^4 sin réplica. Ejemplo con valores de rugosidad superficial (micro-fresado plano).



Los parámetros de corte utilizados en la experimentación en micro-fresado plano se exponen en la **Tabla 2-3**. El avance por diente para las pruebas de micro-fresado, fue seleccionado con el fin de explorar el comportamiento del micro-corte estando dicho factor por debajo del valor del radio de filo de curvatura promedio de las micro-herramientas, siendo esta una clasificación de micro-corte en experimentaciones anteriores [61]. La profundidad de corte se seleccionó bajo criterios de categorización de capa de material removida en el μ -corte [20]. El factor ramping es elegido en relación al diámetro de la herramienta de corte [62]. La velocidad de husillo [RPMs], fue escogida debido a la limitación de equipo (máquina herramienta).

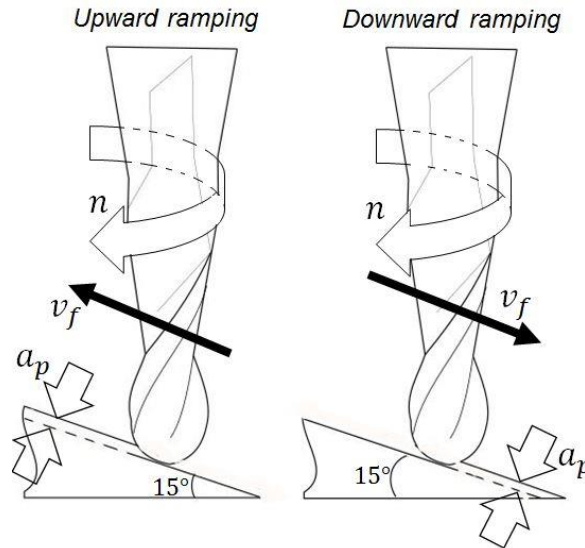
Tabla 2-3: Parámetros de corte utilizados en el proceso de micro-fresado plano.

<i>Level</i>	<i>In ramping</i> [°]	<i>Depth of cut</i> [mm]	<i>Feed per tooth</i> f_z [mm/tooth]	<i>RPMs</i> n
<i>High</i>	10	0.050	0.0009	7500
<i>Low</i>	3	0.125	0.00045	3500

Para el proceso de la experimentación en micro-fresado esférico los parámetros utilizados se muestran en la **Tabla 2-4**. Se seleccionó como factor para el μ -mecanizado la obtención

de una rampa en forma ascendente / descendente (**Figura 2-8**), debido a las marcadas diferencias que se generan en el proceso en cada modo de corte enfatizando en su fuerza [63] [64] [65].

Figura 2-8: Estrategia de micro-corte. Micro-fresado esférico.

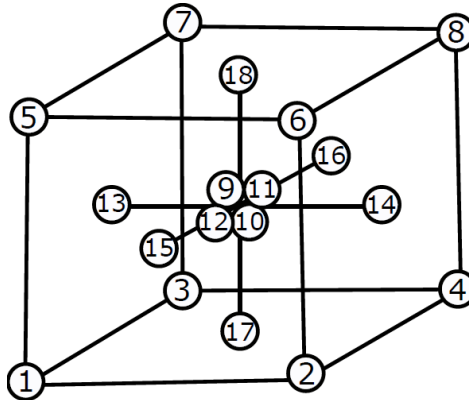


Las profundidades elegidas para el proceso de micro-fresado esférico están dentro del intervalo de clasificación de micro-corte [20], verificadas también en estudios de enfoque similar realizados con anterioridad [48].

Tabla 2-4: Parámetros de corte utilizados en el proceso de micro-fresado esférico.

<i>Level</i>	<i>Upward/Downward ramping</i>	<i>Depth of cut [mm]</i>	<i>Feed per tooth f_z [mm/tooth]</i>	<i>RPMs n</i>
<i>High</i>	↓	0.075	0.0009	7500
<i>Low</i>	↑	0.050	0.00045	3500

En la exploración del proceso de micro-taladrado, se ejecutó un diseño factorial 2^k aumentado con puntos centrales, permitiendo mantener un reducido tamaño y complejidad de diseño, siendo además una estrategia secuencial de experimentación [60]. Se desarrolló un diseño experimental compuesto central (Central Composite Design), su esquema se muestra en la **Figura 2-9**. Este diseño, consiste en un diseño factorial 2^3 con 4 puntos centrales y 6 puntos axiales.

Figura 2-9: Esquema del Central Composite Design realizado experimentalmente.

De acuerdo con pruebas experimentales previas, se seleccionaron y utilizaron los parámetros de corte de la **Tabla 2-5**. Todos los tratamientos de micro-taladrado se realizaron bajo el modo Dwell Drilling (perforación permanente).

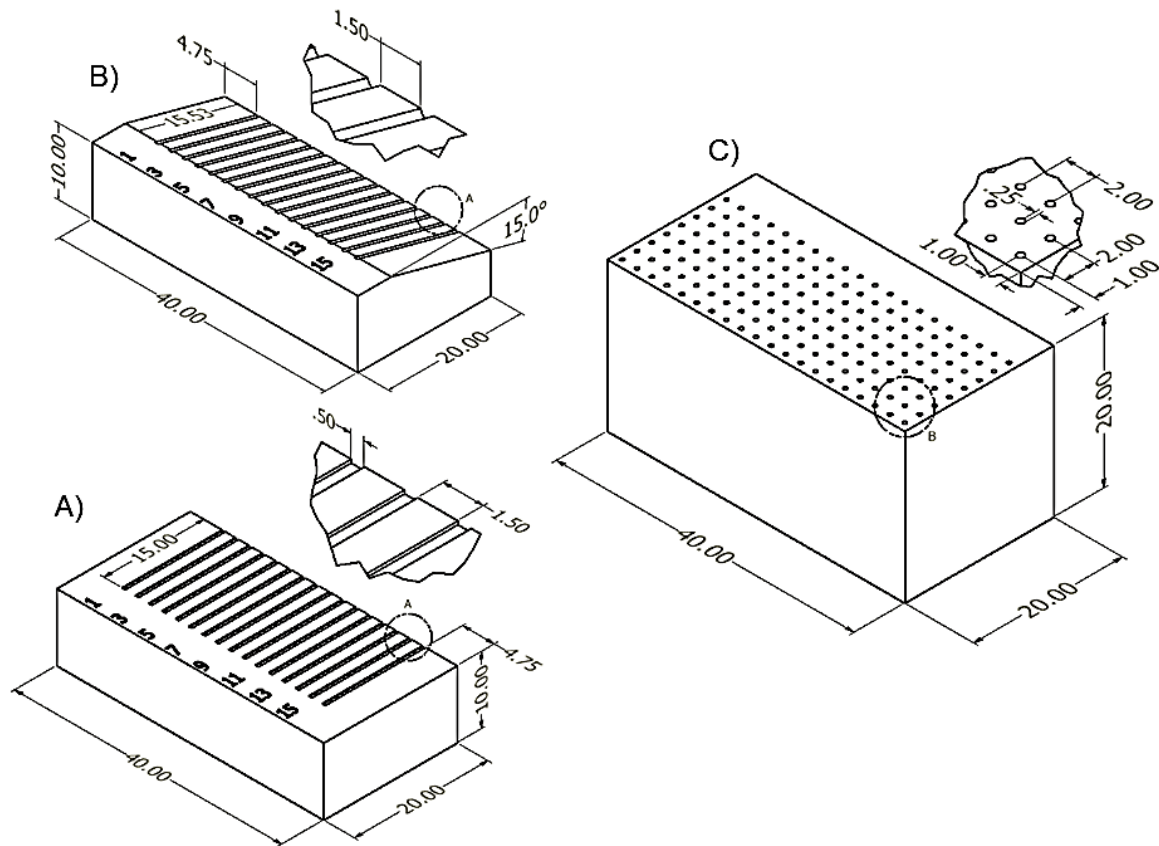
Tabla 2-5: Parámetros de corte. Micro-taladrado.

<i>Level</i>	<i>RPMs</i> <i>n</i>	<i>Feed</i> <i>v_f</i> <i>[mm/min]</i>	<i>Depth of cut</i> <i>[mm]</i>
<i>High</i>	6000	8	3
<i>Center</i>	3750	6	2
<i>Low</i>	1500	4	1

2.1.4 Diseño básico de Probetas

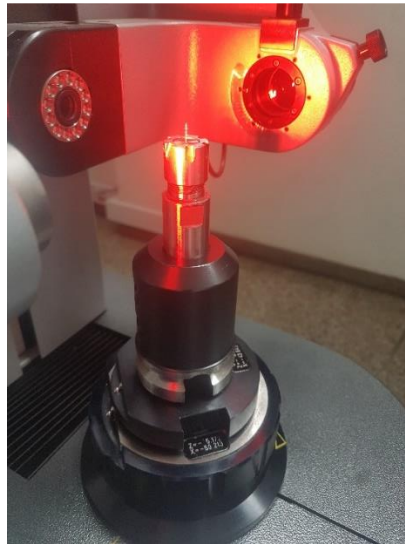
De acuerdo a las recomendaciones del Standard ISO 8688 [55], se realizaron las siguientes geometrías de probeta para los micro-cortes (**Figura 2-10**), teniendo en cuenta la longitud de corte recomendado (20 veces el diámetro de corte) para los ranurados en el micro-fresado. El ángulo de inclinación planteado para la probeta de micro-fresado esférico se seleccionó debido a que un ángulo entre $10^\circ - 20^\circ$ es óptimo para el fresado de alta velocidad en la fabricación de moldes y dados en la industria. Lo anterior de acuerdo a que las cargas termo-mecánicas del filo aumentan con una mayor inclinación de la herramienta y por otro lado, hay una distribución más uniforme de la velocidad de corte, claramente más cercana al óptimo tecnológico [49] [65].

Figura 2-10: Esquemas de probetas. A) Micro-fresado plano. B) Micro-fresado esférico. C) Micro-taladrado. Medidas en milímetros.

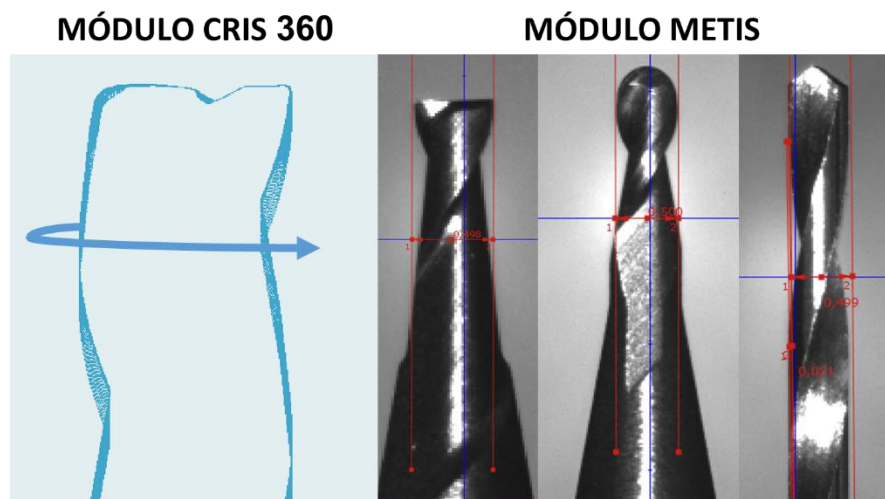


2.1.5 Montaje y Alistamiento

Cada tratamiento en los diseños experimentales se realizó con una herramienta nueva bajo condiciones secas con el fin de evitar la posibilidad de inserción en el proceso de elementos que puedan interferir en las propiedades físico-químicas del material [54]. El montaje de cada micro-herramienta como se muestra en la **Figura 2-11**, fue realizado sobre un cono BT40-SLA de diámetro $1\frac{1}{2}$ in al cual se le adaptó un chuck ST25-ER16M-2-70L para la sujeción de los collet ER-16 de diámetros 0.5mm y 4mm respectivamente con runout de 0.02mm a 6mm de longitud en voladizo.

Figura 2-11: Montaje micro-herramienta.

El runout de micro-herramienta fue medido para cada uno de los tratamientos en el preseteador Zoller Smile 400 - Software Pilot 3.0. La verificación de medida del runout se realizó bajo dos módulos, CRIS 360 y METIS. El primer módulo hace girar la micro-herramienta realizando un escaneo de giro directo. En el segundo método, se verifica el estado de la herramienta (inspección visual) y por medio de cotas fijas, se contrasta el runout del montaje de la micro-herramienta teniendo en cuenta el diámetro nominal como lo muestra la **Figura 2-12**.

Figura 2-12: Verificación de runout. Equipo Zoller Smile 400.

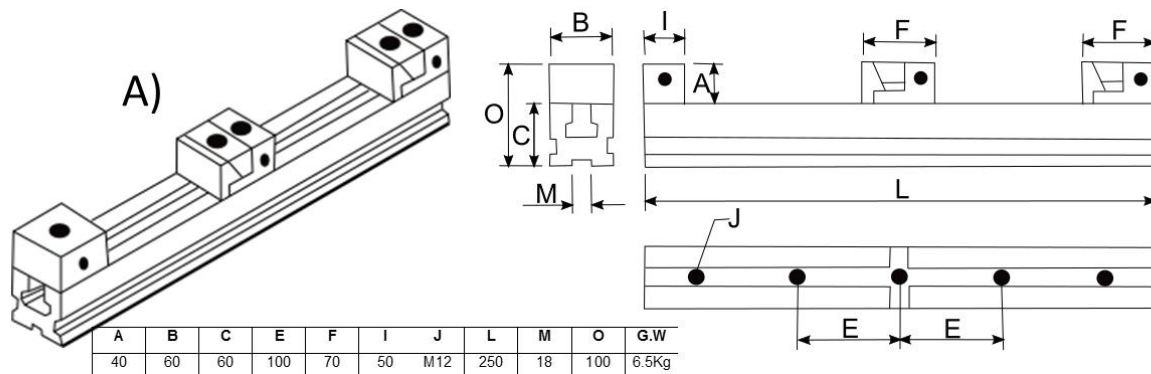
Los runout promedio se muestran a continuación en la **Tabla 2-6**.

Tabla 2-6: Runout promedio.

OPERACIÓN DE μ-CORTE	RUNOUT MONTAJE HERRAMIENTA [μm]
MICRO-TALADRADO	21.222
MICRO-FRESADO PLANO	18.375
MICRO-FRESADO ESFÉRICO	13

El montaje del material se realizó sobre una prensa HERBERT MULTIGRIP de posicionamiento rápido **Figura 2-13**, de acuerdo a las condiciones geométricas iniciales de probeta expuestas en la **Figura 2-10**.

Figura 2-13: Alistamiento/Montaje. A) Esquema prensa HERBERT (medidas en mm). B) Montaje probeta micro-fresado esférico



B)



Para el caso de la probeta de micro-taladrado fue necesario realizar un centro punteado con una broca de centros de $\varnothing 0.5\text{mm}$ y profundidad de 0.2mm respectivamente. Esto se efectuó debido a que la exploración inicial mostró problemas en el proceso de micro-perforación como se muestra en la **Figura 2-14**.

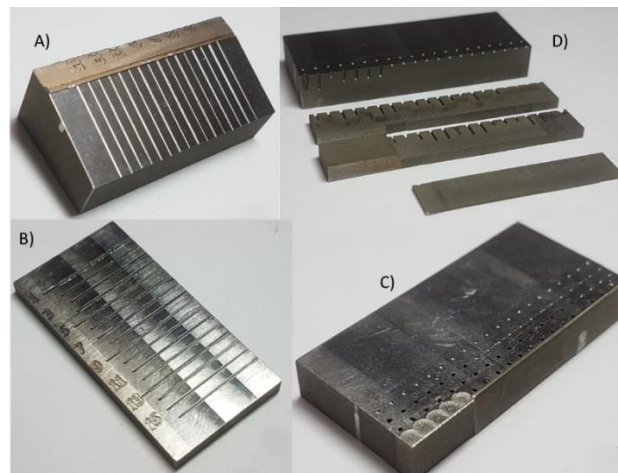
Figura 2-14: Problemas en micro-perforación experimentación previa. De izquierda a derecha: 6mm/min – 6000RPM, 4mm/min – 6000RPM, 5mm/min – 3500RPM, 4mm/min – 3500RPM.



2.1.6 Caracterización de probetas realizadas y μ -herramientas utilizadas

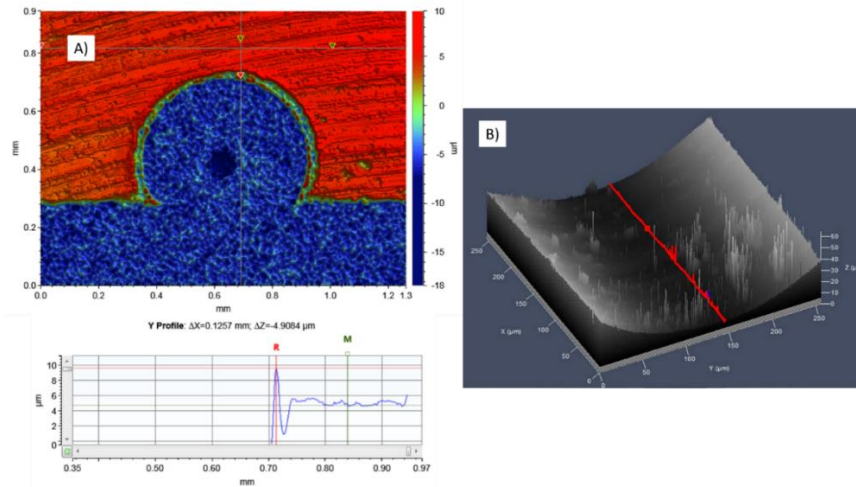
Las probetas obtenidas de acuerdo a las geometrías y diseños de experimentos planteados se muestran en la **Figura 2-15**. Se realizaron cortes en electro-erosionado por hilo con el fin de poder realizar la evaluación de rugosidad superficial en equipo confocal y altura de rebaba en interferómetro.

Figura 2-15: Probetas obtenidas. A) Micro-fresado esférico. B) Micro-fresado plano. C) Micro-taladrado. D) Cortes transversales micro-taladrado.



La evaluación de los rasgos antes mencionados se realizó a manera de barrido. Por medio del equipo, fue posible encontrar sobre la superficie maquinada, el valor máximo medido de rugosidad superficial Ra al igual que para la altura de rebaba de entrada en la vista superior como se observa en la **Figura 2-16**.

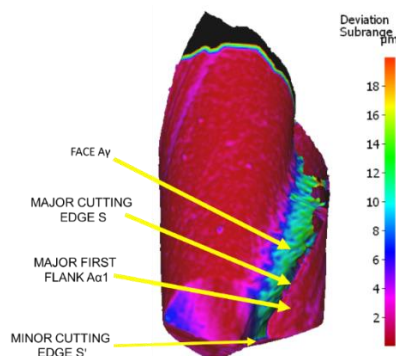
Figura 2-16: Ejemplo toma de medidas de A) Altura de rebaba y B) Rugosidad para probeta de micro-taladrado.



Para las micro-herramientas utilizadas en el proceso de micro-fresado plano y micro-taladrado, se realizaron pruebas de caracterización adicionales a la investigación. Para el caso del micro-fresado plano, se evaluó la variación de la μ -herramienta sobre algunas de sus partes activas de acuerdo a la nomenclatura del Standard ISO 3001-2 [59]. Esta caracterización se realizó en el equipo Alicona InfiniteFocus basados en la comparación del escaneo de una μ -herramienta nominal y su homólogo usado. Las partes activas evaluadas se muestran en la **Figura 2-17**.

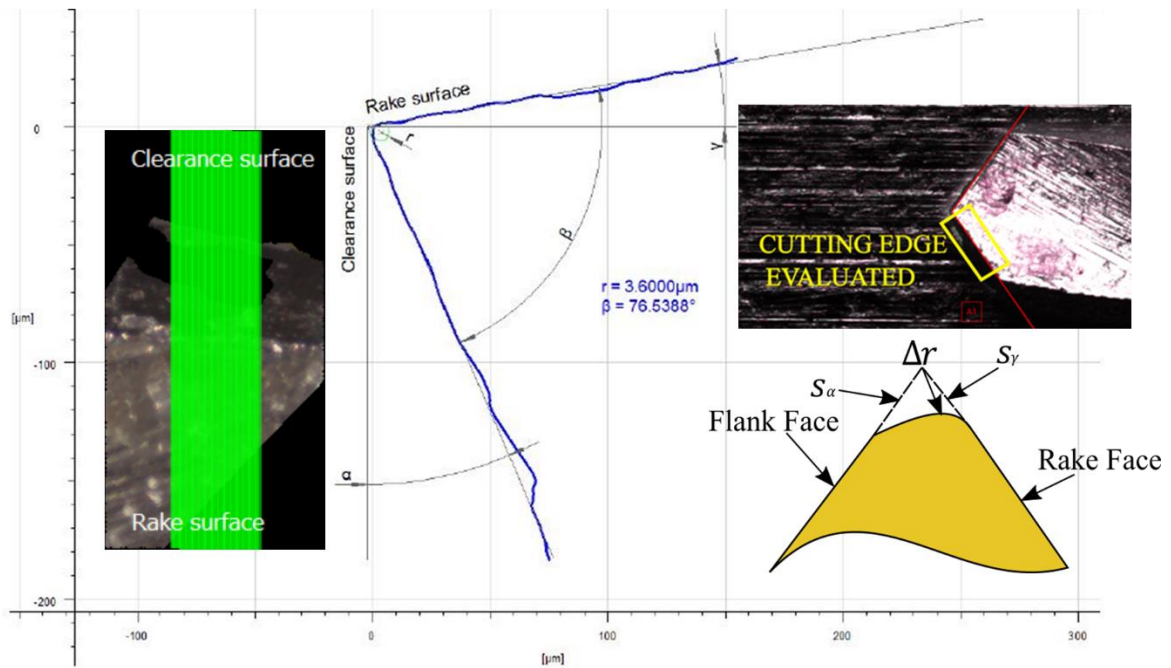
Para las micro-brocas utilizadas, se realizó una caracterización de filo de herramienta [66] [67]. La caracterización se compone de las medidas geométricas siguientes mostradas en la **Figura 2-18**: Mean radius of mean edge (r), Distance apex to end of clearance roundness (S_α), Distance apex to end of rake roundness (S_γ), Minimum distance of edge to apex (Δr) y Edge width ($W\Delta r$).

Figura 2-17: Evaluación de micro-fresa plana / Parte y nomenclatura Standard ISO 3001-2 [59]



Los valores de geometría, fueron obtenidos por medio del Edge Master Module del equipo Alicona InfiniteFocus para las 18 μ -brocas utilizadas y 5 herramientas nominales. El filo evaluado fue el Major cutting edge S.

Figura 2-18: Evaluación del Cutting edge radius para μ -brocas.

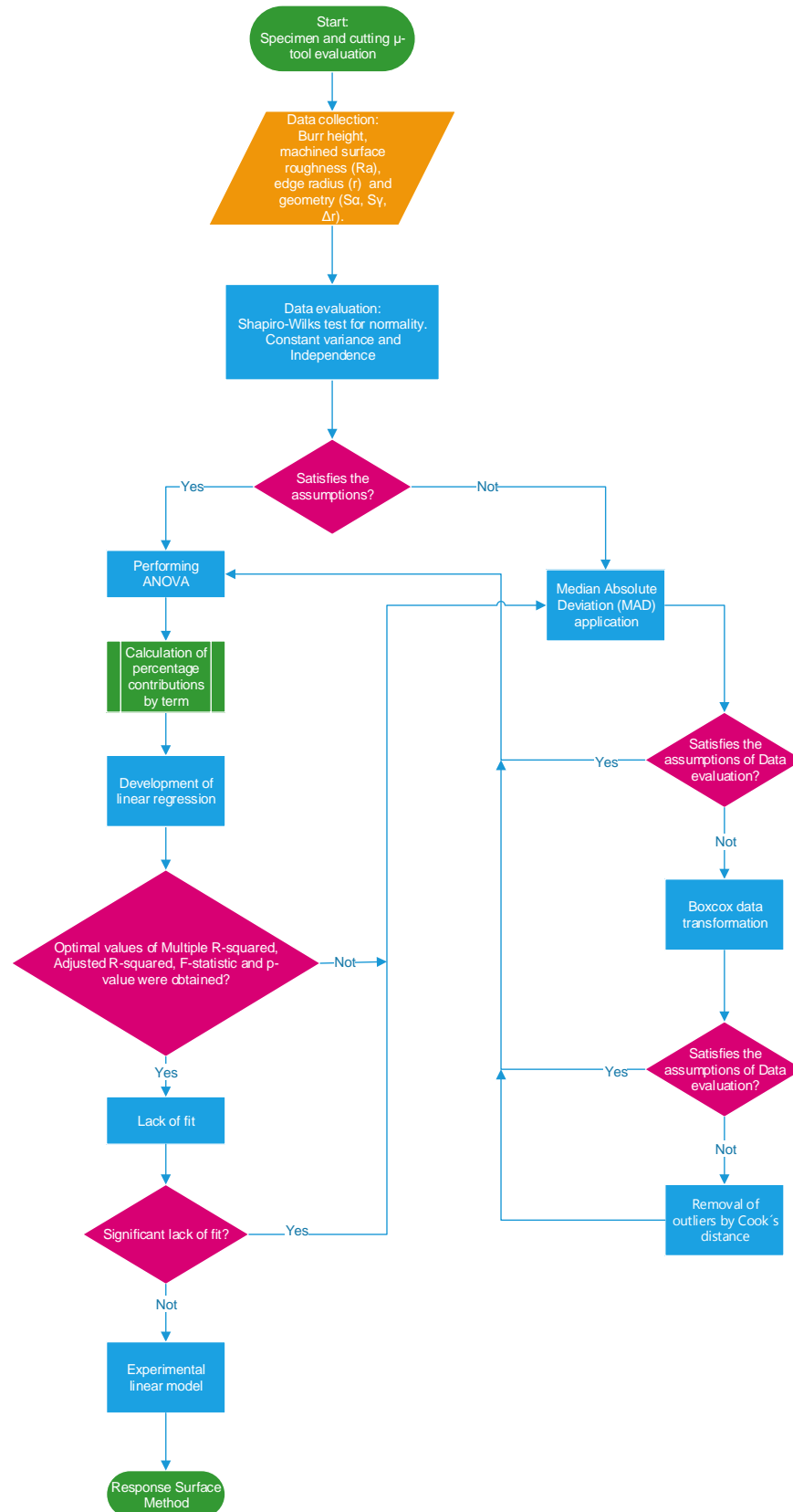


Name	Value	[u]	Status	Nom.	Lower	Upper	Description
r	3.6000	μm	OK	4.3660	2.3660	6.3660	Mean radius of mean edge
α	23.3358	$^\circ$	n.a.	0.0000			Clearance angle
β	76.5388	$^\circ$	n.a.	0.0000			Wedge angle
γ	-9.8746	$^\circ$	n.a.	0.0000			Rake angle
S_α	8.9456	μm	OK	11.3348	1.3348	21.3348	Dist. apex to end of clearance roundness
S_γ	4.0601	μm	OK	13.4899	3.4899	23.4899	Dist. apex to end of rake roundness
K	0.4539		NOK	1.1901	0.6901	1.6901	Symmetry of cutting edge
Δr	2.1645	μm	NOK	4.9144	3.9144	5.9144	Min. dist. of edge to apex
$W\Delta r$	3.4616	μm	OK	5.2401	0.2401	10.2401	Edge width
Ecq	0.0841	μm	OK	0.0000	0.0000	1.0000	Form deviation of circle (RMS)
Ftype	Waterfall		OK				Estimated Curvature

2.1.7 Método Estadístico de Evaluación

El tratamiento de los datos obtenidos se basa bajo el siguiente diagrama de flujo expuesto en la **Figura 2-19**.

Figura 2-19: Diagrama de flujo. Manejo de datos.



2.1.8 Aproximación a Esfuerzos Residuales y Análisis Térmico

Después de haber realizado la respectiva experimentación en el proceso de micro-fresado plano, se seleccionaron los parámetros de corte más agresivos (mayor magnitud en la mayoría de los rasgos de investigación evaluados, expuestos en la **Tabla 2-7**) para el desarrollo de la probeta en la aproximación al análisis de esfuerzos residuales.

Tabla 2-7: Parámetros de corte – Ensayo DRX

<i>Ramping [°]</i>	3
<i>Velocidad de Husillo [RPM]</i>	7500
<i>Profundidad de corte [mm]</i>	0.125
<i>Avance por diente [mm/diente]</i>	0.00045

Se realizó un corte de 10mmx10mm como se presenta en la **Figura 2-20**. El área de corte para la probeta fue seleccionada debido a que la mínima medida de colimador para la realización del ensayo era de 0.3mm y las ranuras de la probeta inicial fueron de 0.5mm, generando inconvenientes para los operarios en el set-up de máquina de difracción. Se utilizó un ancho de corte a_e del 75% del diámetro de la micro-herramienta para evitar una sobrecarga en los dientes y tener una mayor área de contacto con el material [68]. La estrategia de corte utilizada fue espiral de superposición constante (Constant Overlap Spiral), con dirección de mecanizado en paralelo (Climb), debido a la reducción del filo de sobrecarga, mejor acabado superficial y mejora en la vida útil de la herramienta [22][69]. El runout de montaje para la micro-herramienta fue de $16\mu m$ medido en presetador Zoller Smile 400.

Figura 2-20: Superficie micro-maquinada para ensayo DRX



Alternativamente se realizaron termografías (**Figura 2-21**) del micro-corte con el objetivo de observar el comportamiento térmico del proceso.

Figura 2-21: Termograma del proceso de micro-fresado plano – probeta DRX



El experimento de difracción de rayos X fue realizado en un equipo PANalytical X'Pert-PRO equipado con una fuente $Cu - K\alpha$: 1.54\AA , una diferencia de potencial de $40kV$ y una corriente de $40mA$. El rango tomado fue de $10^\circ - 70^\circ [2\theta]$, con un tamaño de paso de 0.01° y un tiempo de paso de $3.3s$.

2.2 Micro-Torneado

2.2.1 Materiales

Se utilizó un acero *AISI 12L14* redondo de diámetro $3/4$ in. con la composición química teórica mostrada en la **Tabla 2-8**.

Tabla 2-8: Composición acero 12L14 [70][71].

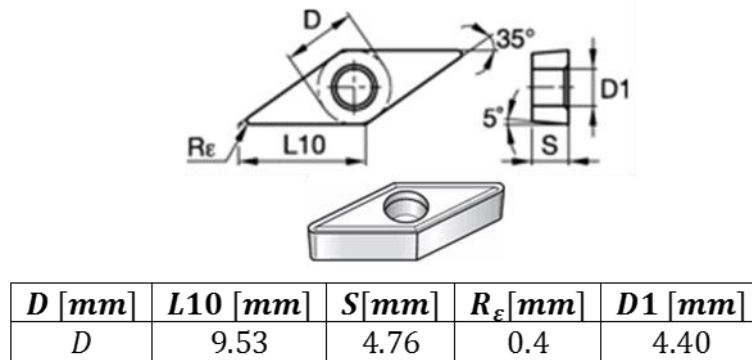
% C	% Mn	% Pb	% P	% S
≤ 0.15	0.85 – 1.15	0.15 – 0.35	0.04 – 0.09	0.26 – 0.35

2.2.2 Herramienta y Porta-inserto

Inserto KENNAMETAL VBGT160404LF - KC5025 **Figura 2-22**. Recubrimiento PVD (Physical Vapor Deposition), TiAlN con sustrato no aleado, resistente de grano ultra fino, para mecanizado en aceros al carbono, aceros inoxidables, aleaciones termo-resistentes,

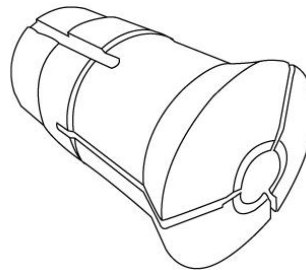
aleaciones de titanio, fundición de hierro, materiales no ferrosos. Porta-inserto KENNAMETAL SVJBL1616H11 $\kappa r=93^\circ$.

Figura 2-22: Característica del inserto utilizado [72].



Pull-Type Collet HE HENG ENTERPRISE LIMITED (**Figura 2-23**). Diámetro Interno $3/4$ in. DIN 6341. Runout a 50mm de Cantiliver– 0.04mm.

Figura 2-23: Esquema Pull-Type Collet



2.2.3 Procedimiento de Micro-Corte

La probeta se planteó con una geometría cilíndrica de 6.5 mm de largo y diámetro de 0.5mm. Los parámetros guía se presentan en la **Tabla 2-9** para el maquinado de acero 12L14 según Isakov [73]:

Tabla 2-9: Parámetros de Corte Teóricos [73]

Parámetros de Corte Acero 12L14		
Velocidad de Corte $V_{c_{12L14}}$ [sfm]	RPMs n_{12L14} (Calculado)	Avance v_{12L14} [ipr]
1025	199 756	0.015

Debido a la restricción de máquina (7000RPMS Máx.) y con el propósito de manejar bajas RPM, se utilizaron 1500RPM para el proceso como se expone en la **Tabla 2-10**. El anterior parámetro permaneció constante mientras el avance por revolución v_f [mm/rev] y profundidad de corte a_p [mm], se variaron sistemáticamente para llegar a la obtención del micro-pin.

Tabla 2-10: Parámetros de corte experimentales

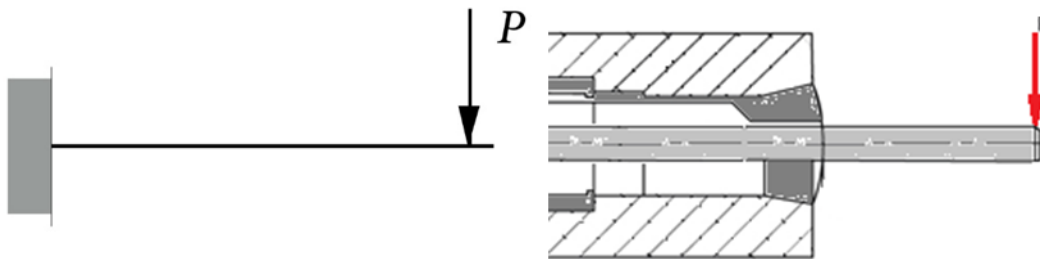
<i>RPM</i>	<i>Avance</i> v_f [mm/rev]	<i>Profundidad</i> a_p [mm]
1500	0.1	1
1500	0.05	0.5
1500	0.03	0.3
1500	0.01	0.1

El mecanizado se realizó bajo un ciclo de desbaste en cilindrado G71. No se utilizó refrigerante en el maquinado.

2.2.4 Modelo Propuesto – Mecánica de Materiales

Se presenta un caso de resistencia de materiales (viga sometida a flexión presentado en la **Figura 2-24**), con el cual se desea hacer una comparación respecto a la curva elástica generada en el proceso de micro-torneado.

Figura 2-24: Esquema comparativo montaje/viga en cantilever [74]



Este modelo presentaría comparativamente la deflexión del micro-pin obteniendo la curva elástica generada de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$v = -\frac{Px^2}{6EI} (3L - x) \quad [74]$$

Teniendo en cuenta el módulo de elasticidad teórico del acero *AISI 12L14*, $E_{12L14} = 190 - 210 \text{ GPa}$ [71][70] y el momento de inercia, $I = \frac{\pi D^4}{64}$, perteneciente de la geometría de la probeta propuesta.

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados Micro-Fresado (Plano y Esférico) / Micro-Taladrado

Los rasgos evaluados para cada uno de los diseños de experimentos se muestran en la **Tabla 3-1**.

Tabla 3-1: Rasgos de investigación evaluados

μ-Taladrado	μ-Fresado plano	μ-Fresado esférico
Cutting edge radius (r)	Cutting edge radius (r)	Surface roughness
Major cutting edge S	Minor cutting edge S'	
	Deviation	
Distance apex to end of clearance roundness (S_α)	Cutting edge radius (r)	Burr height
	Major cutting edge S	
	Deviation	
Distance apex to end of rake roundness (S_γ)	Face A_γ	
	Deviation	
Minimum distance of edge to apex (Δr)	Major first flank $A_{\alpha 1}$	
	Deviation	
Surface roughness	Roughness	
Burr height	Burr height	

La metodología mostrada en el diagrama de la **Figura 2-19**, fue aplicada a todos los conjuntos de datos de rasgos obtenidos. Para el caso de micro-taladrado, se evaluaron los dos Major cutting edge que posee cada micro-herramienta y por medio de un análisis estadístico (t-Student Test), se observó que no hay diferencia significativa entre la variación de los 2 Major cutting edge respectivamente (**Anexo: Prueba de datos**). Por lo anterior se decide utilizar un sólo conjunto de datos de esta característica geométrica para su análisis.

Como ejemplo, se expondrá el procesamiento de información para uno de los conjuntos de datos: el Cutting edge radius (r) Major cutting edge S .

1. Se genera la obtención de los datos referentes como se muestra en la **Tabla 3-2**, para el caso, los del Cutting edge radius (r). La corrida de cada tratamiento es aleatorizada con el fin de satisfacer el principio de independencia [60][75]. Esta aleatorización puede ser realizada por medio de software o tablas de números aleatorios [76].

Tabla 3-2: Tabla inicial de tratamiento de datos.

ENSAYO	VELOCIDAD [RPM]	AVANCE [mm/min]	PROFUNDIDAD [mm]	CODIFICACIÓN			r [μ m]
				x_1	x_2	x_3	
1	1500	4	1	-1	-1	-1	6,289
2	6000	4	1	1	-1	-1	5,654
3	1500	8	1	-1	1	-1	9,4012
4	6000	8	1	1	1	-1	7,2032
5	1500	4	3	-1	-1	1	5,808
6	6000	4	3	1	-1	1	12,5482
7	1500	8	3	-1	1	1	8,5335
8	6000	8	3	1	1	1	6,8409
9	3750	6	2	0	0	0	7,2232
10	3750	6	2	0	0	0	55,8072
11	3750	6	2	0	0	0	28,1665
12	3750	6	2	0	0	0	7,5236
13	1500	6	2	-1	0	0	12,2595
14	6000	6	2	1	0	0	8,7041
15	3750	4	2	0	-1	0	6,6313
16	3750	8	2	0	1	0	6,1948
17	3750	6	1	0	0	-1	1,8536
18	3750	6	3	0	0	1	6,3213

2. Se verifica la normalidad por medio del Shapiro-Wilk Test. El test es desarrollado en el software estadístico libre R-Statistics.

Shapiro-Wilk normality test

W = 0.54356, p-value = 1.961e-06

La interpretación del Shapiro-Wilk Test es la siguiente:

(Hipótesis nula) H_0 = Población distribuida normalmente.

Si el p-valor es menor a α (nivel de significancia) entonces la hipótesis nula es rechazada (se concluye que los datos no vienen de una distribución normal). Si el p-valor es mayor a α , se concluye que no se puede rechazar dicha hipótesis. De acuerdo a lo anterior, se concluye que los datos no poseen de una distribución normal.

- Se realiza el cálculo y aplicación de la Median Absolute Deviation (MAD) con el fin de eliminar valores atípicos ayudando de paso a la normalización de los datos [77]. Al aplicar este procedimiento, los datos resaltados fueron valores atípicos encontrados y retirados del proceso como se muestra en la **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3: Valores con aplicación del Método MAD.

ENSAYO	VELOCIDAD [RPM]	AVANCE [mm/min]	PROFUNDIDAD [mm]	CODIFICACIÓN			
				x_1	x_2	x_3	r [μm]
1	1500	4	1	-1	-1	-1	6,289
2	6000	4	1	1	-1	-1	5,654
3	1500	8	1	-1	1	-1	9,4012
4	6000	8	1	1	1	-1	7,2032
5	1500	4	3	-1	-1	1	5,808
6	6000	4	3	1	-1	1	12,5482
7	1500	8	3	-1	1	1	8,5335
8	6000	8	3	1	1	1	6,8409
9	3750	6	2	0	0	0	7,2232
10	3750	6	2	0	0	0	55,8072
11	3750	6	2	0	0	0	28,1665
12	3750	6	2	0	0	0	7,5236
13	1500	6	2	-1	0	0	12,2595
14	6000	6	2	1	0	0	8,7041
15	3750	4	2	0	-1	0	6,6313
16	3750	8	2	0	1	0	6,1948
17	3750	6	1	0	0	-1	1,8536
18	3750	6	3	0	0	1	6,3213

- Se aplica de nuevo el Shapiro-Wilk Test para la verificación de normalidad de los datos, para el caso tenemos:

Shapiro-Wilk normality test

$W = 0.91097$, $p\text{-value} = 0.1206$

Se concluye que no se puede rechazar la hipótesis inicial (población distribuida normalmente). Si los datos no hubieran sido normales, se tendría que proyectar la ruta propuesta en el diagrama **Figura 2-19**.

- Se ejecuta un análisis de varianza (ANOVA) con factores de primer y segundo orden adicionando las interacciones existentes.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
X1	1	0.180	0.180	0.076	0.7934
X2	1	0.155	0.155	0.066	0.8081
X3	1	9.314	9.314	3.954	0.1035
I (X1^2)	1	20.996	20.996	8.913	0.0306 *
I (X2^2)	1	3.953	3.953	1.678	0.2518
I (X3^2)	1	18.442	18.442	7.829	0.0381 *
X1:X2	1	12.490	12.490	5.302	0.0696 .
X1:X3	1	7.763	7.763	3.295	0.1292
X2:X3	1	7.302	7.302	3.100	0.1386
X1:X2:X3	1	5.899	5.899	2.504	0.1744
Residuals	5	11.779	2.356		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Lo anterior con el fin de obtener las contribuciones porcentuales (**Tabla 3-4**) de cada uno de los factores a un posible modelo lineal e ir visualizando los factores significativos evaluados.

Tabla 3-4: Contribuciones porcentuales por factor.

FACTOR	Sum Sq	PROCENTAJES
x_1	0,18	0,18316323
x_2	0,155	0,15772389
x_3	9,314	9,47767953
x_1^2	20,996	21,3649731
x_2^2	3,953	4,02246802
x_3^2	18,442	18,7660904
x_1x_2	12,49	12,7094929
x_1x_3	7,763	7,89942304
x_2x_3	7,302	7,43032165
$x_1x_2x_3$	5,899	6,00266604
RESIDUALES	11,779	11,9859982
TOTALES	98,273	100

Las contribuciones menores (por lo general menores al factor de significancia α), resaltadas, son excluidas como contribución significativa del modelo.

6. A continuación, se lleva a cabo una regresión lineal con los factores significativos de la contribución porcentual.

```

Residuals:
Min      1Q   Median      3Q      Max
-1.81724 -0.45030  0.00988  0.45800  1.73816

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   6.8735    0.5627   12.216 1.87e-06 ***
X3             0.9651    0.3934    2.453  0.03974 *
I(X1^2)       3.6479    0.7264    5.022  0.00102 **
I(X3^2)      -2.7465    0.7264   -3.781  0.00538 **
X1:X2        -1.2495    0.4398   -2.841  0.02179 *
X3:X1         0.9851    0.4398    2.240  0.05546 .
X3:X2        -0.9554    0.4398   -2.172  0.06161 .
X3:X1:X2     -0.8587    0.4398   -1.952  0.08668 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.244 on 8 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.874,    Adjusted R-squared:  0.7638
F-statistic: 7.928 on 7 and 8 DF, p-value: 0.004538

```

La interpretación abreviada de la regresión anterior es la siguiente: la columna *Estimate* muestra los coeficientes del modelo lineal. El *Residual standard error* es la calidad de ajuste de la regresión lineal. Cantidad promedio que la respuesta se desviará de la línea de regresión verdadera. *Multiple R-squared* y *Adjusted R-squared* dan la medida de qué también se ajusta el modelo a los datos reales. Su valor oscila entre 0 y 1. Valores cercanos a 1 implican que la mayor parte de la variabilidad de la respuesta está explicada por el modelo de regresión. *Adjusted R-squared* es la medida preferida ya que se ajusta al número de variables consideradas (número de términos del modelo). *F-statistic* es un indicador de la existencia de una relación entre el predictor y las variables de respuesta. Cuanto mayor a 1 mejor (para cantidad de número de datos pequeños ($n \leq 30$) [78] [76]) y *p-value* menor a 0.05 indica que el modelo es significativo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que el modelo generado, predice el 76.38% de los datos evaluados con relación al número de variables, siendo significativo por el valor *p-value* obtenido ($0.4538\% < \alpha = 5\%$) y su *F-statistic* (igual a $7.928 > 1$).

El modelo lineal generado (ver Ecuación (3-1)) para el Cutting edge radius (r) Major cutting edge S de las micro-brocas utilizadas en la experimentación es el siguiente:

$$\hat{y} = 6.8735 + 0.9651x_3 + 3.6479x_1^2 - 2.7465x_3^2 - 1.249x_1x_2 + 0.9851x_3x_1 - 0.9554x_3x_2 - 0.8587x_3x_1x_2 \quad (3-1)$$

7. Siguiendo el procedimiento de tratamiento de datos, se efectúa un análisis Lack of Fit para verificar la falta de ajuste del modelo realizado.

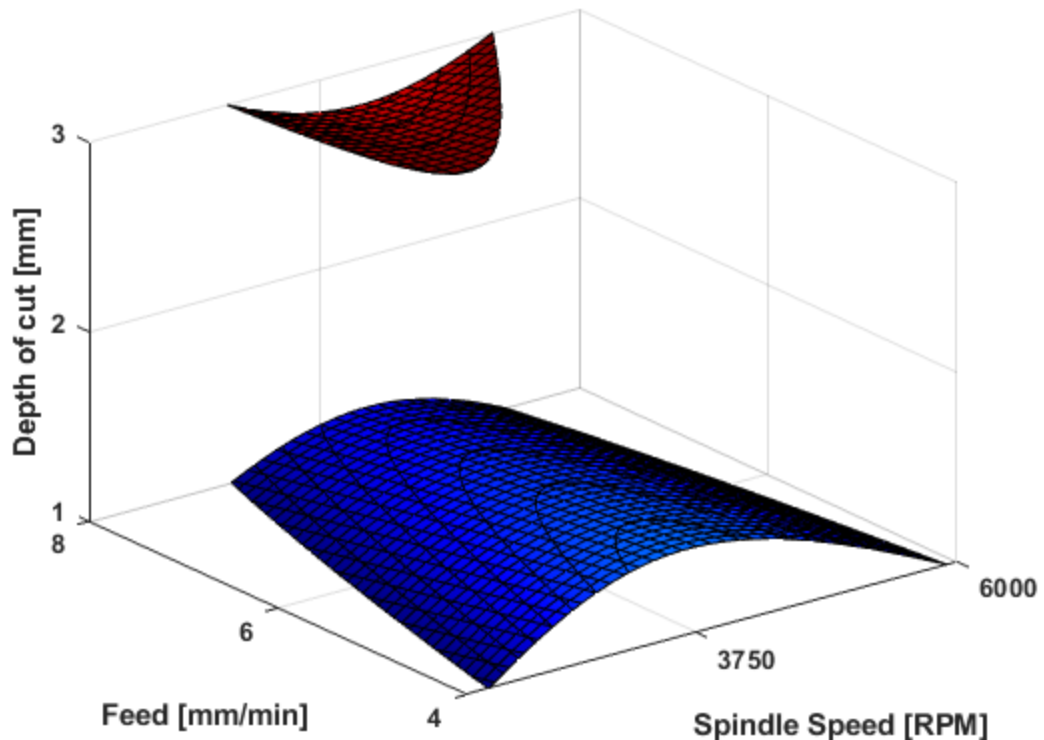
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
X3	1	9.314	9.314	206.43	0.0442	*
I(X1^2)	1	20.996	20.996	465.33	0.0295	*
I(X3^2)	1	22.126	22.126	490.39	0.0287	*
X1:X2	1	12.490	12.490	276.81	0.0382	*
X3:X1	1	7.763	7.763	172.05	0.0484	*
X3:X2	1	7.302	7.302	161.84	0.0499	*
X3:X1:X2	1	5.899	5.899	130.75	0.0555	.
Lack of fit	7	12.337	1.762	39.06	0.1226	
Pure error	1	0.045	0.045			

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Del valor $Pr(>F) = 0.1226 > \alpha = 0.05$ en la fila Lack of fit, se concluye que el modelo no tiene falta de ajuste significativa.

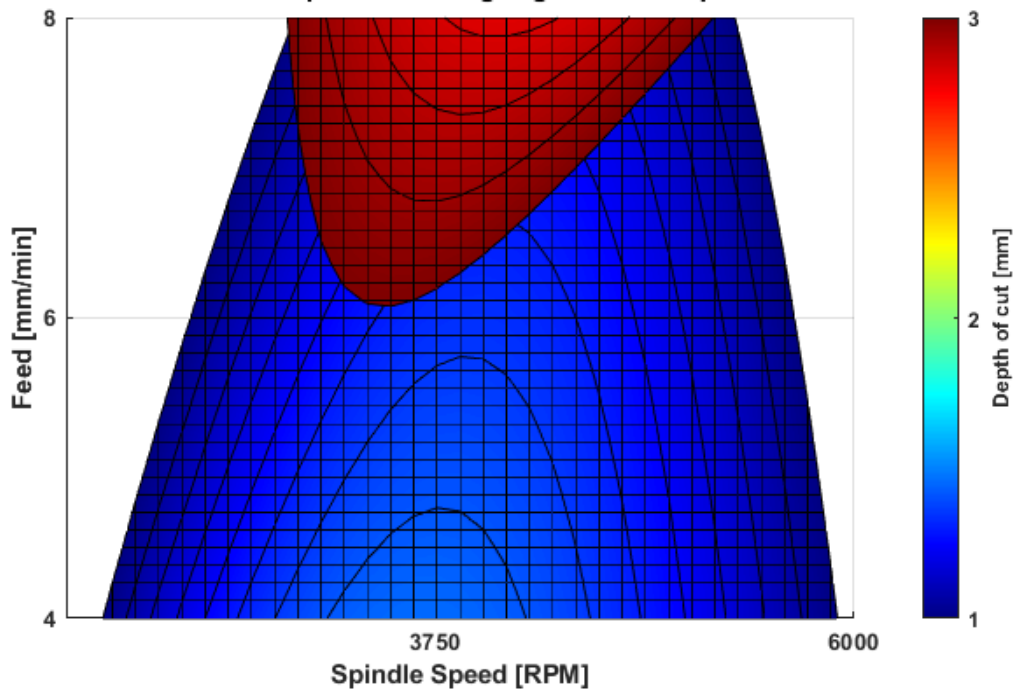
8. Se procede a generar la superficie de respuesta para el modelo matemático desarrollado. Este proceso es realizado en el software Matlab R2021a. Las superficies de respuesta muestran (**Figuras 3-1 y 3-2**), cómo se obtiene un Cutting edge radius (r) con la variación de los parámetros utilizados en la experimentación.

Figura 3-1: Surface Response – Cutting edge radius $r = 5\mu m$



Se puede observar la obtención de cualquier valor estimado de Cutting edge radius r dentro del intervalo de parámetros seleccionado.

Figura 3-2: Surface Response – Cutting edge radius $r = 5\mu m$ (top view)



3.1.1 Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-taladrado

El modelo (ver Ecuación (3-2)) fue el expuesto con anterioridad para el Cutting edge radius (r) Major cutting edge S :

$$\hat{y} = 6.8735 + 0.9651x_3 + 3.6479x_1^2 - 2.7465x_3^2 - 1.249x_1x_2 + 0.9851x_3x_1 - 0.9554x_3x_2 - 0.8587x_3x_1x_2 \quad (3-2)$$

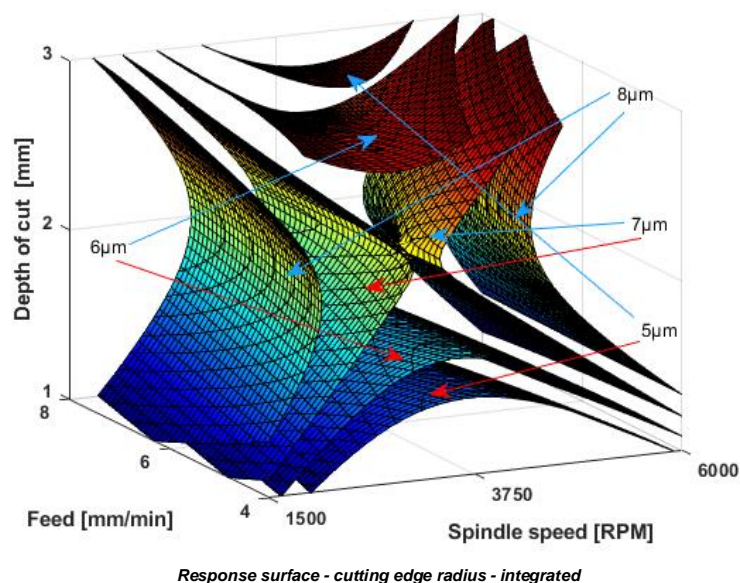
Los parámetros de corte *velocidad de husillo*², *profundidad de corte*² afectan significativamente al Cutting edge radius (r) en el proceso de micro-taladrado de aleación de titanio Ti-6Al-4V respectivamente. Estos parámetros están casi al mismo nivel de significación ($\Pr(> F) = 0.0306 < \alpha = 0.05$ y $\Pr(> F) = 0.0381 < \alpha = 0.05$). Existe una ligera interacción entre los parámetros velocidad de husillo y avance que está alrededor del 7%. Con respecto a la regresión lineal, se obtuvo por medio del refinado un modelo con Adjusted R-squared de 76.38%, esto nos dice que el modelo puede explicar la variación del Cutting edge radius (r) Major cutting edge S en este porcentaje relacionado

también con el número de variables. El lack of fit del modelo fue $(Pr(> F) = 0.1226 > \alpha = 0.05)$ siendo este no significativo.

Comparando los resultados obtenidos para este rasgo geométrico (Cutting edge radius (r) Major cutting edge S), estudios anteriores concluyen que en el proceso de micro-taladrado de aleación de titanio Ti-6Al-4V, el parámetro más significativo sobre el desgaste de la herramienta es la profundidad de corte [79]. Otros estudios para el taladrado a escala meso sobre la misma aleación, muestran resultados en la significación de la velocidad de corte en el proceso teniendo en cuenta el tool-life de herramienta [80][81]. La investigación desarrollada en este trabajo concuerda con el parámetro significativo (profundidad de corte). Muestra también un comportamiento similar a su homólogo referente a la escala meso teniendo en cuenta que la velocidad de husillo (relacionada directamente con la velocidad de corte), es un parámetro significativo del proceso de variación del rasgo evaluado.

La tendencia del compartimiento de la geometría evaluada, muestra (**Figura 3-3**) que a valores centrales de parámetros experimentales utilizados en la investigación, la variación del Cutting edge radius (r) Major cutting edge S aumentaría, aunque no es tan claro este comportamiento. Lo anterior puede ser debido al posible hallazgo de zonas de velocidad para la aparición del fenómeno de filo recrecido (build-up edge BUE), las cuales son variables para algunos materiales sometidos a procesos de corte convencionales [82].

Figura 3-3: RSM - Cutting edge radius (r) Major cutting edge S



El modelo por regresión lineal (ver Ecuación (3-3)) generado para la característica geométrica de investigación Distance apex to end of clearance roundness (S_α) fue:

$$\hat{y} = 11.8155 + 1.2037x_1 + 1.0017x_3 + 4.0006x_1^2 - 5.1827x_3^2 + 0.6584x_1x_2 + 2.4837x_1x_3 + 1.8891x_3x_1x_2 \quad (3-3)$$

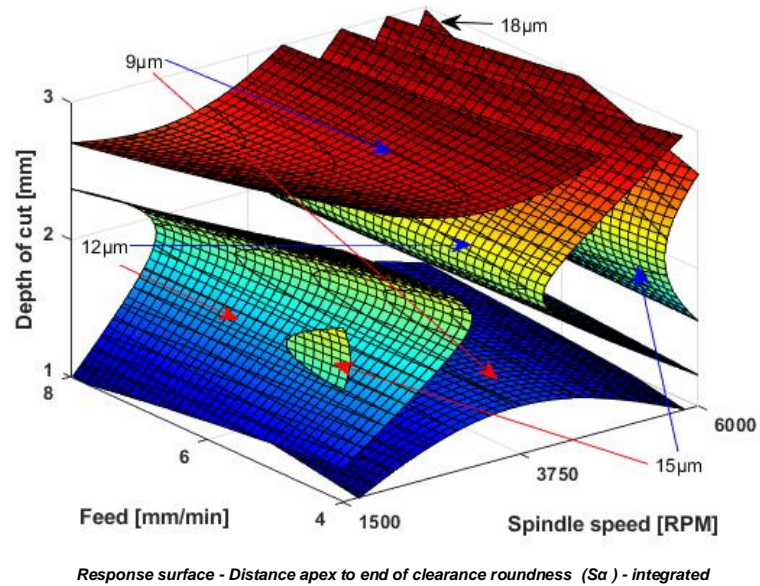
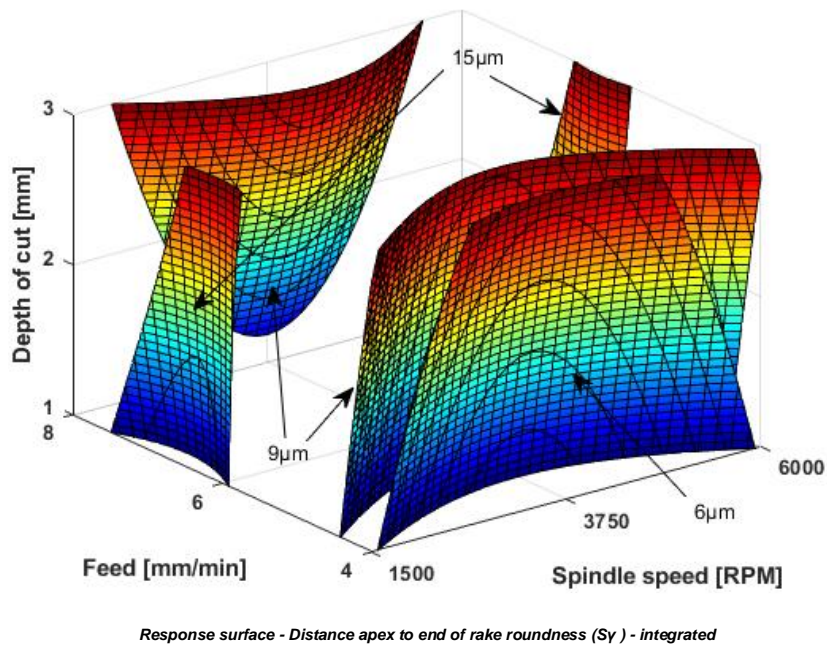
El parámetro de corte *profundidad de corte*² es altamente significativo ($\text{Pr}(> F) = 0.0145 < \alpha = 0.05$) al igual que la interacción entre velocidad de husillo y profundidad de corte ($\text{Pr}(> F) = 0.0297 < \alpha = 0.05$). En menor grado de significación, se encuentra la interacción entre los 3 parámetros evaluados (profundidad de corte, velocidad de husillo y avance) cercana al 7%. Con respecto a la regresión lineal, obtenemos un valor de Adjusted R-squared de 76.67% con falta de ajuste no significativa ($\text{Pr}(> F) = 0.2226 > \alpha = 0.05$). Se muestra en la **Figura 3-4** que la tendencia del comportamiento del (S_α) es que a valores de parámetros de corte experimentales centrales, disminuye su magnitud.

Para el rasgo característico Distance apex to end of rake roundness (S_γ) se obtuvo el siguiente modelo lineal de segundo orden (ver Ecuación (3-4)):

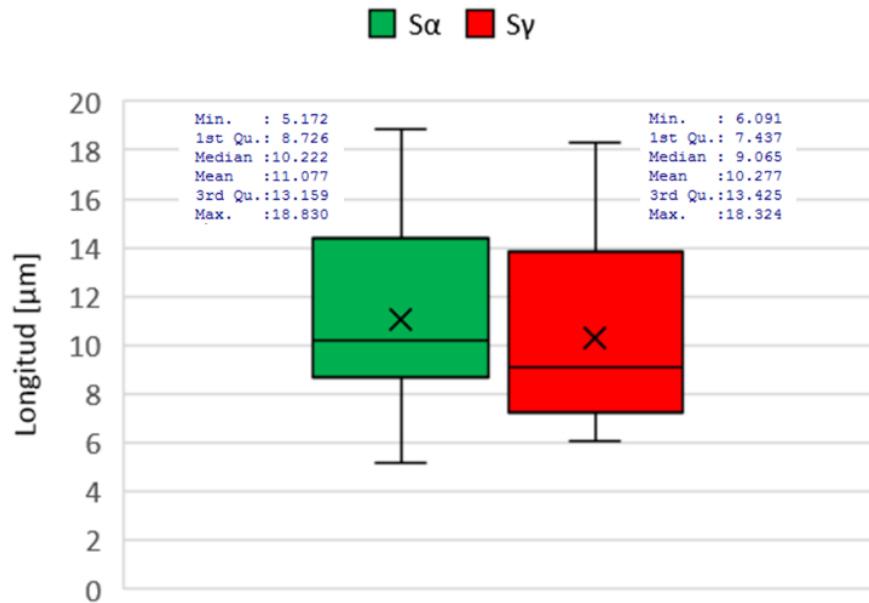
$$\hat{y} = 10.8536 + 2.1451x_2 + 4.3214x_1^2 - 5.2436x_2^2 - 1.5226x_2x_3 \quad (3-4)$$

Los parámetros de corte que influyen más significativamente en la formación de la característica geométrica evaluada son: el *avance*² con ($\text{Pr}(> F) = 0.0293 < \alpha = 0.05$). Relacionado al modelo de regresión lineal segundo orden obtenido, se alcanzó un valor de Adjusted R-squared de 66.72%, con un lack of fit no significativo ($\text{Pr}(> F) = 0.3898 > \alpha = 0.05$). La **Figura 3-5** da a conocer una tendencia inversa al caso del comportamiento (S_α), aumento en magnitud a valores centrales.

De acuerdo al análisis realizado, estos dos rasgos, S_α y S_γ , se ven afectados significativamente por parámetros de corte diferentes. Lo anterior, puede estar relacionado de acuerdo a la caracterización de micro-geometría de filo de herramienta de corte realizada por B. Denkena et al [66], en la cual habla de un comportamiento opuesto relacionado a las cargas termo-mecánicas. Al incrementar el tamaño del filo, S_α conduce temperaturas más altas a las generadas por el aumento de la fricción y el incremento de la deformación plástica, mientras que la influencia de S_γ fue comparativamente baja.

Figura 3-4: RSM - Distance apex to end of clearance roundness (S_α)**Figura 3-5:** RSM - Distance apex to end of rake roundness (S_γ)

Como se observa en la **Figura 3-6**, existe una ligera variación entre S_α y S_γ , siendo mayor S_α en su promedio, corroborando el comportamiento antes descrito a pesar de una mayor variabilidad de datos de S_α respecto a S_γ .

Figura 3-6: Comparación de magnitudes entre los rasgos S_α y S_γ 

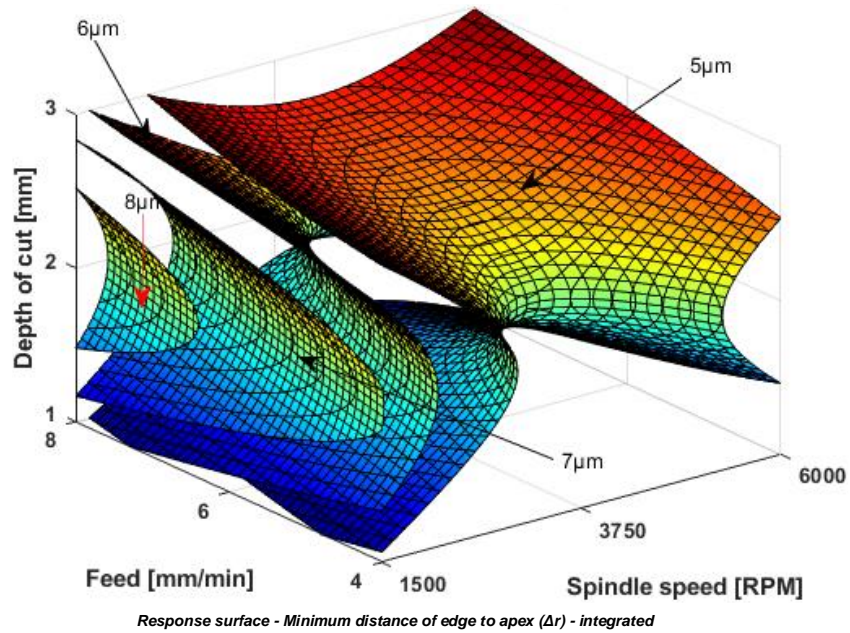
Para la geometría Minimum distance of edge to apex (Δr) se generó el siguiente modelo (ver Ecuación(3-5)):

$$\hat{y} = 5.3977 - 0.6820x_1 + 0.7959x_2 + 1.7635x_1^2 - 2.3567x_3^2 \quad (3-5)$$

Los parámetros de corte significativos encontrados fueron *profundidad de corte*² con ($\text{Pr}(> F) = 0.0117 < \alpha = 0.05$) y en menor grado, el avance (con significación próxima al 7%). Con respecto a la regresión lineal, esta después de su respectiva refinación, obtuvo un valor de Adjusted R-squared de 66.13% con una falta de ajuste (lack of fit), no significativa ($\text{Pr}(> F) = 0.2484 > \alpha = 0.05$).

La tendencia mostrada en la **Figura 3-7** es que al aumento de la velocidad de husillo, disminuye la característica evaluada Δr . Al disminuir el avance, disminuye el rasgo característico Δr . Referente a la profundidad de corte, se observa un comportamiento constante (parabólico), alrededor del valor de parámetro central de 2mm.

Vale la pena recordar que Δr cuantifica la nitidez del filo. Un Δr bajo denota un filo afilado, mientras que un Δr alto significa que el radio se asemeja a un chaflán [83]. Esta geometría tiene relación directa con los rasgos geométricos r y el ángulo β (ángulo de cuña) de la herramienta de corte [84].

Figura 3-7: Minimum distance of edge to apex (Δr)

La regresión lineal obtenida (ver Ecuación (3-6)) para la característica rugosidad superficial fue el siguiente:

$$\hat{y} = 0.92606 - 0.06336x_1 - 0.13309x_3 + 0.04211x_3^2 - 0.04296x_1x_3 + 0.03667x_1x_2x_3 \quad (3-6)$$

Los parámetros de corte velocidad de husillo y profundidad de corte significativamente afectan la rugosidad superficial en el micro-taladrado. Entre estos dos parámetros la profundidad de corte ($\text{Pr}(> F) = 0.00437 < \alpha = 0.05$) es más significativa que la velocidad de husillo ($\text{Pr}(> F) = 0.08961$ cercano a $\alpha = 0.05$) respectivamente. No se encontraron interacciones significativas entre los parámetros de corte. De acuerdo a la refinación del modelo lineal realizado se obtuvo un valor de Adjusted R-squared de 61.96%. El lack of fit encontrado para la anterior refinación fue no significativo ($\text{Pr}(> F) = 0.34328 > \alpha = 0.05$).

Comparando los resultados de la superficie de respuesta generada para la rugosidad superficial, estudios previos concluyen que en el proceso de taladrado de aleaciones de titanio a meso-escala, la rugosidad superficial aumenta gradualmente con el aumento de la velocidad de avance y también con la profundidad de corte [13]. Otros trabajos concluyen que la rugosidad de la superficie aumenta con el aumento de la velocidad del husillo y la velocidad de avance [85]. El desarrollo del estudio a micro-escala coincide con que el

parámetro de profundidad de corte es el más significativo sobre la rugosidad. La velocidad del husillo, como muestra la **Figura 3-8**, influye en el aumento de la rugosidad superficial con su incremento, siendo este parámetro ligeramente significativo.

El modelo por regresión lineal (ver Ecuación (3-7)) para la característica evaluada de altura de rebaba generada a la entrada en el proceso de micro-taladrado fue el siguiente:

$$\hat{y} = 5.0766 - 0.5362x_1 + 1.2372x_3 + 1.4216x_1^2 - 3.3167x_3^2 - 1.0370x_1x_2 + 2.7533x_1x_3 \quad (3-7)$$

En el ANOVA test, la interacción entre la velocidad de husillo y profundidad de corte es significativa a un nivel cercano al 11% (fuera del rango de variable significativa $< \alpha = 0.05$) inicialmente propuesto. Para la evaluación de la regresión lineal, se obtuvo un valor de Adjusted R-squared de 60.02% con una falta de ajuste no significativa ($\text{Pr}(> F) = 0.979 > \alpha = 0.05$). Estudios similares a meso-escala encontraron que la velocidad de avance era estadísticamente significativa en relación con el tamaño de la rebaba de salida, mientras que los términos cuadráticos para la velocidad de avance y la velocidad de corte también resultaron ser significativos al taladrar Ti-6Al-4V [86]. La investigación a micro-escala muestra una leve significancia (cercana al 11%) entre los parámetros de profundidad de corte y velocidad del husillo. El comportamiento de segundo orden descrito en la **Figura 3-9**, es análogo al trabajo mencionado teniendo en cuenta que: se ajusta a una variable de más, se evalúa la altura de la rebaba de entrada y se realizaron perforaciones con centro punteado en el experimento.

Figura 3-8: RSM - Surface roughness

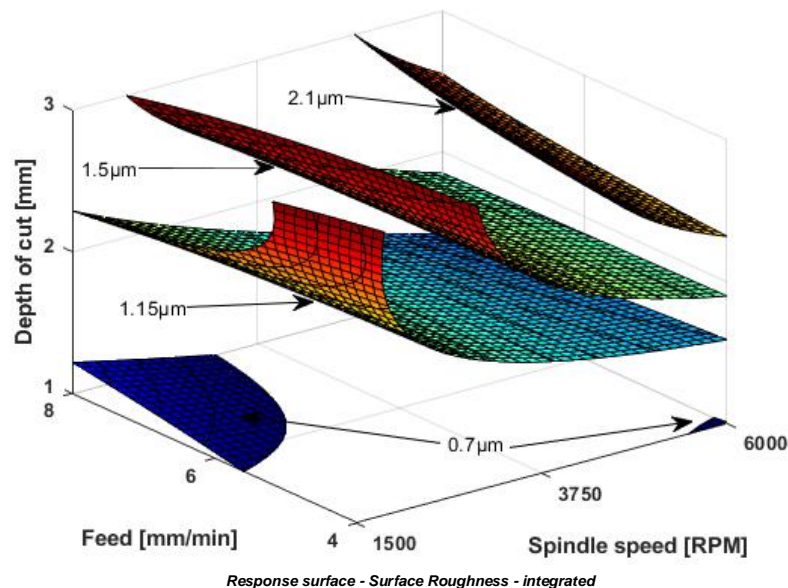
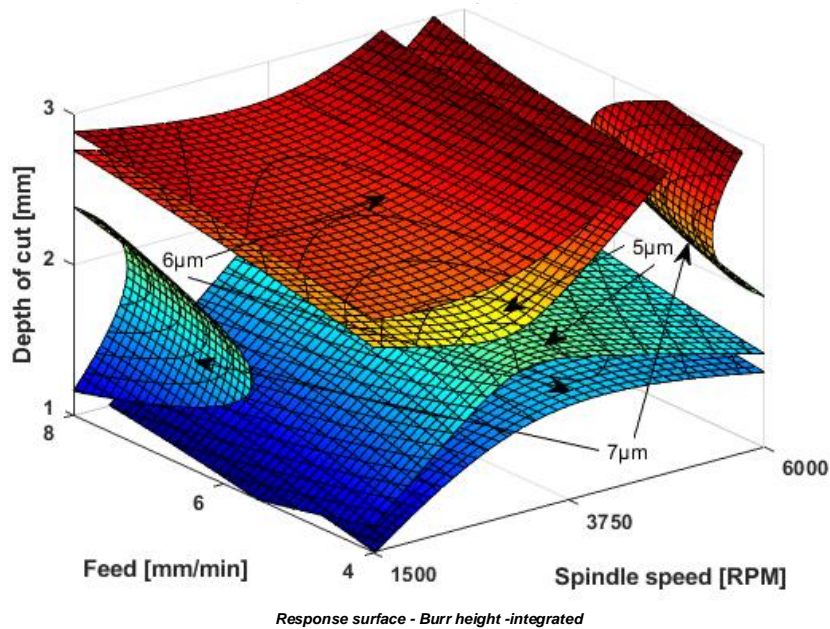
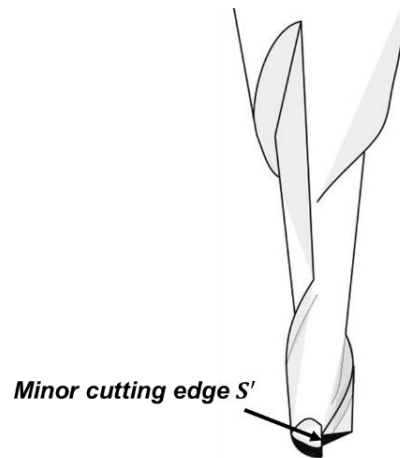


Figura 3-9: RSM - Burr height

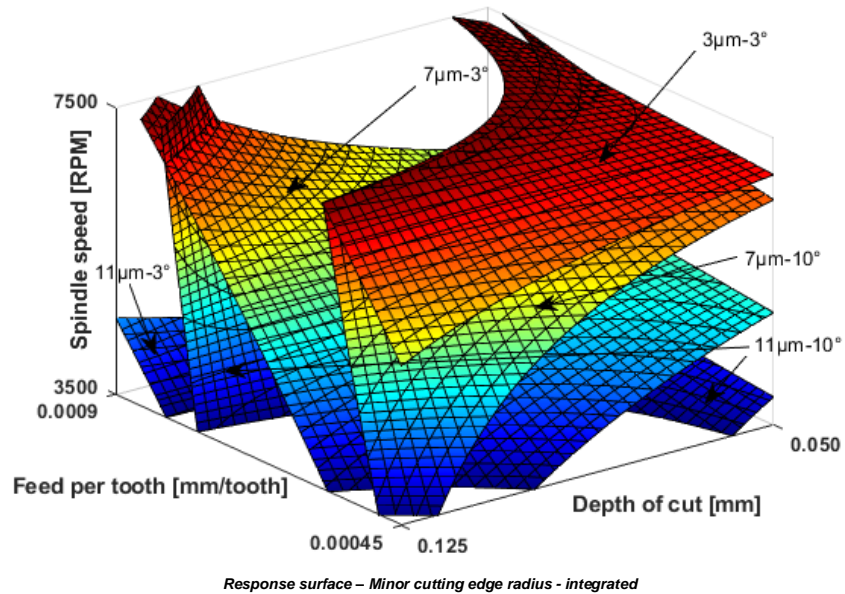
3.1.2 Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-fresado plano

Como se mencionó anteriormente, los diseños de experimentos de micro-fresado plano y micro-fresado esférico fueron realizados con una sola réplica, es decir, son diseños factoriales no replicados, por ende, no se cuenta con ninguna estimación interna del error (o “error puro”). Para abordar este tipo de experimento se apela al principio de efectos esparcidos, el cual cita que la mayoría de los sistemas están dominados por algunos de los efectos principales e interacciones de orden inferior y la mayor parte de las interacciones de orden superior son insignificantes [60]. Se sugiere realizar una gráfica de probabilidad normal de las estimaciones de los efectos pero la tabla de contribución porcentual genera el mismo resultado como se muestra en Montgomery et al [60]. En la regresión lineal (ver Ecuación (3-8)) hecha sobre los datos evaluados del rasgo Cutting edge radius (r) Minor cutting edge S' Deviation (**Figura 3-10**), se alcanza el siguiente modelo:

$$\hat{y} = 7.8438 + 1.2812x_1 + 1.9062x_3 - 2.4375x_4 - 1.4375x_3x_2 + 0.8125x_1x_4 - 1.0937x_4x_2 + 0.1875x_3x_4x_1 \quad (3-8)$$

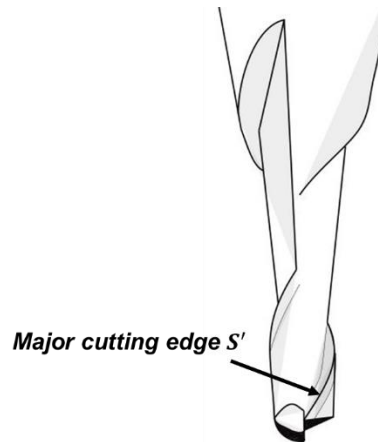
Figura 3-10: Geometría Minor cutting edge S' 

Como muestra la regresión, los parámetros de corte más significativos fueron: Ramping [$^{\circ}$] ($\text{Pr}(> |t|) = 0.000919 < \alpha = 0.05$), avance [mm/diente] ($\text{Pr}(> |t|) = 0.000105 < \alpha = 0.05$), velocidad [RPM] ($\text{Pr}(> |t|) = 2.57 * 10^{-5} < \alpha = 0.05$). En cuestión de interacciones, se tiene que la interacción avance - profundidad de corte es muy significativa (0.0498%) seguida de la interacción entre ramping - velocidad (0.8554%) y la interacción entre profundidad de corte - velocidad (0.2075%). Se obtuvo un valor de Adjusted R-squared de 96.19% para la evaluación del modelo. La **Figura 3-11** muestra una tendencia de la variación de la geometría S' para los dos ángulos de ramping evaluados. El rasgo S' estimado para un ángulo ramping de 3° disminuye al aumentar la velocidad de husillo, disminuir la profundidad de corte y el avance por diente respectivamente. El comportamiento de esta geometría a una entrada ramping de 10° tiene un comportamiento similar a su análogo de 3° con la salvedad de que su aparición a una misma magnitud es algo mayor respecto a valores de los parámetros utilizados.

Figura 3-11: RSM - Cutting edge radius (r) Minor cutting edge S' Deviation

La regresión lineal obtenida (ver Ecuación (3-9)) al evaluar el rasgo geométrico Cutting edge radius (r) Major cutting edge S (Figura 3-12) Deviation en el proceso de microfresado plano fue la siguiente:

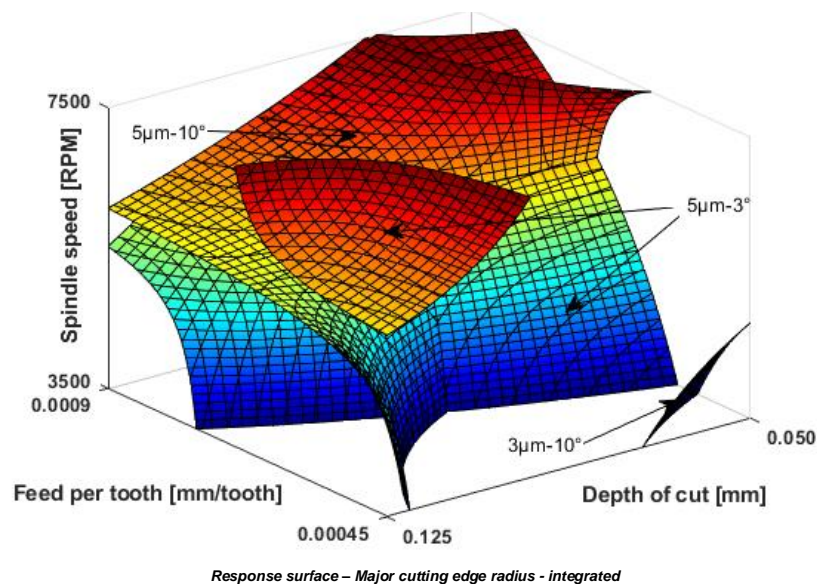
$$\hat{y} = 4.9723 + 0.7848x_3 - 0.2321x_4 - 0.1696x_1x_2 + 0.5804x_3x_2 - 0.7857x_3x_4 + 0.5098x_4x_1x_2 - 0.3027x_3x_4x_1x_2 \quad (3-9)$$

Figura 3-12: Característica Major cutting edge S 

Se observa, en el proceso de regresión refinado que los parámetros de corte significativos en el proceso son: el avance [mm/diente] ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0224 < \alpha = 0.05$) y la interacción entre el avance - velocidad [RPM] ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0193 < \alpha = 0.05$). En menor rango de significación aparecen la interacción entre avance - profundidad de corte (cerca al 7%) y

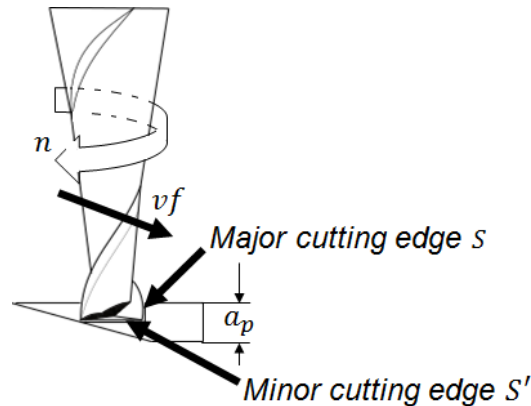
la interacción entre la velocidad - ramping - profundidad de corte (sobre el 8%). Para la evaluación del modelo, se obtuvo un valor de Adjusted R-squared de 76.08%. El comportamiento mostrado por la variación de la característica geométrica (S) se muestra en la **Figura 3-13**. Se observa un comportamiento de naturaleza diferente para los ángulos de ramping 3° y 10° respectivamente. Para el ángulo mayor, el rasgo aumenta en magnitud al aumentar su avance por diente, su velocidad de husillo y su profundidad. En cambio, el menor de los ángulos, influye en el aumento de la magnitud de la característica evaluada al disminuir el avance por diente, aumentar la profundidad y la velocidad de husillo.

Figura 3-13: RSM - Cutting edge radius (r) Major cutting edge S Deviation



La literatura consultada, revela que la variación del rasgo Minor cutting edge S' se debe a que en la generación de rampa en la entrada al material en forma descendente, existe un enganche mayor de este rasgo característico (S') que en el respectivo Major cutting edge S , como se observa en la **Figura 3-14**, aumentando la fuerza en esta parte de la micro-herramienta al inicio del micro-corte y relacionando esto con el desgaste [87]. Lo anterior va en concordancia con el estudio realizado a micro-escala, siendo la variable del ramping significativa en la variación de este rasgo evaluado.

Figura 3-14: Esquema de operación de entrada al material (ramping).



Respecto a la característica evaluada Major cutting edge S , investigaciones estudiadas sobre desgaste de micro-herramienta similares a nuestro estudio, dan como resultado que el avance y la velocidad de corte influyen en el desgaste de la micro-herramienta seguido de la profundidad de corte [88]. El estudio citado, se realizó a velocidades de husillo entre 30000RPM y 100000RPM. Nuestra experimentación concuerda con la investigación anterior en el resultado de la significación del avance y de la respectiva interacción de este parámetro con la velocidad de husillo.

En el análisis de la geometría Face A_γ (**Figura 3-15**) Deviation, la regresión lineal expuso como resultado el siguiente modelo (ver Ecuación (3-10)):

$$\hat{y} = 27.0375 - 6.5500x_2 + 6.5250x_3 + 2.9625x_4 - 3.7000x_4x_2 - 2.9250x_2x_3x_1 + 1.3375x_4x_1x_3 + 0.3875x_3x_4x_2 - 4.5750x_2x_3x_4x_1 \quad (3-10)$$

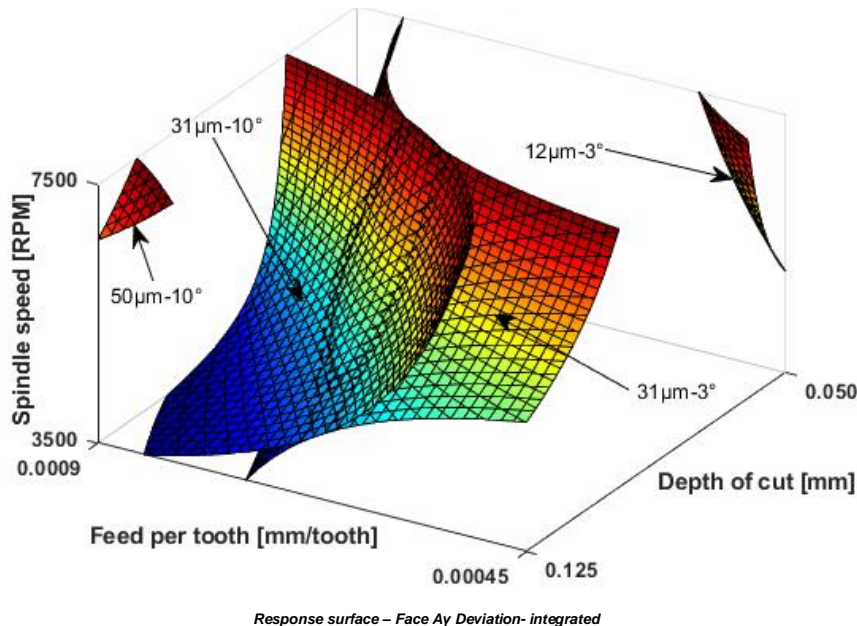
Figura 3-15: Localización rasgo Face A_γ



De acuerdo a la regresión lineal, los parámetros significativos del proceso fueron: profundidad de corte ($\text{Pr}(> |t|) = 0.00859 < \alpha = 0.05$), avance por diente ($\text{Pr}(> |t|) =$

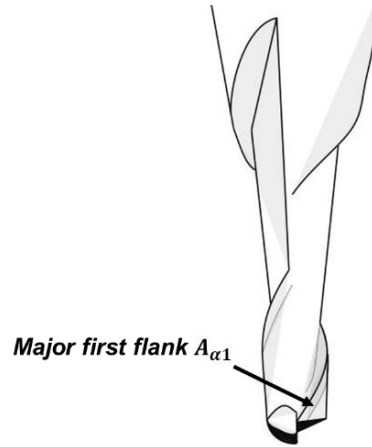
$0.00873 < \alpha = 0.05$). En cuestión de interacciones, se encontró una significativa entre los 4 parámetros de corte evaluados (Ramping, Profundidad de corte, Avance por diente y Velocidad de husillo) ($\Pr(> |t|) = 0.03653 < \alpha = 0.05$) y una con un ligero valor de significación (cercano al 7%) entre los parámetros profundidad de corte - velocidad de husillo. Se logró un valor de 75.49% en el índice de Adjusted R-squared referente a variaciones del modelo. La **Figura 3-16** muestra la tendencia del comportamiento del rasgo Face A_γ en función de los parámetros y ángulos de ramping. Se observa una directriz distinta en cada ángulo ramping experimentado sobre esta característica. Cuando el ángulo de entrada al material es igual a 10° , el rasgo aumenta su desviación en magnitud al aumentar el avance por diente, aumentar la velocidad de husillo y su profundidad. Para el caso de un ramping igual a 3° , aumenta en magnitud el rasgo cuando se incrementa el avance por diente, acrecenta la profundidad de corte y disminuye la velocidad de husillo.

Figura 3-16: RSM - Face A_γ Deviation



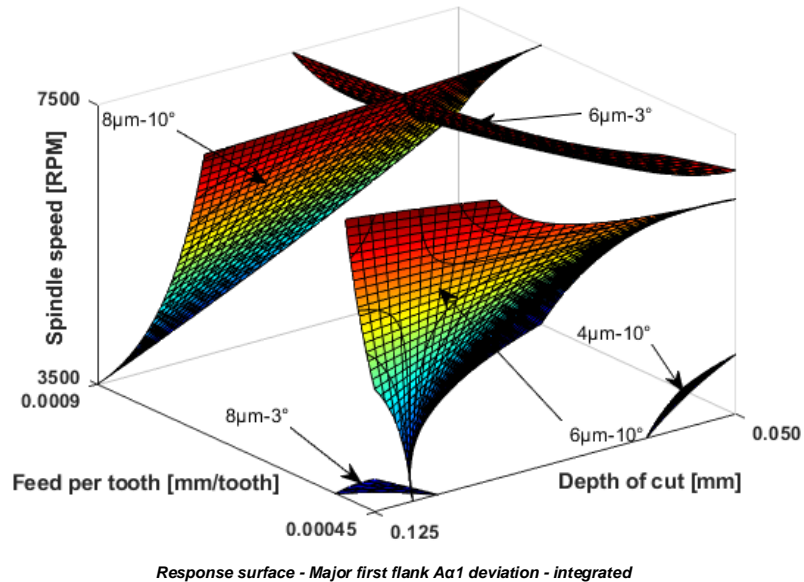
Para el rasgo de investigación Major first flank $A_{\alpha 1}$ (**Figura 3-17**) Deviation, el modelo por regresión lineal refinado logrado (ver Ecuación (3-11)) fue el siguiente:

$$\hat{y} = 6.8950 - 0.4625x_2 + 0.6700x_3 + 0.7325x_3x_1 + 0.7125x_4x_1 + 0.5200x_2x_4x_1 - 0.5675x_4x_2x_3 \quad (3-11)$$

Figura 3-17: Rasgo geométrico Major first flank $A_{\alpha 1}$ 

Según la regresión lineal lograda, los valores significativos en la variación del rasgo de investigación nombrado fueron: avance por diente ($\Pr(> |t|) = 0.0301 < \alpha = 0.05$). Las interacciones encontradas significativas fueron: avance por diente - ramping ($\Pr(> |t|) = 0.0476 < \alpha = 0.05$), ramping - velocidad de husillo ($\Pr(> |t|) = 0.0351 < \alpha = 0.05$). Con ligera significancia se encontró la interacción entre los parámetros de corte profundidad de corte - avance - velocidad de husillo (próxima al 9%). Para la evaluación de la regresión lineal se obtuvo un valor de Adjusted R-squared del 83.04%.

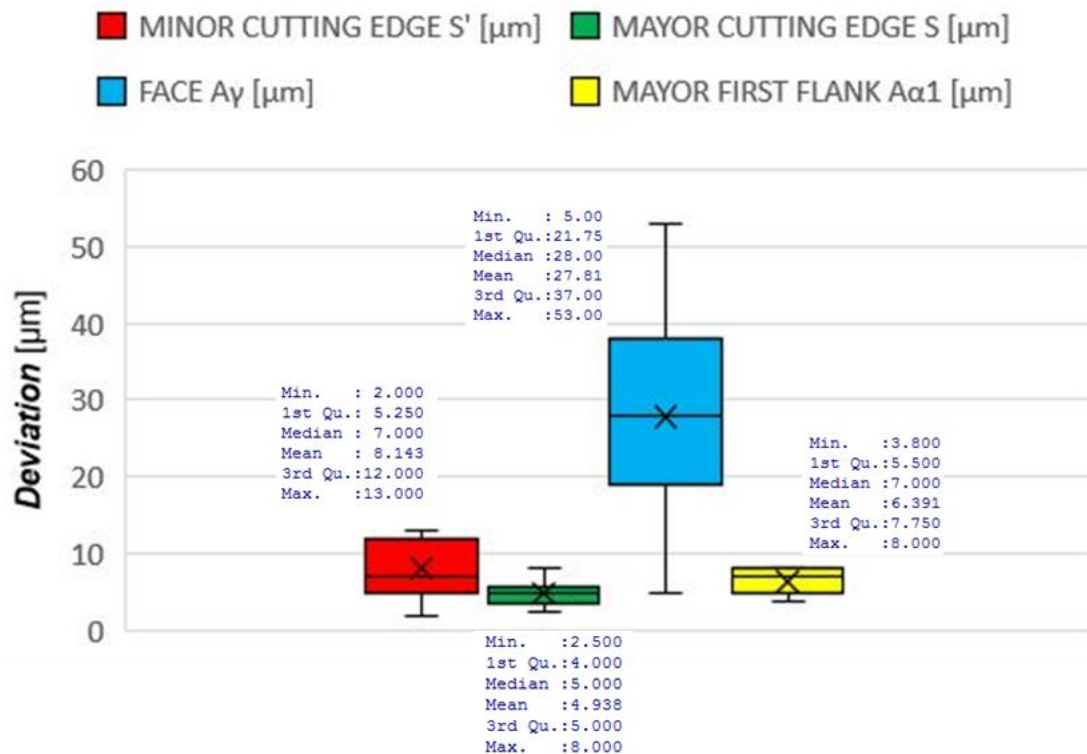
La figura **Figura 3-18** muestra la variación del magnitud de la característica investigada Major first flank $A_{\alpha 1}$. Se observan comportamientos diferentes para los ángulos de ramping evaluados. Para el ángulo de 10° , la gráfica muestra que existe un aumento de $A_{\alpha 1}$, si se incrementan todos los parámetros estudiados. Para el ángulo de entrada en rampa de 3° , aumenta en magnitud la característica geométrica cuando disminuye el avance y su velocidad de husillo, mientras se incrementa la profundidad de corte.

Figura 3-18: RSM - Major first flank $A_{\alpha 1}$ Deviation

Investigaciones realizadas anteriormente sobre desgaste de micro-fresa plana en caras de desprendimiento e incidencia en aleación de titanio grado 2, muestran que en la generación de micro-ranuras, inicialmente existe un mayor desgaste de la cara de desprendimiento (A_{γ}) en comparación con el flanco de incidencia ($A_{\alpha 1}$) [46].

En la **Figura 3-19** se muestran las desviaciones encontradas referente a los rasgos evaluados de micro-herramienta en el micro-fresado plano. Se observa que los valores (A_{γ}) y ($A_{\alpha 1}$) concuerdan con el comportamiento de variación descrito por L. L. Alhadeff et al [46].

Se expone también la diferencia que existe en la variación de los rasgos geométricos evaluados Minor cutting edge S' y Major cutting edge S , siendo mayor el primero probablemente por las causas mencionadas anteriormente referentes a la entrada de la micro-herramienta hacia el material (ramping).

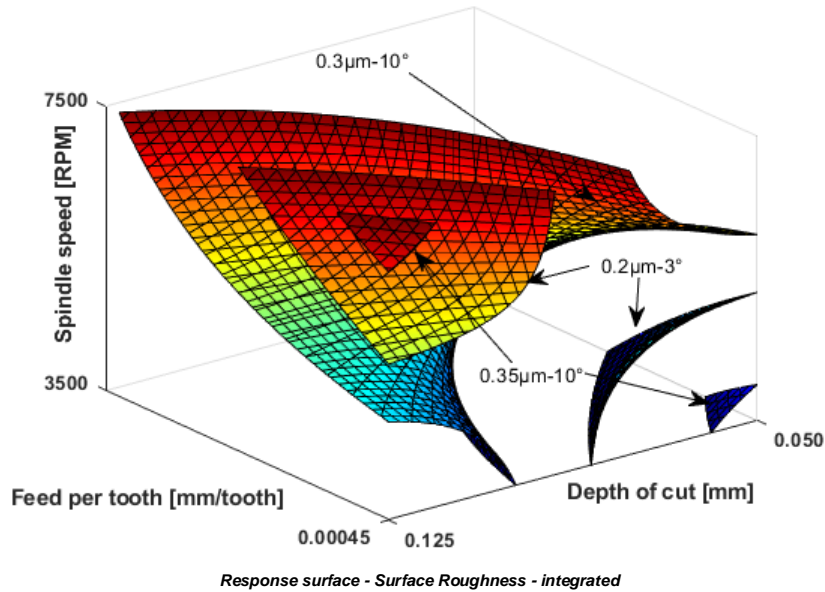
Figura 3-19: Variación de rasgos evaluados en micro-fresado plano.

En el procedimiento de evaluación de los datos obtenidos de la variable geométrica Roughness, se alcanzó por refinamiento el modelo siguiente (ver Ecuación (3-12)):

$$\hat{y} = 0.258550 + 0.021075x_1 - 0.034950x_1x_3 - 0.015950x_1x_2x_4 + 0.010800x_3x_2x_4 + 0.020575x_2x_3x_4x_1 \quad (3-12)$$

Según el refinamiento del modelo, los parámetros influyentes significativamente en el proceso de formación de rugosidad son el ramping ($\Pr(> |t|) = 0.04376 < \alpha = 0.05$). La interacción ramping - avance por diente también tiene una significación importante ($\Pr(> |t|) = 0.00369 < \alpha = 0.05$) al igual que la interacción entre los cuatro parámetros evaluados ($\Pr(> |t|) = 0.04793 < \alpha = 0.05$). Se logró un Adjusted R-squared del 61.54%.

En la **Figura 3-20** se muestra la tendencia del comportamiento de la rugosidad superficial. Para este rasgo, los valores respectivos de ramping se comportan de manera análoga (incrementa su magnitud a medida que se incrementa la profundidad de corte, se disminuye el avance y aumenta la velocidad de husillo) con la salvedad de que a igual magnitud de parámetros se tendrá mayor rugosidad con el ángulo de ramping mayor.

Figura 3-20: RSM - Roughness

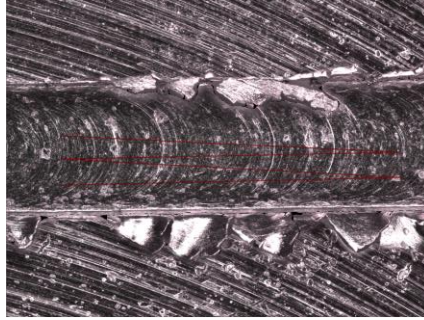
Investigaciones previas de la rugosidad superficial realizadas en el área del micro-fresado plano en aleación Ti-6Al-4V, demuestran que la profundidad de corte no afecta a la rugosidad superficial. Altos valores de velocidad de corte conducen a bajos valores de rugosidad superficial y el incremento de valores de avance conducen a valores altos [89].

El estudio generado muestra una concordancia sobre el estudio anterior teniendo en cuenta que una interacción entre el avance por diente y el parámetro ramping (entrada al material) es el factor más significativo del análisis para este rasgo evaluado.

En el procesamiento de los datos para la realización de la regresión lineal (ver Ecuación (3-13)) de la propiedad geométrica de Burr height (**Figura 3-21**), los resultados refinados generaron el siguiente modelo:

$$\hat{y} = 132.39 - 42.87x_4 + 22.32x_1x_2 - 33.31x_1x_2x_3 + 20.94x_3x_1x_4 - 20.50x_2x_3x_4 + 20.79x_2x_3x_4x_1 \quad (3-13)$$

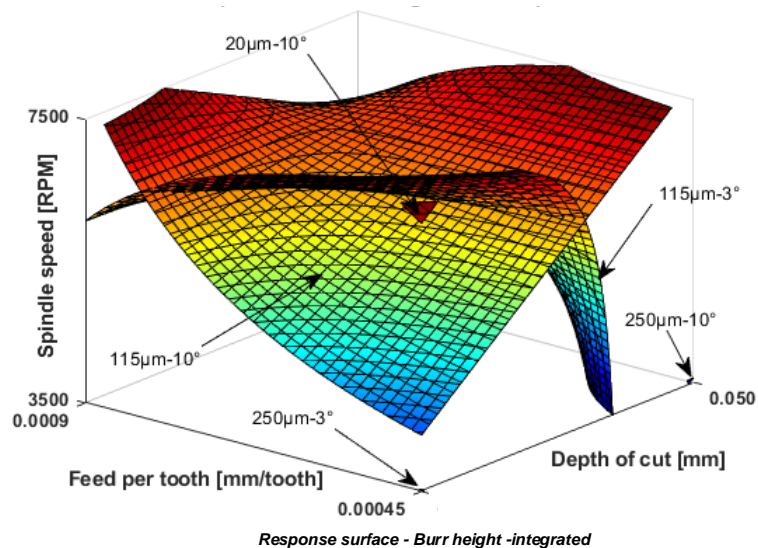
Figura 3-21: Visualización rasgo Burr height micro-fresado plano.



En la generación de la regresión lineal se encontró que los parámetros de corte significativos fueron velocidad [RPM] ($\Pr(> |t|) = 0.00411 < \alpha = 0.05$). En cuestión de interacciones se halló que la triple interacción entre ramping - profundidad de corte - avance tiene una significación importante ($\Pr(> |t|) = 0.01585 < \alpha = 0.05$). Otras interacciones aparecen con ligera influencia en el proceso (entre el 8 al 10%) estas fueron: ramping - profundidad de corte, velocidad de husillo – ramping - avance por diente y la interacción entre todos los parámetros evaluados. El modelo lineal obtuvo un índice de Adjusted R-squared del 67.77%.

El comportamiento de la altura de rebaba y su tendencia, se muestra en la **Figura 3-22**. Este rasgo tiene un comportamiento diferenciado dependiendo del ramping seleccionado. Para un ramping de 3° , su magnitud aumenta a medida que aumenta la profundidad, disminuye el avance por diente y la velocidad de husillo, mientras para un ramping de 10° aumenta su magnitud cuando disminuyen todos los parámetros.

Figura 3-22: RSM - Burr height



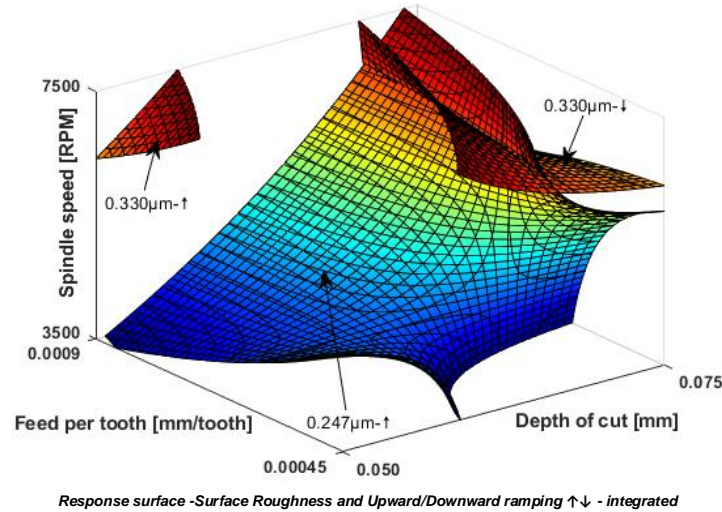
Investigadores enfocados experimentalmente en los parámetros de micro-corte que buscan la influencia en la altura de rebaba en el proceso de micro-fresado plano sobre aleación Ti-6Al-4V, llegaron a la conclusión de que el factor predominante en la variación de altura de este rasgo está determinado principalmente por la velocidad de corte mostrando que entre mayor es la velocidad de corte, menor es la altura de rebaba resultante [90]. La investigación experimental realizada, demostró que el parámetro más significativo fue la velocidad de husillo [RPM] directamente relacionada con la velocidad de corte de acuerdo a la investigación previamente citada.

3.1.3 Análisis de Superficies de Respuesta / Micro-fresado esférico

Para el procesamiento de los datos sobre la característica investigativa de rugosidad en el micro-fresado esférico, fue necesario la realización de transformación por Box-cox (**Anexo: Fundamentación teórica de conceptos estadísticos**), de acuerdo a la ruta del diagrama expuesto en la **Figura 2-19**. El modelo generado (ver Ecuación (3-14)) por regresión lineal fue el siguiente:

$$\hat{y} = 2.09367 - 0.26666x_1 + 0.11738x_2 + 0.12142x_2x_3 + 0.10681x_1x_4 + 0.10907x_2x_4 - 0.11420x_3x_4 - 0.06292x_2x_3x_4 \quad (3-14)$$

El parámetro de corte significativo encontrado en el proceso de formación de la rugosidad fue el Upward/Downward ramping [\uparrow o \downarrow] ($\Pr(> |t|) = 0.0092 < \alpha = 0.05$). Referente al modelo generado, se obtuvo por medio de la refinación un Adjusted R-squared del 68.74%. El comportamiento de la rugosidad superficial se expone en su tendencia en la **Figura 3-23**. Para un upward ramping (\uparrow), se tiene un incremento de la rugosidad al incrementar la velocidad de husillo, avance por diente y disminuyendo su profundidad de corte. Para un downward ramping (\downarrow), para una misma rugosidad (para el ejemplo $R_a=300\mu\text{m}$), se requiere un incremento de profundidad, disminución de avance por diente y una velocidad con tendencia al aumento.

Figura 3-23: RSM - Surface roughness

Exploraciones anteriores desarrolladas relacionadas al micro-fresado esférico en aleación de titanio Ti-6Al-4V, señalan que el avance por diente y la profundidad de corte influyen significativamente en la rugosidad superficial siendo estas dos variables de naturaleza opuesta. La velocidad de corte es menos significativa que los dos parámetros anteriores mencionados [91]. La experimentación expuso como resultado la influencia significativa del parámetro Upward/Downward ramping [\uparrow o \downarrow] con respecto a la rugosidad, seguido de la profundidad de corte con significación del 13% (no significativa comparado con $\alpha = 5\%$). Vale la pena señalar que los trabajos consultados tienen el parámetro de ramping constante (downward o upward ramping).

Finalmente, con la evaluación de los datos experimentales obtenidos de la característica geométrica Burr Height en el proceso de micro-fresado esférico, se logró el siguiente modelo (ver Ecuación (3-15)):

$$\hat{y} = 16.3878 - 1.5359x_4 - 2.0129x_1x_2 - 1.9824x_2x_3 + 1.6719x_2x_4 + 1.8683x_3x_4 - 1.5476x_1x_3x_2 - 0.5174x_1x_3x_4 \quad (3-15)$$

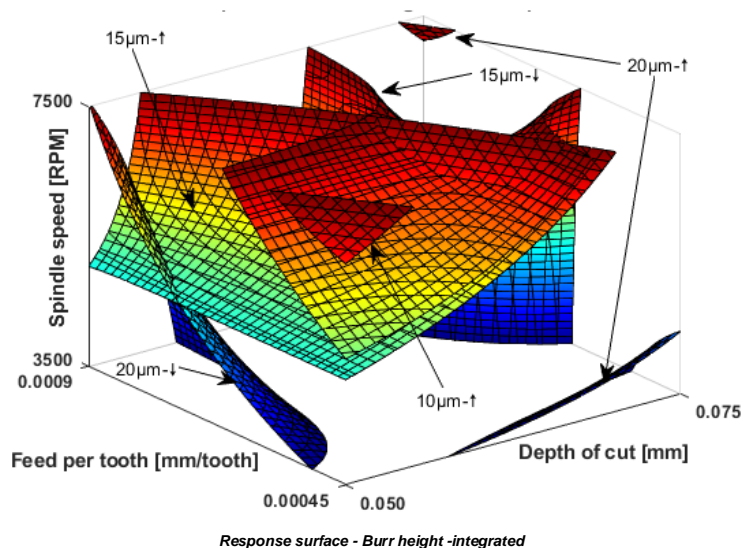
En esta generación del modelo lineal se descubrió que el parámetro de corte velocidad de husillo [RPM] tiene una significación importante ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0353 < \alpha = 0.05$) en la altura de rebaba del proceso. Relacionado con las interacciones, se encuentran con alta significación Upward/Downward ramping - profundidad de corte ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0121 < \alpha = 0.05$), avance por diente - profundidad de corte ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0216 < \alpha = 0.05$), velocidad de husillo - profundidad de corte ($\text{Pr}(> |t|) = 0.0408 < \alpha = 0.05$) y avance por diente -

velocidad de husillo ($\Pr(> |t|) = 0.0272 < \alpha = 0.05$). Muy cercana al 5% se encuentra la interacción entre los parámetros Upward/Downward ramping - profundidad de corte - avance por diente. Referente al modelo refinado, se obtuvo un valor de Adjusted R-squared del 75.73%.

Investigaciones relacionadas exponen que el downward ramping tiene una rebaba más grande en comparación con el upward ramping. La profundidad de corte axial afecta el tamaño de la rebaba de manera más significativa en comparación con la velocidad de avance y de husillo [92]. Otros estudios convergen en que muy probablemente la rebaba ocurriría con una velocidad de corte inadecuada junto con un borde de corte desafilado [93]. La experimentación propia demuestra niveles de significancia para el parámetro de corte velocidad de husillo en la variación de la altura de rebaba la cual es concordante con exploraciones experimentales adelantadas.

El comportamiento/tendencia de la altura de rebaba para el micro-fresado esférico se expone en la **Figura 3-24**. Para un micro-fresado upward ramping, disminuye su magnitud cuando disminuye la profundidad de corte, el avance por diente y se incrementen las RPM. Para un downward ramping (\downarrow), se tiene que aumenta en magnitud cuando disminuye la profundidad de corte.

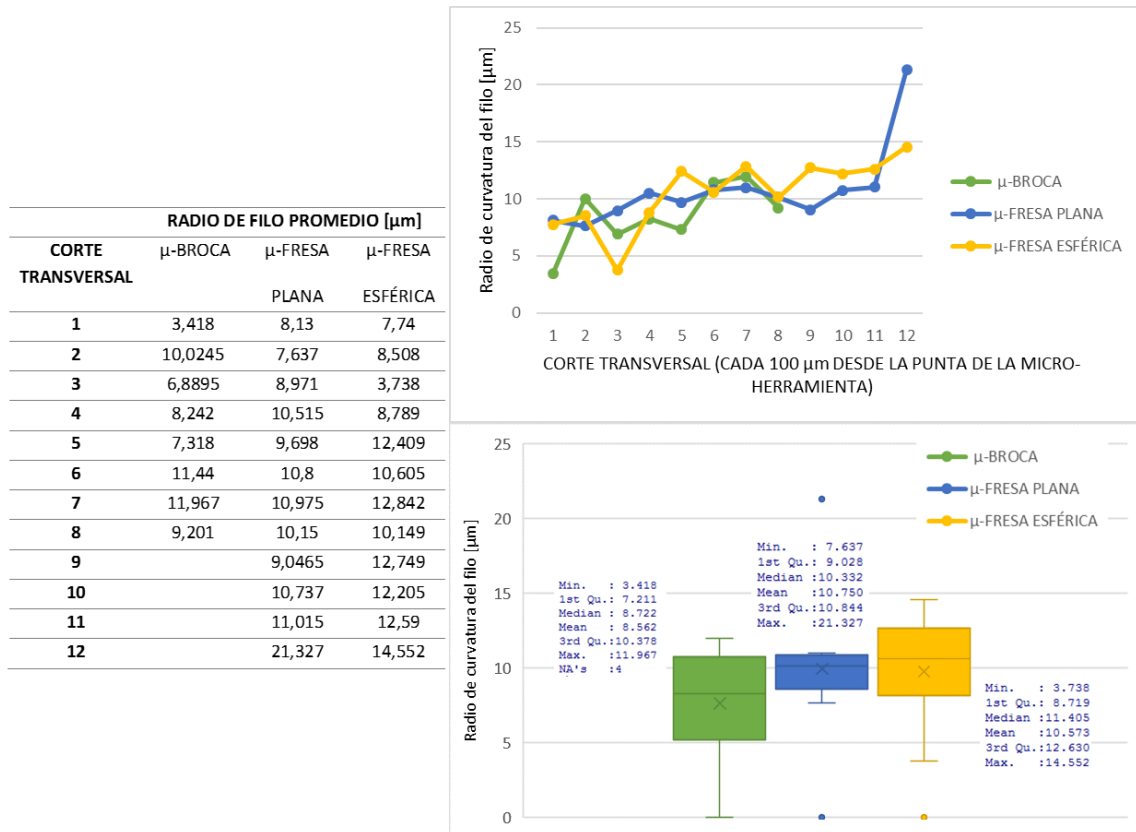
Figura 3-24: RSM - Burr height



3.1.4 Análisis de Radios de curvatura de filo de micro-herramientas

Los cortes transversales de las micro-herramientas para la evaluación de los radios de curvatura del filo en función de la longitud, generó los datos mostrados en la **Figura 3-25**.

Figura 3-25: Variación radio de curvatura de filo en micro-herramientas



Teóricamente, sería posible la realización de micro-fresado dinámico con este tipo de micro-herramienta. El fresado dinámico (Dynamic milling), utiliza la longitud de los filos de las herramientas de corte. Maneja una serie de algoritmos para analizar el proceso de corte de la herramienta y eliminación de material. Ajusta el corte de acuerdo con el movimiento de la herramienta en el proceso, con tasas estables de remoción de material para un corte rápido y suave [94]. Esta clase de fresado, sugiere parámetros de corte en porcentaje del diámetro de la herramienta (ancho de corte) entre 8% a 40% (mejor entre 20% a 30% dependiendo este del material a mecanizar), con profundidades entre el 150% a 350% referente al diámetro de la herramienta [95].

Tenido en cuenta una profundidad de corte a_p limitada para la micro-herramienta de caso de estudio, ($700\mu m$ en relación a los valores obtenidos de Cutting edge radius (r) Minor cutting edge S' , con un máximo de hasta $13\mu m$) y posibles profundidades radiales (ancho de corte a_e), mayores al 3% para evitar el fenómeno de aplastamiento ($r > a_e$), la realización de esta clase de fresado a escala micro sería posible.

3.1.5 Análisis de Esfuerzos Residuales y Térmicos

Los resultados obtenidos en cuestión de temperaturas máximas promedio fueron de $33^\circ C$ a $29^\circ C$ ($\pm 2^\circ C$) para el proceso de micro-corte. Este resultado es coherente con A. J. Mian [51], el cual señala, sobre estudios de la formación de viruta que debido a las pequeñas cargas de este residuo, la temperatura de la zona de corte a micro-escala es menor en comparación con el corte convencional. La rugosidad de la probeta generada fue de $Ra = 0.438 \mu m$, rugosidad muy cercana a la calculada para esos parámetros con anticipación.

El desarrollo de esfuerzos internos es asociado principalmente con la distribución no uniforme de deformación (incluyendo micro-deformaciones) en todo el volumen de un cuerpo. Son frecuentemente desarrollados en rápidos calentamientos o enfriamientos del material, los cuales conducen a una expansión (o contracción) no uniforme de la superficie y de sus capas internas. Los esfuerzos también pueden ser desarrollados durante el enfriamiento (solidificación) del metal, tras la deformación no uniforme o en tratamientos térmicos como resultado de transformaciones estructurales no uniformes. Estos se denominan tensiones de fase o estructurales. Los esfuerzos internos también pueden ser clasificados sobre otra base (propuesta por N. N. Davidenkov [96]).

Esfuerzos clase *I* (esfuerzos zonales), son contrabalanceados dentro del volumen del cuerpo entero y son llamados macro-esfuerzos. Estos se desarrollan como resultado de las operaciones de procesamiento a las que se somete una pieza en la fabricación [97].

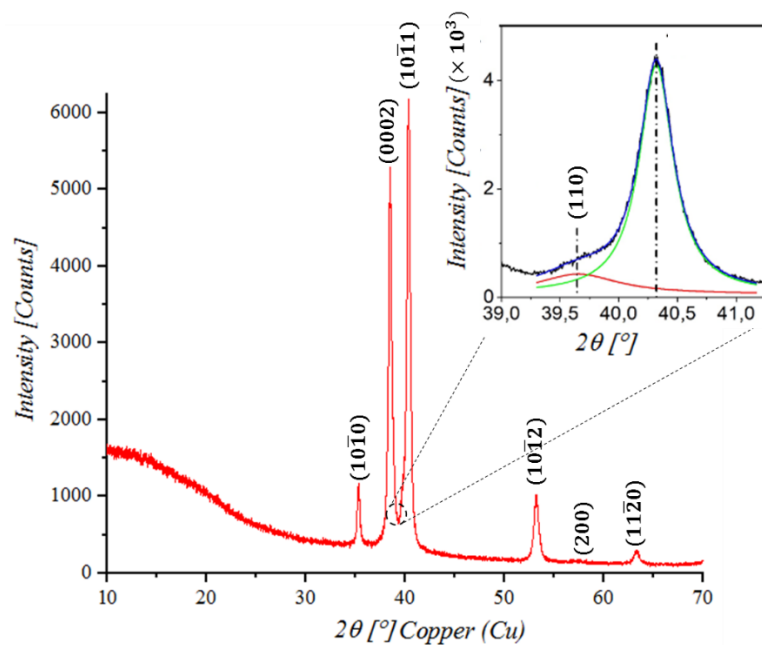
Esfuerzos clase *II*, son contrabalanceados dentro del volumen de un simple grano (cristalita) o varios bloques mosaico (subgranos), también llamados micro-esfuerzos, son usualmente desarrollados en transformaciones de fase y deformaciones del metal, cuando varias cristalitas y los bloques dentro de ellas, están en diferentes estados de esfuerzo elástico [97].

Esfuerzos clase *III*, están localizados dentro de los volúmenes de una red cristalina, son distorsiones estáticas de una red [97].

Las diferentes clases de esfuerzos están interrelacionadas. Un incremento de micro-esfuerzo de clase *III*, puede conducir al desarrollo de esfuerzos de clase *I*.

El esfuerzo clase *II* evaluado para nuestra muestra experimental, fue determinado por la técnica de rayos X. Se obtuvo por este modo, el difractograma de la **Figura 3-26**. En este, se identificaron los índices de Miller correspondientes a los planos cristalográficos de la aleación utilizada en la experimentación (aleación de titanio Ti-6Al-4V), con software/base de datos HighScore Plus verificada con tablas de distancias, intensidades y ángulos de reflexión entre planos para titanio [98].

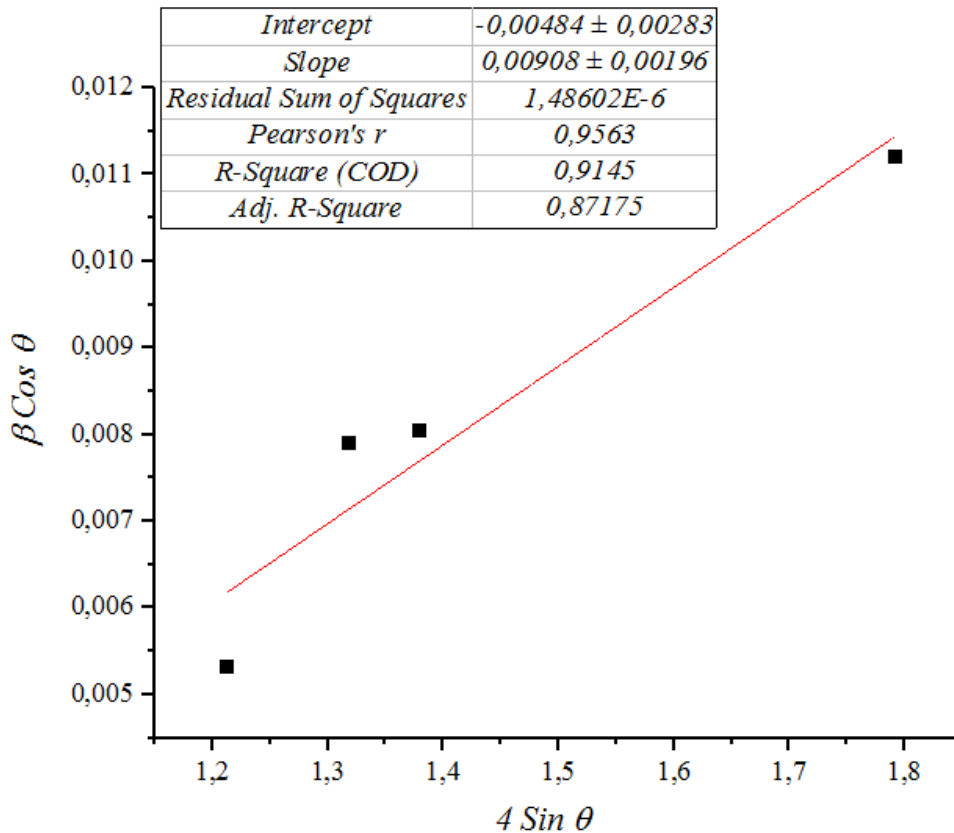
Figura 3-26: Difractograma



El método de Williamson-Hall, generalmente es aplicado para cálculo del tamaño medio de cristalita y micro-deformación intrínseca que se genera en las nano-partículas y películas delgadas [99]. Este análisis se basa en el modelo de deformación uniforme (UDM), donde se supone que la deformación es uniforme en todas las direcciones cristalográficas. Por lo tanto, se considera la naturaleza isotrópica del cristal, donde las propiedades del material son independientes de la dirección en la que se miden. Estudios relacionados aplican el método citado a láminas de materiales ferrosos y no ferrosos [100][101]. Investigaciones en la caracterización micro-estructural post-irradiada de Ti-6Al-4V sobre láminas recocidas, han obtenido resultados en tamaños de cristalita entre 237Å a 631Å [102]. Exploraciones sobre el mecanismo de formación y caracterización de aleación nano-estructurada Ti6Al4V preparada por aleación mecánica, muestran valores

de tamaño de cristalita de 20 nm y deformación $\varepsilon = 0.76\%$ [103]. Aplicando el método de Williamson-Hall (**Figura 3-27**), se obtuvo una deformación $\varepsilon = 9.08(\times 10^{-3})$ o (0.908%) y tamaño de cristalita de 286.47\AA (28.647 nm). Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad (E_{hkl}) para la aleación de titanio Ti-6Al-4V teórico/calculado dependiendo del plano cristalográfico seleccionado está entre los valores de 78-106GPa [104][105], es posible obtener un valor de esfuerzo residual. Gráficas de estudios en micro-deformación y micro-esfuerzo [106], sitúan lo obtenido en la experimentación, entre 708 MPa a 954MPa.

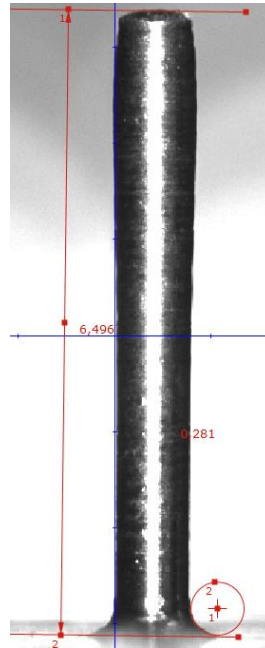
Figura 3-27: Gráfico Williamson-Hall



3.2 Resultados Micro-Torneado

3.2.1 Fabricación del micro-pin

Se obtuvo un micro-pin con las características longitudinales mostradas en la **Figura 3-28**. Los rasgos geométricos fueron medidos en el equipo Zoller Smile 400.

Figura 3-28: Micro-pin (medidas en mm).

Se realizó un barrido de medidas sobre el diámetro del pin desde su base hasta su parte final, cada 0.325mm, obteniendo 20 medidas. La toma se repitió 3 veces en cada uno de los puntos como se muestra en la **Tabla 3-5**.

Tabla 3-5: Medidas diámetros

<i>NOMINAL</i>	<i>REAL</i>	<i>DIÁMETROS</i>			<i>PROM</i>
		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	
0,325	0,326	0,781	0,771	0,77	0,774
0,65	0,625	0,751	0,751	0,751	0,751
0,975	0,977	0,761	0,751	0,751	0,7543
1,3	1,303	0,76	0,76	0,751	0,757
1,625	1,629	0,761	0,751	0,751	0,7543
1,95	1,955	0,77	0,76	0,77	0,7666
2,275	2,277	0,77	0,769	0,769	0,7693
2,6	2,6	0,76	0,77	0,77	0,7666
2,925	2,926	0,78	0,771	0,77	0,7736
3,25	3,252	0,77	0,77	0,77	0,77
3,575	3,578	0,79	0,79	0,79	0,79
3,9	3,903	0,81	0,8	0,81	0,8066
4,225	4,229	0,83	0,82	0,82	0,8233
4,55	4,555	0,835	0,835	0,835	0,835
4,875	4,871	0,862	0,862	0,869	0,8643
5,2	5,206	0,879	0,869	0,869	0,8723
5,525	5,522	0,889	0,879	0,879	0,8823
5,85	5,848	0,835	0,835	0,854	0,8413
6,175	6,174	0,8	0,81	0,79	0,8
6,5	6,496	0,494	0,479	0,45	0,4743

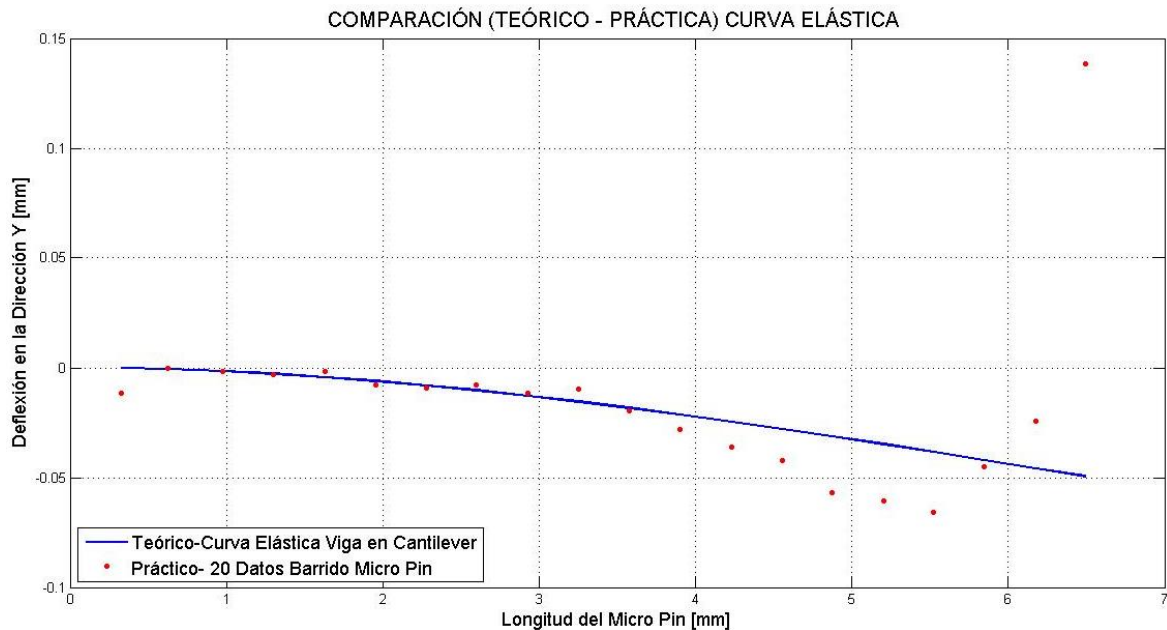
En la comparación con el modelo de viga sometida a flexión, se calculó una medida de dispersión con el error absoluto encontrado entre los datos teóricos y reales (**Tabla 3-6**).

Tabla 3-6: Cálculo del error absoluto

MEDIDA TEÓRICA	MEDIDA REAL PROM	ERROR ABSOLUTO
-0,0002	-0,0115	0,0113
-0,0007	0	0,0007
-0,0016	-0,0016	0
-0,0028	-0,003	0,0002
-0,0043	-0,0016	0,0026
-0,006	-0,0078	0,0018
-0,008	-0,0091	0,0011
-0,0103	-0,0078	0,0024
-0,0128	-0,0113	0,0014
-0,0155	-0,0095	0,006
-0,0184	-0,0195	0,0011
-0,0214	-0,0278	0,0064
-0,0246	-0,0361	0,0115
-0,0279	-0,042	0,0141
-0,0313	-0,0566	0,0253
-0,0349	-0,0606	0,0257
-0,0384	-0,0656	0,0272
-0,0421	-0,0451	0,0030
-0,0458	-0,0245	0,0213
-0,0494	0,13833	0,1877

Desviación Estándar del Error Absoluto $\sigma = 0.0411$.

Figura 3-29: Gráfica comparativa teórico-práctica de la experimentación.



La **Figura 3-29** muestra la ubicación de los puntos tomados en el equipo Zoller comparados con la respectiva curva elástica teórica de una viga en cantilever.

3.2.2 Discusión de resultados

Para la generación del micro-pin, se realizó la variación de los parámetros descritos en la **Tabla 2-10**. De dichos parámetros, los únicos funcionales para la obtención fueron *velocidad de Husillo* = 1500RPM, *avance* $vf = 0.01 \frac{mm}{rev}$ y *profundidad*, $a_p = 0.1mm$. La relación de esbeltez de la pieza a mecanizar (relación 1:13) y la fuerza de mecanizado, hacen que el menor valor utilizado para esta última sea eficaz en la obtención del dispositivo. Lo anterior concuerda con Masuzawa et al [27] quien afirmó en su investigación que el principal inconveniente del micro-torneado es que la fuerza de mecanizado influye en la precisión y también limita el tamaño del componente producido. Lim et al [107] estableció que la pieza de trabajo de relación de aspecto bajo, vibraría en la dirección tangencial. Se observa una variación en el diámetro de la probeta solicitada (0.1255mm mínima con respecto al desplazamiento radial de la herramienta de corte). Dicha diferencia no es constante a lo largo del pin, siendo más notable en su parte final como lo demuestran los valores de la **Tabla 3-5**.

En el proceso de micro-torneado, se realizaron pasadas de profundidades $a_p = 0.1mm$, es decir que se generaron 190 pasadas antes de llegar al diámetro de probeta mencionado. Cabe señalar que el desgaste de la herramienta no se tuvo en cuenta en el proceso de obtención de la pieza. Un factor a incidir en el proceso de maquinado, es la generación de ajuste manual en el montaje del Pull-Type Collet. El ajuste es logrado dependiendo de la pericia del operario en turno, debido a que se da cierta libertad de deslizamiento de la barra en el corte [108]. Se observa en la gráfica, que 12 de los 20 puntos analizados están sobre la curva elástica calculada. Los valores más alejados encontrados, a partir de la longitud 4.5 a 6.5 mm del pin, son los de mayor variación respecto a la curva teórica.

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

El desarrollo de una metodología estadística estructurada de datos experimentales sobre características de micro-herramienta (Cutting edge radius (r), Major cutting edge (S), Minor cutting edge (S'), Distance apex to end of clearance roundness (S_α), Distance apex to end of rake roundness (S_γ), Minimum distance of edge to apex (Δr), Face (A_γ) y Major first flank ($A_{\alpha 1}$)), la rugosidad de la superficie y la altura de la rebaba obtenida para el micro-fresado plano/esférico y micro-taladrado puede estimar algunas claves de los parámetros de corte para el proceso de fabricación.

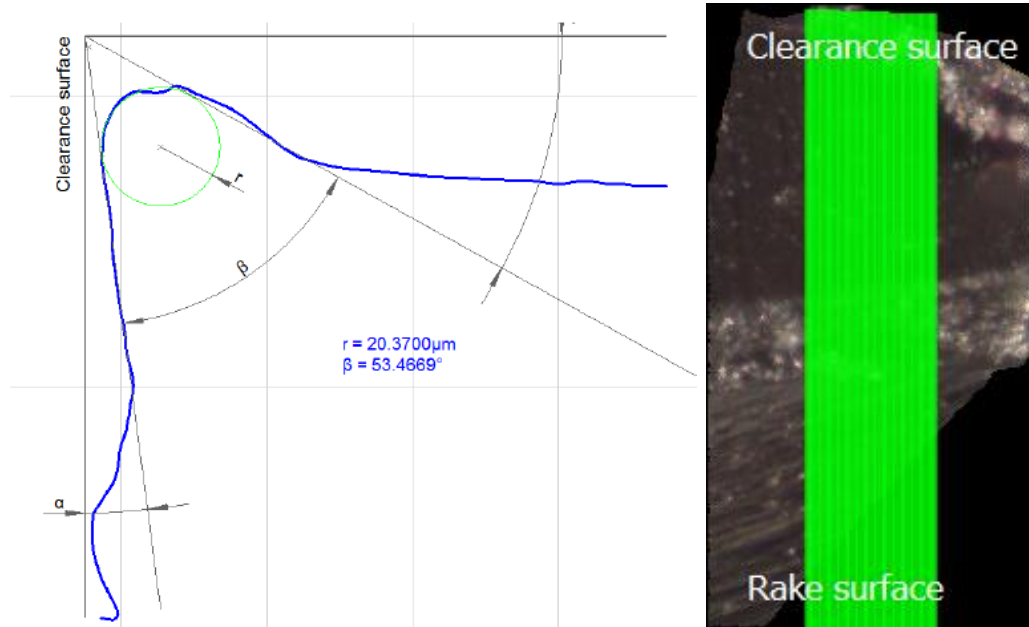
Gracias a esta metodología aplicada, es posible inferir y predecir las variables de salida evaluadas en esta investigación relacionada al proceso de micro-maquinado en aleación de titanio Ti-6Al-4V.

Para el micro-taladrado se obtuvo las siguientes conclusiones de proceso:

- Los parámetros de corte *velocidad de husillo* y *profundidad de corte* afectan significativamente al Cutting edge radius (r) en el proceso de micro-taladrado de aleación de titanio Ti-6Al-4V respectivamente.
- La tendencia del comportamiento del Cutting edge radius (r), muestra que a valores centrales de parámetros experimentales utilizados en la investigación, la variación del Cutting edge radius (r) Major cutting edge S aumentaría, aunque no es tan claro este comportamiento.

- Los parámetros de corte en la característica de Cutting edge radius (r) están involucrados con la aparición de filo recrecido (BUE) como lo demuestra la investigación. Estos fueron valores atípicos que se encontraron en el proceso de evaluación de filo de micro-herramienta.

Figura 4-1: Filo recrecido (BUE) Micro-taladrado $n = 3750RPM, v_f = \frac{6mm}{min}, a_p = 2mm$



- Para la característica geométrica Distance apex to end of clearance roundness (S_α), el parámetro de corte *profundidad de corte* es altamente significativo al igual que la interacción entre velocidad de husillo - profundidad de corte.
- La tendencia del comportamiento del (S_α) es que a valores de parámetros de corte experimentales centrales, disminuye su magnitud.
- Para el rasgo característico Distance apex to end of rake roundness (S_γ), el parámetro de corte que más influye significativamente es el avance.
- Existe una ligera variación entre S_α y S_γ , siendo mayor S_α en su promedio para el micro-taladrado de aleación Ti-6Al-4V con micro-broca de HSS, $\varnothing 500\mu m$ en los parámetros utilizados experimentalmente.

- Para la geometría Minimum distance of edge to apex (Δr), los parámetros de corte significativos encontrados fueron *profundidad de corte* y en menor grado, el avance.
- La tendencia mostrada es que al aumento de la velocidad de husillo, disminuye la característica evaluada Minimum distance of edge to apex (Δr). Al disminuir el avance, disminuye el rasgo característico Δr .
- Los parámetros de corte, velocidad del husillo y profundidad de corte, afectan significativamente la rugosidad de la superficie en el proceso de micro-perforación. Entre estos dos parámetros, la profundidad de corte es más significativa que la velocidad del husillo, respectivamente.
- Se observa en las diferentes superficies de respuesta de la rugosidad superficial que el aumento de la profundidad de corte y la velocidad del husillo, aumenta la variable de salida. Con respecto al avance, si su magnitud disminuye, aumenta la rugosidad. El comportamiento de este último parámetro no es tan explícito.
- Los modelos de segundo orden generados por la respectiva regresión lineal y su refinamiento fueron los que mejor se ajustaron a los datos obtenidos en todas las salidas evaluadas en el micro-taladrado (Adjusted R-squared entre 76.67% y 60.02% con lack of fit no significativos) siendo además consistentes con investigaciones previas.
- La experimentación demostró la necesidad de realizar una perforación previa de centro punteado debido a roturas y deslizamientos de la micro-herramienta en la superficie.

Para el micro-fresado plano la experimentación arrojó las siguientes conclusiones:

- Para el rasgo Cutting edge radius (r) Minor cutting edge S' , los parámetros de corte más significativos fueron el ramping, avance [mm/diente] y la velocidad de husillo.

-
- La tendencia de la variación de la geometría S' estima que este disminuye al aumentar la velocidad de husillo y disminuir la profundidad de corte y el avance por diente respectivamente.
 - En el rasgo geométrico Cutting edge radius (r) Major cutting edge S , se observa que los parámetros de corte significativos en la variación del rasgo son el avance [mm/diente] y la interacción entre el avance - velocidad [RPM] .
 - Se observa un comportamiento de naturaleza diferente en el rasgo con relación a los ángulos de ramping investigados. La variación de este parámetro influye en su magnitud final.
 - En el análisis de la geometría Face A_γ , los parámetros significativos del proceso fueron la profundidad de corte y el avance por diente, sumado a la interacción significativa entre los 4 parámetros de corte evaluados (ramping, profundidad de corte, avance por diente y velocidad de husillo).
 - El comportamiento del rasgo Face A_γ en función de los parámetros y ángulos de ramping muestra una pauta distinta en cada ángulo ramping experimentado.
 - La investigación del Major first flank A_{α_1} muestra que los valores significativos en la variación del rasgo son el avance por diente junto con las interacciones avance por diente - ramping y ramping - velocidad de husillo.
 - La magnitud del Major first flank A_{α_1} expone diferentes formas para los ángulos de ramping evaluados influyendo estos en combinación con los parámetros experimentales seleccionados para su cambio en magnitud.
 - La evaluación de los rasgos geométricos de micro-herramienta expuestos experimentalmente para el micro-fresado plano, corresponden con investigaciones relacionadas de micro-maquinado en aleación de titanio Ti-6Al-4V.

- En el procedimiento de evaluación de la rugosidad superficial, los parámetros significativos fueron el ramping, la interacción ramping - avance por diente y la interacción entre los cuatro parámetros evaluados (ramping, velocidad de husillo, profundidad de corte y avance por diente).
- El comportamiento de la rugosidad superficial expone que los valores respectivos de ramping se comportan de manera análoga (incrementa su magnitud a medida que se incrementa la profundidad de corte, se disminuye el avance y aumenta la velocidad de husillo) excepto que a igual magnitud de parámetros se tendría mayor rugosidad con mayor ángulo de ramping.
- Para la propiedad geométrica de Burr height, los parámetros de corte significativos fueron velocidad [RPM]. En cuestión de interacciones se halló la triple interacción entre ramping - profundidad de corte - avance.
- El comportamiento de la altura de rebaba y su tendencia depende del ramping seleccionado. A menor ramping, su magnitud aumenta a medida que aumenta la profundidad, disminuye el avance por diente y la velocidad de husillo, mientras que a mayor ramping, aumenta su magnitud cuando disminuyen todos los parámetros.
- Los modelos de primer orden originados por regresión lineal y refinados, obtuvieron un Adjusted R-squared entre 96.19% y 61.54% para las características de evaluación experimentales en el proceso de micro-fresado plano

Para el micro-fresado esférico, los ensayos experimentales proyectaron las siguientes conclusiones:

- El proceso de los datos de la característica investigativa de rugosidad tiene como parámetro de corte significativo el Upward/Downward ramping [\uparrow o \downarrow].
- El comportamiento tendencia de la rugosidad superficial exhibe que para un upward ramping (\uparrow), se tiene un incremento de la rugosidad al incrementar la velocidad de husillo, avance por diente y disminuyendo su profundidad de corte.

Para un downward ramping (\downarrow), se requiere un incremento de profundidad, disminución de avance por diente y una velocidad con tendencia al aumento.

- La evaluación de los datos enfocados en la característica geométrica altura de rebaba para el proceso de micro-fresado esférico, reveló que el parámetro de corte velocidad de husillo [RPM] es significativo para la variación de la característica evaluada. Relacionado con las interacciones se encuentran con alta significación Upward/Downward ramping - profundidad de corte, avance por diente - profundidad de corte, velocidad de husillo - profundidad de corte y avance por diente - velocidad de husillo.
- La altura de rebaba para el micro-fresado esférico, muestra que para un micro-fresado upward ramping, disminuye su magnitud cuando disminuye la profundidad de corte, el avance por diente y se incrementan las RPM. Para un downward ramping (\downarrow), aumenta en tamaño cuando disminuye la profundidad de corte.
- Los modelos calculados por regresión lineal y refinados, obtuvieron un Adjusted R-squared entre 75.73% y 68.74% para las características de altura de rebaba y rugosidad superficial evaluadas en el micro-fresado esférico.
- Es posible obtener valores preliminares de micro-deformación y tamaño de cristalito por medio del método Williamson-Hall teniendo en cuenta las respectivas suposiciones (isotropía).

En la obtención de micro-pines por cilindrado, se pueden resumir los siguientes aspectos:

- A pesar de que el modelo de mecánica de materiales para la flexión de una viga en cantilever supone una fijación totalmente rígida, las estimaciones son precisas en un 60% de la longitud del pin.
- Los resultados obtenidos son evaluados bajo teorías de mecánica de materiales que generalmente son utilizadas en este tipo de estudios a escala meso [109] . A

pesar de ello, el estudio indica que son aplicables también para el caso a escala micro con un porcentaje de precisión considerable.

- El estudio demuestra que es posible generar piezas de escala micro a bajas RPMS.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda complementar el estudio actual con estudios en:

- Verificación del comportamiento de la aleación de titanio Ti-6Al-4V respecto a deformaciones instantáneas.
- Aplicación de DOE respecto a la temperatura como salida de diseño. Este sería generado con diferentes diámetros de micro-herramienta debido a una posible existencia de relación entre estos 2 parámetros.
- Realización de análisis de Tool-Life direccionados hacia la variación del radio de curvatura de filo ya que en la literatura el enfoque está mayormente direccionado al concepto general de variaciones de flanco, complementando a la poca información sobre estos estudios debido a la rotura temprana de μ -herramienta.
- Experimentaciones relacionadas con el hallazgo de intervalos de velocidad de corte afines con la aparición del filo recrecido en el micro-maquinado en aleaciones de titanio.
- Verificación experimental de los supuestos teóricos del micro-maquinado dinámico.

A. Anexo: Prueba de datos

El análisis correspondiente evalúa los radios de curvatura de los fillos de las micro-brocas.

Los datos obtenidos fueron:

	r_1	r_2
1	5.2669	6.2890
2	28.3488	5.6540
3	7.7268	9.4012
4	5.0759	7.2032
5	7.3078	5.8080
6	4.4346	12.5482
7	6.3605	8.5335
8	5.5134	6.8409
9	6.2554	7.2232
10	7.7288	55.8072
11	6.7109	28.1665
12	20.3700	7.5236
13	6.2124	12.2595
14	23.2663	8.7041
15	5.2986	6.6313
16	64.3931	6.1948
17	28.6916	1.8536
18	7.0217	6.3213

Para verificar que los fillos de curvatura trabajan de igual forma, se plantea que:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

Donde:

μ_1 Radio de filo r_1 promedio

μ_2 Radio de filo r_2 promedio

Utilizando Software R para el desarrollo del t-Student Test se tiene:

Two Sample t-test

```
data: Radios$RadioFilo1 and Radios$RadioFilo2
t = 0.51907, df = 34, p-value = 0.6071
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -6.967324 11.747369
sample estimates:
mean of x mean of y
 13.66575  11.27573
```

Se concluye que no se puede rechazar la hipótesis nula al nivel de significación de $\alpha = 0.05$. Se deduce que no hay diferencia significativa entre los radios de los fillos respectivamente.

B. Anexo: Fundamentación teórica de conceptos estadísticos.

Prueba de Shapiro-Wilks para normalidad [75][110].

Suponga una muestra aleatoria de datos x_1, x_2, \dots, x_n que proceden de una distribución desconocida $F(x)$. Se quiere verificar si los datos fueron generados por un proceso normal, mediante la hipótesis estadística:

H_0 : Los datos proceden de una población normal ($F(x)$ es normal).

H_1 : Los datos no proceden de una distribución normal ($F(x)$ no es normal).

Los pasos para la prueba de Shapiro-Wilks son: 1) Se ordenan los datos de menor a mayor. Denotados los datos ordenados por $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(n)}$. 2) Se calcula el estadístico W definido como:

$$W = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[\sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2$$

donde S^2 es la varianza muestral y los coeficientes a_i suelen aparecer tabulados en manuales. 4) Si el valor del estadístico es mayor que su valor crítico al nivel α seleccionado, se rechaza la normalidad de los datos.

Transformaciones de y : el método de Box-Cox [110]

Supóngase que se debe transformar y para corregir la no normalidad y/o la varianza no constante. Una clase útil de transformaciones es la de la transformación de potencia y^λ , donde λ , es un parámetro que se debe determinar. El procedimiento correcto es usar:

$$y^\lambda = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda y^{\lambda-1}}, & \lambda \neq 0 \\ y \ln y, & \lambda = 0 \end{cases}$$

En las que $\hat{y} = \ln^{-1}((1/n) \sum_{i=1}^n \ln y_i)$ es el promedio geométrico de las observaciones, y ajustar el modelo

$$y^\lambda = X\beta + \varepsilon$$

por mínimos cuadrados.

Bibliografía

- [1] J. Corbett, "Nanotechnology: International Developments and Emerging Products," *CIRP Ann. Technol.*, pp. 523–545, 2000.
- [2] M. Hasan, J. Zhao, and Z. Jiang, *A review of modern advancements in micro drilling techniques*, vol. 29. 2017.
- [3] P. Piljek, "MICROMACHINING – REVIEW OF LITERATURE FROM 1980 TO 2010," *Interdiscip. Descr. Complex Syst.*, vol. 12, no. 223, pp. 75–84, 2014, doi: 10.7906/indecs.12.1.1.
- [4] S. Sharif, E. Abd, and H. Sasahar, "Machinability of Titanium Alloys in Drilling," *Titan. Alloy. - Towar. Achiev. Enhanc. Prop. Divers. Appl.*, vol. 3, no. c, 2012, doi: 10.5772/35948.
- [5] M. A. Amran *et al.*, "Effects of machine parameters on surface roughness using response surface method in drilling process," *Procedia Eng.*, vol. 68, pp. 24–29, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.142.
- [6] M. Altaf, S. Prakash Dwivedi, R. Shams Kanwar, I. Ahmad Siddiqui, P. Sagar, and S. Ahmad, "Machining Characteristics of Titanium Ti-6Al-4V, Inconel 718 and Tool Steel-A Critical Review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 691, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/691/1/012052.
- [7] S. R. Oke *et al.*, "An overview of conventional and non-conventional techniques for machining of titanium alloys," *Manuf. Rev.*, vol. 7, 2020, doi: 10.1051/mfreview/2020029.
- [8] J. C. Miao, G. L. Chen, X. M. Lai, H. T. Li, and C. F. Li, "Review of dynamic issues in micro-end-milling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 31, no. 9–10, pp. 897–904, 2007, doi: 10.1007/s00170-005-0276-6.
- [9] T. Pratap and K. Patra, "Micro ball-end milling—an emerging manufacturing technology for micro-feature patterns," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 5–8, pp. 2821–2845, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1064-9.
- [10] J. L. Liow, "Mechanical micromachining: a sustainable micro-device manufacturing

- approach?," *J. Clean. Prod.*, vol. 17, no. 7, pp. 662–667, 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2008.11.012.
- [11] K. Liu and S. N. Melkote, "Effect of plastic side flow on surface roughness in micro-turning process," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 14, pp. 1778–1785, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.11.014.
- [12] Y. Lakhtin, *Engineering Physical Metallurgy and Heat-Treatment*. Moscow: MIR Publishers, 1979.
- [13] J. S. Subramanian, "Study on Drilling Process Parameters - Review," vol. 6, no. 07, pp. 1–7, 2018.
- [14] A. Ç. M. Perçin, K. Aslantas, I. Uçun, Y. Kaynak, "Micro-drilling of Ti–6Al–4V alloy: The effects of cooling/lubricatin," *Precis. Eng.*, 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.02.015.
- [15] M. J. Remolina, M. A. Velasco, and E. Córdoba, "Journal of King Saud University – Engineering Sciences Chip experimental analysis approach obtained by micro-end-milling in (Ti-6Al-4 V) titanium alloy and (7075) aluminium alloy," *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2021.04.003.
- [16] M. Azizur Rahman, M. Rahman, A. S. Kumar, and H. S. Lim, "CNC microturning: An application to miniaturization," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 6, pp. 631–639, 2005, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.10.003.
- [17] X. Liu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, and K. F. Ehmann, "The mechanics of machining at the microscale: Assessment of the current state of the science," *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 126, no. 4, pp. 666–678, 2004, doi: 10.1115/1.1813469.
- [18] V. S. Kathavate, P. R. Cheke, and A. S. Adkine, "An Experimental Investigation Of Micromilling," *Int. J. Technol. Enhanc. Emerg. Eng. Res.*, vol. 3, no. 04, pp. 36–41, 2015.
- [19] D. Carou, E. M. Rubio, J. Herrera, C. H. Lauro, and J. P. Davim, "Latest advances in the micro-milling of titanium alloys: a review," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 275–282, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.071.
- [20] R. S. Anand and K. Patra, "Modeling and simulation of mechanical micro-machining - A review," *Mach. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 323–347, 2014, doi: 10.1080/10910344.2014.925377.
- [21] A. Gupta, J. S. Mehta, and R. Madan, *Micro and Precision Manufacturing*. 2018.

- [22] A. Perveen and C. Molardi, "Machining of Microshapes and Features," pp. 1–19, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-68801-5_1.
- [23] D. Dornfeld, S. Min, and Y. Takeuchi, "Recent advances in mechanical micromachining," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 55, no. 2, pp. 745–768, 2006, doi: 10.1016/j.cirp.2006.10.006.
- [24] J. Chae, S. S. Park, and T. Freiheit, "Investigation of micro-cutting operations," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 3–4, pp. 313–332, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.
- [25] A. Aramcharoen, P. T. Mativenga, S. Yang, K. E. Cooke, and D. G. Teer, "Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 48, no. 14, pp. 1578–1584, 2008, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011.
- [26] T. Masuzawa, "Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools," *Recent Prog. Steel Compos. Struct.*, pp. 15–80, 2000, doi: 10.1201/b21417-5.
- [27] T. Masuzawa, "State of the art of micromachining," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 473–488, 2000, doi: 10.1016/S0007-8506(07)63451-9.
- [28] G. Bissacco, H. N. Hansen, and J. Slunsky, "Modelling the cutting edge radius size effect for force prediction in micro milling," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 113–116, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.085.
- [29] A. Herrero *et al.*, "Mechanical Micro-Machining Using Milling, Wire EDM, Die-Sinking EDM and Diamond Turning," *Strojniški Vestn.*, vol. 7/8, no. 52, pp. 484–494, 2006.
- [30] B. Boswell, M. N. Islam, and I. J. Davies, "A review of micro-mechanical cutting," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 789–806, 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0912-y.
- [31] L. Uriarte *et al.*, "Error budget and stiffness chain assessment in a micromilling machine equipped with tools less than 0.3 mm in diameter," *Precis. Eng.*, vol. 31, no. 1, pp. 1–12, 2007, doi: 10.1016/j.precisioneng.2005.11.010.
- [32] V.K. Jain, "Advanced (Non-traditional) Machining Processes," in *Machining*, Paulo J. Davim, Ed. Kanpur: Springer, 2008.
- [33] A. K. R. C. Dorf, *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [34] Marc J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, Second Edi. Boca Raton: CRC

- Press, 2002.
- [35] Miro Dental, "Dental Implants: Facts and Stats," 2019.
<https://mirodentalcenter.com/2019/03/06/dental-implants-facts-and-stats/>
(accessed Sep. 04, 2021).
- [36] R. York, M. Doumit, M. Nganbe, and A. Helal, "Study of mechanical properties of micromachined dental implants," *Can. Metall. Q.*, vol. 58, no. 1, pp. 56–68, 2019, doi: 10.1080/00084433.2018.1505309.
- [37] S. Gupta, V. Dahiya, and P. Shukla, "Surface topography of dental implants: A review," *J. Dent. Implant.*, vol. 4, no. 1, p. 66, 2014, doi: 10.4103/0974-6781.131009.
- [38] P. I. Branemark, "Osseointegration and its experimental background," *J. Prosthet. Dent.*, vol. 50, no. 3, pp. 399–410, 1983, doi: 10.1016/S0022-3913(83)80101-2.
- [39] T. M. Smith, "Current Trends in Dental Morphology Research," 2014.
- [40] M. Perçin, K. Aslantas, I. Uçun, Y. Kaynak, and A. Çicek, "Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating," *Precis. Eng.*, vol. 45, pp. 450–462, 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.02.015.
- [41] B. Stirn, K. Lee, and D. Dornfeld, "Burr formation in micro-drilling," *Univ. Technol. Aachen (RWTH)*, ..., no. c, pp. 2–5, 2001, [Online]. Available: http://aspe.net:16080/publications/Annual_2001/PDF/POSTERS/PROCESS/MACHINE/1255.PDF.
- [42] Y. Ahn and S. H. Lee, "Classification and prediction of burr formation in micro drilling of ductile metals," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 17, pp. 4833–4846, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1254355.
- [43] D. A. Dornfeld, "Burr Formation in Micro-machining Aluminum ," no. DECEMBER 2001, 2015.
- [44] K. Lee and D. A. Dornfeld, "Micro-burr formation and minimization through process control," *Precis. Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 246–252, 2005, doi: 10.1016/j.precisioneng.2004.09.002.
- [45] D. Dornfeld and S. Min, "Burrs - Analysis, Control and Removal," *Burrs - Anal. Control Remov.*, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-00568-8.
- [46] L. L. Alhadeff, M. B. Marshall, D. T. Curtis, and T. Slatter, "Protocol for tool wear measurement in micro-milling," *Wear*, vol. 420–421, pp. 54–67, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2018.11.018.

- [47] C. F. Wyen, D. Jaeger, and K. Wegener, "Influence of cutting edge radius on surface integrity and burr formation in milling titanium," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 1–4, pp. 589–599, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4507-3.
- [48] A. Caballero Ruiz, H. R. Siller, L. Ruiz Huerta, G. Garcia Garcia, and E. V. Vázquez, "Calibration of ball nose micro end milling operations for sculptured surfaces machining," *Int. J. Mach. Mach. Mater.*, vol. 19, no. 6, p. 587, 2017, doi: 10.1504/ijmmm.2017.10009891.
- [49] V. Tomas, P. Jozef, K. Mario, and B. Ivan, "The wear measurement process of ball nose end mill in the copy milling operations," *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 1038–1047, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.088.
- [50] M. Ziberov, M. B. da Silva, M. Jackson, and W. N. P. Hung, "Effect of Cutting Fluid on Micromilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy," *Procedia Manuf.*, vol. 5, no. 2003, pp. 332–347, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.029.
- [51] A. J. Mian, "Size Effect in Micromachining," p. 209, 2011, [Online]. Available: <https://www.escholar.manchester.ac.uk/uk-ac-man-scw:119779>.
- [52] B. Z. Balázs, N. Geier, M. Takács, and J. P. Davim, "A review on micro-milling: recent advances and future trends," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, no. 3–4, pp. 655–684, 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.
- [53] A. Teo, S. Danielson, and T. Georgeou, "High performance machining: A practical approach to high-speed machining," *ASEE Annu. Conf. Expo. Conf. Proc.*, 2008, doi: 10.18260/1-2--3816.
- [54] A. P. Guliáev, *Metallography (In Spanish)*. Moscow: MIR Publishers, 1977.
- [55] "INTERNATIONAL STANDARD ISO 8688-2." International Organization, p. 31, 1989.
- [56] ASM Handbook Committee, *Metallography and Microstructures*, Ninth edit. ASM Publishers, 1985.
- [57] ASTM E112, "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size E112-10," *Astm E112-10*, vol. 96, no. 2004, pp. 1–27, 2010, doi: 10.1520/E0112-10.Copyright.
- [58] ASTM Standard, "Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials," *ASTM Int.*, vol. E384, pp. 1–40, 2017, doi: 10.1520/E0384-17.
- [59] "INTERNATIONAL STANDARD ISO 3002-1." International Organization, p. 62, 1982.

- [60] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Ninth Edit., vol. 106, no. 11. TEMPE, ARIZONA: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [61] S. H. I. Jaffery, M. Khan, L. Ali, and P. T. Mativenga, "Statistical analysis of process parameters in micromachining of Ti-6Al-4V alloy," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 230, no. 6, pp. 1017–1034, 2016, doi: 10.1177/0954405414564409.
- [62] P. Smid, *Programming Handbook Third Edition*. 2007.
- [63] C. C. . K. H. F. Tai, "A predictive force model in ball-end milling," vol. 34, no. 7, pp. 959–979, 1993.
- [64] G. M. Kim, P. J. Cho, and C. N. Chu, "Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 40, no. 2, pp. 277–291, 2000, doi: 10.1016/S0890-6955(99)00040-1.
- [65] H. Schulz and S. Hock, "High-Speed Milling of Dies and Moulds - Cutting Conditions and Technology," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 35–38, 1995, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62270-7.
- [66] B. Denkena, "Cutting edge geometries," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, pp. 631–653, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.028.
- [67] B. Denkena and D. Biermann, "CIRP Annals - Manufacturing Technology Cutting edge geometries," vol. 63, pp. 631–653, 2014.
- [68] F. A. Barbashov, *Milling Manual (In Spanish)*, Second Edi. Moscow: MIR Publishers, 1981.
- [69] L. Harvey Tool Company, "Conventional milling VS Climb milling." pp. 11–12, 2011, [Online]. Available: <http://www.designask.com/2011/04/conventional-milling-vs-climb-milling/>.
- [70] Donghaon Stainles Steel, "12L14 free machining Steel." <https://tubingchina.com/12L14-free-machining-steel.htm>. (accessed May 30, 2019).
- [71] A. Otero, "Características AISI/SAE12L14." [mecanizadoenserie.http://www.acerosotero.cl/acero_carbono_sae_12l14.html](http://www.acerosotero.cl/acero_carbono_sae_12l14.html) (accessed May 30, 2019).
- [72] Kennametal, "ISO Carbide Inserts. Specifications." <https://www.kennametal.com/hi/products/20478624/47535256/63745063/63745065/63840303/63840328/55907484/100002953.html>. (accessed May 30, 2019).
- [73] E. Isakov, *Cutting data for turning of Steel*. New York: Industrial Press Inc, 2009.

- [74] J.M.Gere, *Mecánica de Materiales*, Sexta Ed. Mexico: Editorial Thomson, 2006.
- [75] R. de la V. S. Humberto Gutierrez Pulido, *Diseño y análisis de experimentos*, Segunda ed. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [76] M. R. Spiegel, *Estadística*, Primera Ed. Mexico: McGraw-Hill, 1978.
- [77] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, and L. Licata, “Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median,” *J. Exp. Soc. Psychol.*, vol. 49, no. 4, pp. 764–766, 2013, doi: 10.1016/j.jesp.2013.03.013.
- [78] Ya-Lun Chou, *Análisis Estadístico*, Primera Ed. Mexico: Nueva Editorial Interamericana S. A. de C. V, 1972.
- [79] N. H. M. Fauzi, N. A. Shuaib, Z. A. Zailani, A. R. Irfan, and S. A. Sobri, “Micro drilling of titanium Ti-6Al-4V: Influence of the cutting parameters on tool life,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2129, no. July, 2019, doi: 10.1063/1.5118201.
- [80] F. R. Wong, S. Sharif, K. Kamdani, and E. A. Rahim, “The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy , Ti-6Al-4V,” *Proc. Int. Conf. Mech. Manuf. Eng. (ICME2008)*, 21– 23 May 2008, no. May, pp. 21–23, 2008.
- [81] A. Beranoagirre, G. Urbikain, R. Marticorena, A. Bustillo, and L. N. L. de Lacalle, “Sensitivity analysis of tool wear in drilling of Titanium Aluminides,” *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 3, 2019, doi: 10.3390/met9030297.
- [82] V. D. Kuznetsov, “Metal Transfer and Build-Up in Friction and Cutting,” *Met. Transf. Build-Up Frict. Cut.*, 1966, doi: 10.1016/c2013-0-12463-4.
- [83] V. Tomoiagă, M. S. Popa, S. Sattel, G. Conțiu, V. Vereș, and M. Bozga, “Influence of the cutting edge microgeometry in drilling operation of 42CrMo4 and X5CrNi18-10,” vol. 01011, pp. 1–6, 2018.
- [84] C. Wyen and W. Knapp, “A new method for the characterisation of rounded cutting edges,” pp. 899–914, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3555-4.
- [85] M. Balaji, K. Venkata Rao, N. Mohan Rao, and B. S. N. Murthy, “Optimization of drilling parameters for drilling of TI-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 114, no. June 2020, pp. 332–339, 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.09.051.
- [86] A. M. Abdelhafeez, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, A. Dowson, and D. Arnold, “Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys,” *Procedia*

- CIRP*, vol. 37, pp. 230–235, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.08.019.
- [87] Y. Choi, “Process monitoring in end milling,” pp. 1–129, 2003, [Online]. Available: <http://lib.dr.iastate.edu/rtd>.
- [88] C. Bandapalli, B. M. Sutaria, D. V. Prasad Bhatt, and K. K. Singh, “Tool wear analysis of micro end mills - Uncoated and PVD coated TiAlN & AlTiN in high speed micro milling of titanium alloy - Ti-0.3Mo-0.8Ni,” *Procedia CIRP*, vol. 77, no. January, pp. 626–629, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.191.
- [89] D. Baldo, S. L. M. Ribeiro Filho, C. H. Lauro, A. C. dos Santos Delfino, and L. C. Brandao, “Analysis of Surface Roughness in Micro Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1079–1080, pp. 3–6, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1079-1080.3.
- [90] P. Kumar, V. Bajpai, and R. Singh, “Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling,” *Manuf. Lett.*, vol. 11, pp. 12–16, 2017, doi: 10.1016/j.mfglet.2016.10.001.
- [91] T. Pratap and K. Patra, “Micromilling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Using Ball-end Tool,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 229, no. 1, pp. 0–6, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/229/1/012011.
- [92] P. Kumar, M. Kumar, V. Bajpai, and N. K. Singh, “Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling,” *Manuf. Lett.*, vol. 13, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1016/j.mfglet.2017.04.002.
- [93] M. J. Chen, H. B. Ni, Z. J. Wang, and Y. Jiang, “Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 62, no. 9–12, pp. 901–912, 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3865-6.
- [94] Q. Guo, “Research on the methods and technologies for high performance peripheral machining of complex surface,” *Dalian Univ. Technol.*, pp. 1–5, 2013.
- [95] W. Shan, “Parameter Setting for Dynamic Milling of Aluminum Alloy,” vol. 100, no. Icmeim, pp. 357–361, 2017.
- [96] Yu. Lakhtin, *Engineering physical metallurgy and heat-treatment*, Second edi. Moscow: MIR Publishers, 1979.
- [97] P. Kuryło, “The Study of Residual Stresses in the Surface Layer,” *Acta Mech. Slovaca*, vol. 17, no. 4, pp. 6–15, 2013, doi: 10.21496/ams.2013.040.
- [98] N. F. Anoshkin, *Aleaciones de titanio. Metalografía de aleación de titanio. (En*

- Ruso*). Moscú: Metalurgía, 1980.
- [99] S. Sarkar and R. Das, "Determination of structural elements of synthesized silver nano-hexagon from X-ray diffraction analysis," *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 56, no. 10, pp. 765–772, 2018.
- [100] S. Takaki, F. Jiang, T. Masumura, and T. Tsuchiyama, "Correction of elastic anisotropy in williamson-hall plots by diffraction young's modulus and direct fitting method," *ISIJ Int.*, vol. 58, no. 4, pp. 769–775, 2018, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-642.
- [101] S. Takaki, T. Masumura, and T. Tsuchiyama, "Dislocation characterization by the direct-fitting/modified Williamson–Hall (DF/mWH) method in cold worked ferritic steel," *ISIJ Int.*, vol. 59, no. 3, pp. 567–572, 2019, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-623.
- [102] A. Dutta Gupta *et al.*, "Proton irradiation studies on pure Ti and Ti-6Al-4V," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 387, pp. 63–72, 2016, doi: 10.1016/j.nimb.2016.09.010.
- [103] A. Mahboubi Soufiani, F. Karimzadeh, and M. H. Enayati, "Formation mechanism and characterization of nanostructured Ti6Al4V alloy prepared by mechanical alloying," *Mater. Des.*, vol. 37, pp. 152–160, 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.12.044.
- [104] A. M. Stapleton, S. L. Raghunathan, I. Bantounas, H. J. Stone, T. C. Lindley, and D. Dye, "Evolution of lattice strain in Ti-6Al-4V during tensile loading at room temperature," *Acta Mater.*, vol. 56, no. 20, pp. 6186–6196, 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.08.030.
- [105] Q. Chen, L. Liu, C. Zhu, and K. Chen, "Mesomechanical modeling and numerical simulation of the diffraction elastic constants for Ti6Al4V polycrystalline alloy," *Metals (Basel)*, vol. 8, no. 10, 2018, doi: 10.3390/met8100822.
- [106] G. S. Srinivasu and N. R. Raja, "Finite Element Modeling of Stress Strain Curve and Micro Stress and Micro Strain Distributions of Titanium Alloys— A Review," *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, vol. 11, no. 10, pp. 953–960, 2012, doi: 10.4236/jmmce.2012.1110094.
- [107] H. S. Lim, A. S. Kumar, and M. Rahman, "Improvement of form accuracy in hybrid machining of microstructures," *J. Electron. Mater.*, vol. 31, no. 10 SPEC., pp. 1032–1038, 2002, doi: 10.1007/s11664-002-0039-1.

- [108] Jinn Fa Machine Industrial co, *JSL/26/32AB7B CNC SWISS TYPE LATHE*.
Yuanchung Village: Jinn Fa, 2006.
- [109] L. Z. Qiang, "Finite difference calculations of the deformations of multi-diameter workpieces during turning," *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 310–316, 2000.
- [110] O. M. L. L. S. Melo., *Diseño de experimentos [Métodos y Aplicaciones]*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2000.