DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales

MODELADO Y ANÁLISIS DEL PROCESO DE MICROMECHANIZADO REALIZADO CON HERRAMIENTAS DE FILO ÚNICO

Autor: D. Luis Alberto López

Estrada

Ingeniero en Mecatrónica

Master en Manufactura

Avanzada

Director: D. Antonio Vizán Idoipe

Dr. Ingeniero Industrial

2019

Agradecimientos

El agradecimiento más grande es para mi familia, que, a pesar de estar lejos durante todo este proceso, nunca faltaron sus palabras de aliento, su apoyo y la inquebrantable fe en mí, en es especial a mi madre D. ^a Silvia Elena Estrada Navarrete.

Quisiera expresar mi gratitud al director de tesis, D. Antonio Vizán Idoipe, por toda su dedicación, calidad humana, sabiduría y conocimientos que enriquecieron la experiencia adquirida durante el programa de Doctorado. Agradezco también a la profesora D. ^a Hilde Pérez por su apoyo, sus consejos y conocimientos durante todo este tiempo y a su vez, al profesor D. Eduardo Diez por sus aportaciones y puntos de vista.

Agradezco a mis compañeros del programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica, en especial a D. Marcelo Fajardo Pruna, por todo el apoyo brindado durante el programa del doctorado y su sincera amistad, la cual siempre se hizo presente en todo momento.

Agradezco a mis amigos de la patria grande, D. Erardo Leal, D. Daniel Gualoto, y D. Juan Cuervo, por sus consejos, pláticas y apoyo.

Mi agradecimiento a todos los profesores del área de Fabricación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la ETSI Industriales de la UPM, José Ríos, Jesús Pérez, José Ramón Álvarez, Juan Carlos Hernández y Juan Márquez, así como al cuerpo técnico del laboratorio de fabricación Javier Tena y Ramon San Miguel. Gracias por el apoyo otorgado durante mi estancia en la escuela.

Finalmente, agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) de México por otorgarme la beca para realizar los estudios del programa de doctorado (CVU 482229).

Mucha gracias a todos.

Índice

Agradecimientos	I
Índice.....	III
Lista de figuras	V
Nomenclatura	XI
Resumen	XV
Abstract.....	XVI
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1. Ámbito de aplicación de la Tesis.....	1
1.2. Objetivos de la tesis	3
1.3. Estructura de la tesis.....	4
Capítulo 2	6
Estado del Arte.....	6
2.1. Preliminar.....	6
2.2. Micromecanizado.....	9
2.3. Proceso de corte	16
2.4. Modelos de corte	20
2.4.1. Clasificación de los modelos de corte	22
2.4.2. Modelos basados en métodos analíticos.....	23
2.4.3. Modelos basados en métodos experimentales	26
2.4.4. Modelos basados en métodos de simulación de dinámica molecular	27
2.4.5. Modelos basados en métodos de elementos finitos	28
2.4.6. Modelos basados en métodos de simulación multi escala.....	30
2.4.7. Modelos basados en métodos mecanicistas.	31
2.5. Herramientas de corte.....	33
2.5.1. Micro corte de filo único.....	35
2.5.2. Proceso de micro mecanizado de filo único propuesto.....	36
Capítulo 3	38
Análisis del proceso de mecanizado con herramientas de filo único	38
3.1. Definición de la herramienta de corte de filo único.	38
3.2. Modelo mecanicista de corte	43
3.2.1. Primer análisis experimental del proceso de corte	44

3.2.2.	Segundo análisis experimental del proceso de corte	54
3.2.2.1	Máquina de 4 grados de libertad para mecanizado de filo único.	54
3.2.2.2	Análisis de las fuerzas y presión específica de corte en el proceso.	58
Capítulo 4	.....	81
Modelo de corte con herramienta de filo único	.....	81
4.1.	Bases del modelo de micro corte de filo único.....	81
4.2.	Comparación del modelo de corte de filo único con datos experimentales.	83
Capítulo 5	.....	88
Estrategias de mecanizado para el corte de filo único	.....	88
5.1.	Estrategias de mecanizado para el corte de filo único.	88
5.2.	Zonas de mecanizado que dependen del ángulo λ_s	90
5.3.	Zonas de mecanizado que dependen del ángulo χ_r	92
5.4.	Planeación de trayectorias de corte.	94
Capítulo 6	.....	99
Resultados	.....	99
6.1.	Comprobación del modelo de corte en maquina hibrida de 6 grados de libertad.	99
6.2.	Cortes lineales con diferentes inclinaciones.	101
6.3.	Corte combinado aplicando estrategias de mecanizado.	103
6.4.	Análisis de la geometría obtenida.	105
Capítulo 7	.....	108
Conclusiones	.....	108
7.1.	Conclusiones del trabajo presentado.	108
7.2.	Trabajos futuros	111
Anexo A	.....	112
Superficies del modelo de corte.	.....	112
A.1.	Comparativa de datos experimentales de presión específica de corte con el modelo teórico.	112
Anexo B	.....	119
Sistema de visión artificial.	.....	119
A.2.	Ámbito de aplicación del sistema de visión artificial.	119
A.2.1.	Descripción del sistema de visión.	121
Bibliografía	.....	127

Lista de figuras

Figura 2.1. Clasificación de las tecnologías de microfabricación basado en (Piljek, Keran, and Math 2014).	9
Figura 2.2. Clasificación del mecanizado según sus tolerancias y dimensiones.	11
Figura 2.3. Diagrama de relación entre las causas y los efectos de las fuerzas de corte en el proceso.	16
Figura 2.4. Esquema del proceso de corte, a) arranque de material en macromecanizado, b) arranque de material en micromecanizado.	19
Figura 2.5. Esquema de los efectos del ancho mínimo de viruta basado en (Chae, Park, and Freiheit 2006).	20
Figura 2.6. Diagrama de los tipos de métodos para la obtención de modelos de corte en mecanizado.	22
Figura 2.7. Diagrama de las fuerzas del proceso de corte ortogonal (Merchant 1945).	23
Figura 2.8. Diagrama de simulación molecular basado en (Cai, Li, and Rahman 2007).	27
Figura 2.9. Formación de viruta durante el proceso de corte usando métodos Eulerianos (Raczy, Altenhof, and Alpas 2004).	29
Figura 2.10. Entrada de herramienta en análisis de elementos finitos usando un método Euleriano-Langrariano, con una profundidad de corte de 0.3mm (Gao, Ko, and Lee 2018).	29
Figura 2.11. Configuración de micro fresado esférico propuesto por (Graham, Park, and Park 2014).	32
Figura 2.12. Clasificación de herramientas de corte según la cantidad de filos.	33
Figura 2.13. Esquemático del proceso de microlimado, a) Giros en los ejes (x, y, z) de la herramienta a ser controlados, b) Orientación de la herramienta por una trayectoria determinada donde (v) es el vector de velocidad.	36
Figura 3.1. Planos de herramienta según la norma ISO 3002 a) Planos de referencia Pr, Pf, Pp, b) Planos de referencia Ps, Po, Pn.	38

Figura 3.2. Definición de los ángulos para el análisis, a) ángulo de inclinación λ_s , b) ángulo de posicionamiento χ_r , c) ángulo de desprendimiento γ_n .	40
Figura 3.3. Esquema del proceso de micromecanizado de filo único.	41
Figura 3.4. Esquema del área de corte en términos de la profundidad de corte ($a_p = h$) y el espesor de corte (a_e), a) Área de corte vista desde P_r , b) Área de corte vista desde P_s .	42
Figura 3.5. Esquema del primer procedimiento experimental para la captura de fuerzas en el proceso de corte de filo único.	44
Figura 3.6. Fotografía de la herramienta de corte, vista frontal y lateral, $\chi_r = K_r = 60^\circ$.	45
Figura 3.7. Resultados de corte de filo único con área de corte y ángulo de desprendimiento constante, variando la velocidad de corte.	46
Figura 3.8. Resultados de corte de filo único con área de corte variable, con velocidad de corte y ángulo de desprendimiento constante.	48
Figura 3.9. Clasificación del ángulo de desprendimiento según su inclinación, a) ángulo negativo, b) ángulo neutro, c) ángulo positivo.	49
Figura 3.10. Resultados de corte de filo único con área de corte y velocidad de corte constante, variando ángulo de desprendimiento en un rango de ángulos positivos.	50
Figura 3.11. Resultados de corte de filo único con área de corte y velocidad de corte constante, variando ángulo de desprendimiento en un rango de ángulos negativos.	51
Figura 3.12. Máquina herramienta de 4 grados de libertad para mecanizado de filo único.	55
Figura 3.13. Configuración del sistema de visión, a) Render del CAD del sistema de visión, b) Sistema de visión implementado en la máquina herramienta.	56
Figura 3.14. Pruebas de mecanizado con máquina de 4 grados de libertad, a) Logo del grupo de investigación de ingeniería de procesos de fabricación (IPF), b) Acercamiento al logo mecanizado con una superposición de algunas de las trayectorias de mecanizado programadas.	57
Figura 3.15. Micro mecanizado en máquina de 4 grados de libertad, a) geometría tipo “puzle” con pasadas de $10\ \mu\text{m}$, b) Matriz rectangular con paredes de $20\ \mu\text{m}$ de espesor.	57

Figura 3.16. Diagrama del procedimiento experimental para la captura de fuerzas en el proceso de corte de filo único en máquina de 4 grados de libertad.	58
Figura 3.17. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	60
Figura 3.18. Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	61
Figura 3.19. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 20\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	63
Figura 3.20. Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 20\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	64
Figura 3.21. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 10\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	66
Figura 3.22. Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 10\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	67
Figura 3.23. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 5\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	68
Figura 3.24. Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 5\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$	69
Figura 3.25. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 30\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$	71
Figura 3.26. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$	72
Figura 3.27. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 10\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$	73
Figura 3.28. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 5\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$	74
Figura 3.29. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 30\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$	76
Figura 3.30. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$	77
Figura 3.31. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 10\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$	78
Figura 3.32. Fuerzas de corte ($F_x = F_c, F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx}, K_{sy}) con $a_p = 5\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$	79

Figura 3.33. Comparativa visual del acabado superficial de la mínima sección de corte lograda con diferentes inclinaciones.	80
Figura 4.1. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con datos experimentales ($a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 0$).....	84
Figura 4.2. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con datos experimentales ($a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 0$).....	86
Figura 5.1. Ángulos de corte del proceso de micromecanizado con herramienta de filo único y definición de filo principal de corte (E_m), filo auxiliar de corte (E_s) y superficie de flanco (E_r).....	89
Figura 5.2. Zonas de mecanizado definidas por el ángulo de inclinación.....	90
Figura 5.3. Zonas de mecanizado definidas por el ángulo de posicionamiento.	92
Figura 5.4. Clasificación de trayectorias de corte en el micromecanizado de filo único.....	95
Figura 5.5. Ejemplo de las diferentes zonas de mecanizado en función de las trayectorias seleccionadas.	98
Figura 6.1. Máquina herramienta híbrida de 6 grados de libertad para el proceso de micromecanizado con herramientas de filo único.	100
Figura 6.2. Trayectorias lineales a diferente inclinación para la comprobación del modelo de corte.	101
Figura 6.3. Fuerzas de corte del experimento comparadas con el modelo propuesto (línea punteada).	102
Figura 6.4. Esquema de la trayectoria de corte en conjunto con las zonas de mecanizado.	103
Figura 6.5. Segmentos de la trayectoria de mecanizado.....	104
Figura 6.6. Resultados de las fuerzas de corte en la trayectoria realizada comparadas con el modelo de corte propuesto.....	105

Figura 6.7. Comparación de la geometría de corte programada con la geometría obtenida. a) Acabado superficial de las zonas de mecanizado óptima y no óptima, b) acabado superficial sin orientación de la herramienta de corte.	106
Figura 6.8. Rugosidad de la superficie mecanizada dentro de la zona óptima.....	107
Figura 6.9. Medidas de la geometría obtenida por medio de microscopio DinoLite.....	107
Figura A.1. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 0$	113
Figura A.2. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10\mu m$ y $a_p = 5\mu m$, $\lambda_s = 0$	114
Figura A.3. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 4$	115
Figura A.4. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10\mu m$ y $a_p = 5\mu m$, $\lambda_s = 4$	116
Figura A.5. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 8$	117
Figura A.6. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10\mu m$ y $a_p = 5\mu m$, $\lambda_s = 8$	118
Figura B.1. Esquema de la corrección de la trayectoria tomando en cuenta la posición de la punta de la herramienta con el sistema de visión artificial.	119
Figura B.2. configuración de la maquina hibrida de 6 grados de libertad para corte de filo único. a) cabezal de la herramienta con el sistema de visión montado. b) Configuración mecánica paralela. c) Control CNC y PC para el análisis y monitoreo del proceso.....	121
Figura B.3. Sistemas de coordenadas de los diferentes elementos de la máquina herramienta de 6 grados de libertad.	120
Figura B.4. Diagrama de flujo del procesamiento de información del sistema de visión artificial estereoscópico.	122

- Figura B.5.** Las diferentes etapas del procesamiento de imagen, a) Imagen original, b) tonos de grises, normalización del histograma y filtro Gaussiano, c) Imagen inversa, d) Limpieza de la imagen e identificación de la herramienta, e) Localización de contornos y esquinas, f) Alineación de la herramienta y localización de la punta de la herramienta. 123
- Figura B.6.** Diagrama esquemático de la trayectoria y la rotación de la herramienta. 124

Nomenclatura

a_e	Ancho de corte.
a_p	Profundidad de corte
a_r	Angulo de incidencia
C	Eje de rotación en CNC FAGOR® 8070
c_a	Punto de supuesto corte con la herramienta de filo único.
E_m	Filo principal
E_r	Superficie del flanco
E_s	Filo secundario
F	Fuerza resultante de corte
F_c	Vector de la fuerza de corte
F_x	Componente x de la fuerza de corte
F_y	Componente y de la fuerza de corte
F_z	Componente z de la fuerza de corte
f_d	Avance en la dirección de corte
f_l	Avance lateral
k_0	Coeficiente de corte modelo.
k_1	Coeficiente de corte modelo.
k_2	Coeficiente de corte modelo.
k_s	Presión específica de corte.
K_{cx}	Presión específica de corte de la componente x
K_{cy}	Presión específica de corte de la componente y

K_{cz}	Presión específica de corte de la componente z
m	Coeficiente exponencial de la profundidad de corte.
O_1	Origen del sistema de coordenadas del sistema general en la máquina herramienta de seis grados de libertad
O_2	Origen del sistema de coordenadas de la cama X-Y en la máquina herramienta de seis grados de libertad
O_3	Origen del sistema de coordenadas de la herramienta en la máquina herramienta de seis grados de libertad
P	Trayectoria de la herramienta de corte de filo único
P_f	Plano de trabajo supuesto
P_n	Plano normal al filo
P_o	Plano ortogonal
P_p	Plano de retroceso
P_r	Plano de referencia
P_s	Plano tangente
P_x	Coordenada x de la trayectoria de corte
P_y	Coordenada y de la trayectoria de corte
P_z	Coordenada z de la trayectoria de corte
R_{ct}	Sistema de coordenadas de la herramienta de corte en la máquina herramienta de seis grados de libertad
R_b	Sistemas de coordenadas general de la máquina herramienta de seis grados de libertad
R_w	Sistema de coordenadas de la cama X-Y en la máquina herramienta de seis grados de libertad
T	Tiempo

$\mathbf{v_c}$	Vector de velocidad
$\mathbf{X}$	Eje X en el CNC FAGOR® 8070
X_1	Eje x en el sistema de coordenadas general en la máquina herramienta de seis grados de libertad
X_2	Eje x en el sistema de coordenadas de la cama X-Y en la máquina herramienta de seis grados de libertad
X_3	Eje x en el sistema de coordenadas de la herramienta en la máquina herramienta de seis grados de libertad
$\mathbf{Y}$	Eje Y en el CNC FAGOR® 8070.
Y_1	Eje y en el sistema de coordenadas general en la máquina herramienta de seis grados de libertad
Y_2	Eje y en el sistema de coordenadas de la cama X-Y en la máquina herramienta de seis grados de libertad
Y_3	Eje y en el sistema de coordenadas de la herramienta en la máquina herramienta de seis grados de libertad
Z_1	Eje z en el sistema de coordenadas general en la máquina herramienta de seis grados de libertad
Z_2	Eje z en el sistema de coordenadas de la cama X-Y en la máquina herramienta de seis grados de libertad
Z_3	Eje z en el sistema de coordenadas de la herramienta en la máquina herramienta de seis grados de libertad
$\mathbf{Z}$	Eje Z en el CNC FAGOR® 8070.
α	Angulo de giro de Euler alrededor del eje X
β	Ángulo de giro de Euler alrededor del eje Y
γ	Ángulo de giro de Euler alrededor del eje Z

γ_n	Ángulo de desprendimiento de la herramienta de filo único.
γ_{ns}	Ángulo de ataque seleccionado
γ_{ncr}	Ángulo de ataque crítico no óptimo
γ_{ncre}	Angulo de ataque crítico no utilizable
δ_x	Componente X del vector de deflexión en la punta de la herramienta.
δ_y	Componente Y del vector de deflexión en la punta de la herramienta.
δ_z	Componente Z del vector de deflexión en la punta de la herramienta.
λ_s	Angulo de inclinación de la herramienta de corte de filo único.
χ_r	Ángulo de posición
χ_{rs}	Ángulo de posición seleccionado
χ_{rcr}	Ángulo de posición crítica

Resumen

Este trabajo presenta el análisis y modelado del proceso de micromecanizado con herramienta de filo único, el cual se propone como una tecnología alternativa en micro fabricación por arranque de material. El análisis se basa en las características geométricas de la herramienta para encontrar los ángulos que tienen mayor influencia en las fuerzas de corte del proceso. Se analiza un amplio gradiente de ángulos y posiciones, así como diferentes profundidades y anchos de corte. Los datos obtenidos son la base del modelo de micromecanizado que se obtiene por medio de un método mecanicista, el cual por medio de la presión específica de corte describe los fenómenos característicos del proceso. Se exploran los límites de aplicación de un modelo mecanicista en el contexto del micro corte, el cual involucra fenómenos físicos que son complicados de cuantificar de una manera práctica, el modelo obtenido es de fácil implementación en sistemas industriales de control (CNC).

Se plantean y desarrollan una serie de estrategias de micromecanizado para garantizar el funcionamiento adecuado del modelo de corte, se clasifican diferentes zonas en función de la trayectoria de corte y se obtienen rangos en los cuales los resultados de mecanizado son óptimos.

El modelo y las estrategias de corte se prueban en una máquina herramienta híbrida de seis grados de libertad diseñada para sacar el mayor provecho del proceso propuesto, con los resultados obtenidos se concluye que el modelo y que el micro corte con herramienta de filo único son una sólida alternativa a las tecnologías de micromecanizado existentes.

Abstract

This work presents the analysis and modelling of the micro cutting process with a single edge tool, this process is introduced as an alternative technology in the macro machining branch focused on material removal. The analysis is based on the geometrical characteristic of the cutting tool to find which angles have the most influence in the cutting forces of the process. A wide range of angles and positions are evaluated, as well as widths and depths of cut, the collected data is the basis of a micro cutting model based on a mechanistic method, which by means of the specific cutting pressure describes the characteristic phenomena of the process. The limits of the mechanistic model are explored in the micro machining context, which involves physical phenomena that are difficult to quantify in a practical manner, the obtained model can be easily implemented in industrial control systems (CNC).

Several micro machining strategies are developed to guarantee the correct function of the proposed model, different zones are classified in function of the cutting trajectory and a range of conditions are obtained to obtain optimal cutting results.

The cutting model and the micro machining strategies are tested in a specially designed six degree of freedom machine tool, which can take full advantage of the proposed process, with the obtained results it is concluded that the model and the micro cutting with single edge tool are a solid alternative to the existing available micro machining technologies.

Introducción

1.1. Ámbito de aplicación de la Tesis

En el área de la microfabricación, dentro de las técnicas de desprendimiento de material, dada la necesidad de crear geometrías que cuenten con alta precisión geométrica y un buen acabado superficial, hay una gran área de oportunidad de desarrollo de nuevas tecnologías que logren igualar y superar a las tecnologías existentes, en este trabajo se propone al micromecanizado con herramientas de filo único como una tecnología alternativa, viable y competente a las que actualmente existen. El desarrollo y estudio de las maquinas herramienta en conjunto con el proceso de corte es fundamental para el desarrollo de dicha tecnología, las fuerzas de corte son fundamentales para encontrar las características clave del proceso.

Las fuerzas de corte nos permiten extraer información esencial, como la geometría del corte y sus parámetros de mecanizado, de estas fuerzas también dependen los acabados superficiales, la precisión de la pieza a mecanizar y condiciones de trabajo de la máquina herramienta.

La estimación de fuerzas en el micromecanizado es una tarea compleja, el proceso de corte se ve sometido a la influencia de fenómenos tales como el efecto filo, el radio de la herramienta, efectos derivados por la fricción, penetración entre otros; los cuales causan fluctuaciones en las magnitudes de la fuerza. También se requiere explorar los límites en los cuales los fenómenos del macro mecanizado son aplicables durante las operaciones de micromecanizado, por lo que, un modelo de corte mecanicista nos permitiría obtener esta información de una manera práctica. Este modelo debe considerar las variables de mecanizado (ángulos de la herramienta) y de esta manera poder aplicar estrategias de mecanizado que nos ayuden a obtener el máximo rendimiento de la máquina herramienta y del modelo de corte.

Este trabajo consta de dos ejes principales, la obtención de un modelo de fuerzas de corte de filo único mecanicista y su comprobación en una máquina herramienta especialmente diseñada para el proceso.

Para validar el modelo, el presente trabajo analiza el proceso de corte de filo único a diferentes escalas, hasta llegar a sus límites aplicables en micro corte. Teniendo las capacidades del modelo, se proponen estrategias de micromecanizado las cuales están diseñadas para sacar el mayor provecho del proceso.

1.2. Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis es obtener el *Modelado y Análisis del Proceso de Micromecanizado realizado con Herramientas de Filo Único*.

El modelo se construye en base a estrategias mecanicistas, las cuales engloban las características más cruciales del microcorte de filo único, lo cual lleva a un análisis de las posibles estrategias de mecanizado tomando en cuenta las capacidades de la máquina herramienta.

A continuación, se listan los objetivos específicos de este trabajo:

1. Realizar un estado del arte de los modelos de corte y su aplicación en microfabricación.
2. Definir las características principales del proceso de corte con herramienta de filo único y analizar el comportamiento de la herramienta durante el proceso.
3. Obtener un modelo de corte mecanicista usando una máquina de micromecanizado de 4 ejes diseñada para herramientas de filo único.
4. Comprobar el modelo de corte propuesto en una máquina de 6 grados de libertad especialmente diseñada para proceso de corte de filo único.
5. Analizar las estrategias de mecanizado que se pueden aplicar para obtener resultados óptimos con el proceso propuesto de micro corte con herramienta de filo único.

1.3. Estructura de la tesis

El trabajo presentado se divide en siete capítulos, el primero de ellos dedicado a la introducción de este.

El capítulo dos explora el estado del arte de la micro fabricación, con un enfoque en los procesos de micro mecanizado basados en arranque de material, así como los diferentes métodos de modelado del corte y las diferentes herramientas existentes.

En el capítulo tres se analiza el proceso de micro corte con herramienta de filo único, este análisis consiste en determinar las relaciones entre las condiciones geométricas de la herramienta (ángulos), las características del proceso de micro mecanizado (velocidad de corte, profundidad y ancho de corte) y su influencia en las fuerzas de corte. Con las fuerzas del proceso, basado en un enfoque mecanicista se analiza la presión específica de corte en un rango variado de condiciones que engloban las posibles características del micro corte de filo único en una trayectoria determinada.

En el capítulo cuatro se propone un modelo de micro corte de filo único basado en los datos obtenidos del capítulo anterior, los datos experimentales se comparan con los datos teóricos del modelo y se explora el límite aplicable para un modelo basado en el método mecanicista dentro del contexto del micromecanizado con herramienta de filo único, el modelo es capaz de describir de manera confiable el proceso de dimensiones de corte de hasta $3\mu\text{m}$.

El capítulo cinco consiste en el desarrollo de estrategias de mecanizado para el proceso de micro corte de herramienta de filo único, debido a las características específicas del proceso es necesario seguir unas estrategias para garantizar un resultado óptimo de mecanizado, las estrategias se basan en el análisis de la inclinación y la posición de la herramienta para obtener una buena geometría, así como la consideración de sus filos para evitar colisiones mecánicas.

En el capítulo seis se presenta la comprobación experimental del modelo de corte propuesto, así como de las estrategias de mecanizado propuestas con anterioridad en una maquina especialmente diseñada para el proceso, la cual cuenta con seis grados de libertad.

El ultimo capitulo presenta las conclusiones a las cuales se llegan el trabajo presentado, así como las líneas futuras de investigación.

Estado del Arte

2.1. Preliminar

La microfabricación ha sido la protagonista del desarrollo de nuevas tecnologías de producción desde mediados del siglo pasado, la invención del transistor abrió nuevos horizontes que han marcado la pauta para el desarrollo de productos miniaturizados con alta precisión. La alta demanda de estos productos en ramas como la automoción (reducción de material, miniaturización de componentes, desarrollo de materiales), óptica (micro lentes, micro pulido), comunicaciones (microchips), aviónica (instrumentación), biotecnología (bio chips, microplacas), electrónica (microcircuitos) entre otras, llama al desarrollo de tecnologías nuevas y técnicas refinadas para cumplir con las demandas del mercado.

El desarrollo de microsistemas eléctrico-mecánicos (MEMS) ha dado lugar a que tecnologías tales como grabado por medio de agua, grabado por medio químico, grabado laser, LIGA, litografía por rayos X entre otros, las cuales son las que han tenido mayor crecimiento en los últimos años. Estas tecnologías tienen como mayor inconveniente que están enfocadas a materiales específicos, tales como el silicio, y

tienen una restricción alta en cuanto a las geometrías que se pueden obtener, pues no se pueden obtener superficies reales de forma libre (3D) ([Liu et al. 2004](#)).

Para poder mecanizar otro tipo de materiales y obtener superficies 3D se han adaptado tecnologías usadas en macrofabricación, tales como el mecanizado por descarga eléctrica (EDM), mecanizado por ultrasonidos (USM) y los procesos de desprendimiento de material (ej. Torneado, fresado) ([Masuzawa 2000](#)). Estas tecnologías comparadas con las antes mencionadas son más costeables y han sido ampliamente estudiadas a nivel macrométrico, lo cual las hacen muy atractivas para su desarrollo dentro de la micro fabricación.

En los procesos de arranque de material en microfabricación (micro corte) se cuenta con dos ramas principales de investigación, la primera es la miniaturización de los procesos de arranque de material (herramientas, equipo, y proceso) y los efectos que esto conlleva, la segunda es el mecanizado de ultra precisión, (especialmente SPDT) y que se enfoca en la mecánica del proceso de corte ([Huo and Cheng 2013](#)).

[Câmara et al. \(2012\)](#), dentro de las operaciones de arranque de material se define al micromecanizado basándose en las dimensiones de la herramienta usada, la cual se encuentra en un rango de 1 a 1000 μm , también cabe destacar la importancia de la relación de aspecto entre el tamaño de grano del material a mecanizar, el ancho de viruta y el radio de filo de la herramienta, el cual debe de estar dentro de un rango equiparable. También se puede definir el micro corte por medio de las geometrías obtenidas ([Masuzawa and Tönshoff 1997](#)) donde la frontera entre macro y micro mecanizado se define alrededor de 200 μm , cabe destacar que esta frontera se mueve dependiendo del desarrollo tecnológico de la época.

Una de las mayores limitantes del micro corte es la herramienta, debido a la naturaleza del proceso , obtener herramientas con alta precisión es una tarea difícil (Kirsch et al. 2017). También se debe de tomar en cuenta el material de la herramienta, se ha demostrado que las herramientas de diamante tienen mayor precisión que las de acero duro, pero su fabricación conlleva el uso de técnicas avanzadas y costosas (Park et al. 2010).

El equilibrio ideal entre la complejidad del proceso, la geometría de la herramienta, la precisión de la máquina y la practicidad de su implementación no es una tarea sencilla, esto abre un gran campo de exploración de tecnologías y nuevos horizontes. Para poder introducir una nueva tecnología de micro corte es necesario corroborar la eficiencia y la alta precisión requerida por el mercado, la durabilidad y precisión de las herramientas utilizadas y conocer de manera contundente la relación entre el material a mecanizar y las variables de mecanizado, este último involucra ser capaz de comprender , interpretar y controlar los parámetros del proceso , y poder encontrar similitudes y diferencias con los fenómenos que se presentan en el macromecanizado.

Para obtener este conocimiento es necesario tener un proceso donde la herramienta sea de alta precisión y pueda ser controlada en su totalidad durante el proceso, que la cinemática y dinámica de la máquina herramienta cumpla con los requerimientos de micro corte (alta rigidez, alta precisión de posicionamiento) y que el costo sea competitivo comparado con las tecnologías disponibles.

2.2. Micromecanizado

La clasificación de las tecnologías de microfabricación (Piljek, Keran, and Math 2014) coloca al micromecanizado como aquellas tecnologías basadas en el arranque de material (micro corte) , las cuales están basadas en la miniaturización de procesos convencionales de formación de viruta Figura 2.1.

Figura 2.1. Clasificación de las tecnologías de micro fabricación basado en (Piljek, Keran, and Math 2014).

El micromecanizado emerge en las últimas décadas con mucha fuerza por el interés de la industria y del sector de investigación. La introducción de materiales tales como super aleaciones, cerámicos y composites ha creado la necesidad de crear y adaptar nuevas técnicas de micromecanizado con las finalidad de poder satisfacer las necesidades de los diferentes sectores , tales como el sector aeronáutico para la fabricación de orificios de ventilación en las paletas de las turbinas, o la elaboración de micro agujas para el sector biomédico, o las micro perforaciones necesarias para la inyección de combustible en los automóviles, otras aplicaciones se pueden apreciar en la Tabla 2.1 basada en (Boswell, Islam, and Davies 2018).

Tabla 2.1.
Aplicaciones de Microfabricación.

Elemento	Geometría	Micro proceso	Material
Micro-Domos	Menor a un 1mm de diámetro	Micromecanizado	Molibdeno
		Micromoldeado	Cobre
		Microestampado	Aluminio
			Acero
Micro-Engranés	Menor a un milímetro de diámetro, con elementos de hasta 10µm	Microestampado	
		Microrepujado	Metales y
		Micromecanizado	polímeros
		Microextrusión	
Micro-Ejes	Menor a 1mm de diámetro	EDM	
		Micromecanizado	Acero y
		Microextrusión	aleaciones
Micro-Tornillos	Diámetro de entre 10µm a 50µm	Micromecanizado	
		Microforjado	
		Microextrusión	Metales
Micro ejes para engranes	Elementos de entre 30 y 40µm	Micromecanizado	varios
		Microforjado	
		Microextrusión	
		EDM	Acero para
Micro-Moldes y dados	Orificios internos de menos de 1mm	Micromecanizado	herramientas,
		Sinterizado	Acero
		EDM	Inoxidable

El mecanizado en general se puede clasificar según las dimensiones y sus tolerancias (Wirtz 1991), esta relación se muestra en la Figura 2.2.

Figura 2.2. Clasificación del mecanizado según sus tolerancias y dimensiones.

Para que un proceso de mecanizado pueda considerarse dentro de la escala micro sus dimensiones se deben encontrar de entre un milímetro a un micrómetro y con tolerancias en micrómetros, lograr estas dimensiones y trabajar con las diferentes variedades de materiales no es tarea sencilla, para esto se han adaptado tecnologías derivadas del mecanizado convencional.

Por la naturaleza de la miniaturización de estos procesos, las principales características a tomar en cuenta están relacionadas con la precisión de la geometría de la herramienta, su interacción con el material a mecanizar, la influencia de la precisión de la máquina herramienta en el proceso de corte (errores causados por vibraciones y desgastes) y el efecto de la misma a causa de la respuesta del control a los esfuerzos provocados por el corte (Alting et al. 2003).

Por su versatilidad, el fresado es una de las tecnologías de referencia en micro mecanizado, esto se debe a que comparte muchos de los atributos del fresado convencional, lo cual ha propiciado su estudio y desarrollo. El micro fresado es capaz tanto de mecanizar materiales duros (Cheng et al. 2010), como materiales blandos (Chen et al. 2018) , sin embargo , la variable clave del desarrollo de esta tecnología es el estudio y desarrollo de las herramientas de corte , centrándose en sus filos de corte (Uhlmann et al. 2016), y el tipo de recubrimientos usados (De Cristofaro et al. 2012) . Las herramientas más comúnmente usadas están elaboradas con acero de herramienta (tungsteno), esto se debe a su alta dureza y alta resistencia cuando se someten a altas temperaturas , las herramientas de diamante se usan cuando se requieren micro cortes de alta precisión debido a su alta calidad de filo se obtienen los mejores acabados superficiales (Yuan, Zhou, and Dong 1996) , pero no son apropiadas al mecanizar materiales ferrosos por el alto desgaste que se suele obtener, para compensar esto se han creado micro herramientas de diamante policristalino que aumentan su durabilidad y su vida útil (Zhong et al. 2018) , las cuales tienen como desventaja que son difíciles de fabricar.

Mientras que en el mecanizado convencional el desgaste de la herramienta no es una variable critica, dentro del micromecanizado es primordial , diferentes técnicas se han implementado para su monitoreo , como sensores acústicos, los cuales detectan algún tipo de anomalía en los patrones de vibración (König, Kutzner, and Schehl 1992) teniendo como desventaja que deben de ser colocados muy cerca de la herramienta y de la pieza a mecanizar, otra técnica para monitorear esta variable es

por medio de las fuerzas de corte ([I. N. Tansel et al. 2000](#)), la cual para materiales blandos (aluminio) funcionan muy bien, pero para materiales duros (aceros) generalmente la herramienta rompe antes de poder identificar el desgaste.

Mantener el desgaste de la herramienta a lo más mínimo posible es crucial en operaciones de micromecanizado, pues en gran parte de que mantenga su filo y sus condiciones iniciales dependerá la precisión de la geometría obtenida, su monitoreo en tiempo real no es tarea fácil, pues las condiciones de corte varían con respecto al tiempo, diferentes técnicas se han propuesto para mejorar la resistencia de las herramientas de microfresado, una de ellas es el endurecimiento por medio de laser ([Ogawa, Tanabe, and Nakagawa 2014](#)) el cual mejora sus propiedades de resistencia, pero reduce la geometría de filo de corte que se puede lograr, pues depende del tipo de laser utilizado, un efecto similar se obtiene con recubrimientos, los cuales limitan el radio de punta pero mejoran sus propiedades mecánicas ([Jayal and Balaji 2009](#)), además de la reducción de costos, pues no es necesario hacer toda la herramienta del mismo material ([Aramcharoen et al. 2008](#)), y que además ayudan reducir la temperatura producida por el corte ([Özel et al. 2011](#)).

Otro elemento que afecta el desgaste de la herramienta es la velocidad con la que gira, a más velocidad, mayor remoción de material, pero a su vez causa un desgaste más acelerado ([Zhu et al. 2008](#)), este desgaste acelerado obligara a incrementar las fuerzas de corte, lo que inevitablemente llevara a la destrucción de la herramienta, este es uno de los mayores problemas de esta tecnología, pues en general, las micro fresadoras son de alta velocidad ([NISHIKAWA, YOSHIMOTO, and SOMAYA 2012](#)),

lo que induce vibraciones las cuales causan más problemas que las fuerzas producidas por el mismo corte del material.

El diseño de la herramienta es importante pues de este dependerá el área de corte que se podrá cortar, la miniaturización directa de herramientas de micro fresado da como resultado un cierto límite de precisión ([Vasile et al. 1996](#)), por lo que lograr las mismas geometrías de herramienta que en el fresado convencional es costoso y necesita de mayor estudio.

Con geometrías pequeñas de herramienta el problema de la deflexión es más evidente, estas deflexiones causan errores de posicionamiento los cuales se pueden traducir en baja precisión y malos acabados superficiales, estas deflexiones no solo dependen de la herramienta, si la máquina herramienta no cuenta con la rigidez suficiente se incrementara este efecto ([Fortgang et al. 2011](#)).

Para minimizar los errores de posicionamiento es fundamental contar con máquinas herramienta de alta precisión, los actuadores lineales se usan comúnmente para mecanizado de ultra precisión , comparados con los mecanismos tradicionales de husillo de bolas, los actuadores lineales no acumulan error por fricción o por su acoplamiento mecánico, también son capaces de lograr altas aceleraciones ([Rooks 2004](#)). Las ventajas de estos elementos es evidente, pero se debe tomar en cuenta el alto costo asociado con estos, por lo que es necesario estudiar las necesidades que la máquina herramienta tiene que cubrir para obtener los mejores resultados ([Takeuchi et al. 2000](#)).

El micromecanizado (micro corte) tiene el potencial de producir formas libres en tres dimensiones en varios materiales, quedando demostrado que el conjunto de los elementos como la herramienta de corte, la configuración de la máquina herramienta y su control ([Wang et al. 2015](#)) junto con el material a mecanizar son las variables principales para lograr micromecanizados de alta precisión, así como mantener constantes las condiciones del proceso de mecanizado garantiza que la máquina herramienta sea capaz de obtener micro geometrías de calidad.

2.3. Proceso de corte

Conociendo las características del micromecanizado , se puede ver que las fuerzas de corte son un indicador claro del proceso, las causas por las cuales las fuerzas de corte se amplifican o disminuyen son variadas tal y como se representa en la [Figura 2.3](#), estas causas darán paso a diferentes efectos en el proceso , los cuales degradan el nivel de desempeño, y a su vez, la calidad del mecanizado que se está realizando.

Figura 2.3. Diagrama de relación entre las causas y los efectos de las fuerzas de corte en el proceso.

Como efectos de las fuerzas de corte se pueden tener vibraciones, las cuales son causadas por la interacción de la herramienta y el material, dependiendo de la combinación de estos se pueden producir vibraciones que se pueden predecir y que son efectos de las condiciones de mecanizado ([Noori-Khajavi and Komanduri 1995](#)), la alta temperatura también es efecto de las fuerzas de corte , la temperatura tiene

influencia en la vida útil de la herramienta, su estimación es complicada, pues requiere la combinación de modelos numéricos con análisis de elementos finitos ([Childs et al. 2015](#)), y su implementación en el proceso no es práctico.

El desgaste de la punta de la herramienta es uno de los efectos más notorios, el incremento de las fuerzas de corte disminuye el filo de la misma aunado a un aumento de la presión específica de corte al disminuir el área de corte ([Mekid, Laoui, and Patel 2011](#)), esto impacta de manera directa la precisión y acabado de las piezas mecanizadas.

En cuanto a las emisiones acústicas, son un efecto directo que describe las fuerzas generadas en el proceso, se ha encontrado que hay una relación entre las emisiones acústicas y la cantidad de material removido, una relación parecida con la presión específica de corte ([Bifano and Yi 1992](#)), este tipo de relaciones son evidencia de que la clave para monitorizar un proceso de micromecanizado es la evaluación de las fuerzas de corte en el proceso, con esto en mente se deben estudiar las causas que provocan estas variaciones en la fuerza de corte.

Para poder tener una idea más clara de cómo estas causas afectan las fuerzas de corte se han desarrollado modelos matemáticos, los cuales relacionan por medio de datos analíticos o experimentales estas con las fuerzas de corte, un método que mezcla datos experimentales con simulaciones por medio de algoritmos genéticos es presentado por ([Bao and Tansel 2000](#)) donde relaciona el desgaste de la herramienta con las condiciones de corte, su base analítica es la simulación que se obtiene con el algoritmo genético, y los datos experimentales los toma usando de base el valor de la fuerza cuando la herramienta rompe debido a la deflexión excesiva causada por las condiciones de corte (área de corte).

La formación inadecuada de viruta puede provocar fallos prematuros en la herramienta, pequeños pedazos de material se pueden quedar atrapados o inclusive fusionados en el filo de corte (filo recrecido), lo que causa que las fuerzas de corte se incrementen, estudiando datos experimentales y aplicando promedio de segmentos se ha podido llegar a predecir con 0.32 segundos de adelanto las fuerzas que se pueden generar en el proceso ([I. Tansel et al. 1998](#)), el desgaste no uniforme de la herramienta y las virutas atrapadas hacen que cambien las condiciones de mecanizado, este cambio induce fatiga en la herramienta la cual falla en un determinado momento, también se ha identificado claramente que un factor determinante en el aumento de las fuerzas en el proceso es la variación en la profundidad de corte ([Rahman, Senthil Kumar, and Prakash 2001](#)).

Una de las causas que más afectan a las fuerzas de corte en el proceso de micromecanizado es la relación del tamaño de la punta de la herramienta con respecto al tamaño de viruta sin deformar que se establece en el proceso, aquí es donde los problemas de miniaturizar el fresado son evidentes, la [Figura 2.4a](#) muestra un esquema del arranque de material en macromecanizado, donde el vector (V) indica la dirección de la velocidad de corte, en este ejemplo la punta de la herramienta no es crucial, pues la profundidad de corte (h) es relativamente amplia, mientras que en el caso del micromecanizado ([Figura 2.4b](#)), la profundidad de corte es muy pequeña, por lo que del radio de punta dependerán efectos como la formación de viruta, el efecto filo y el acabado superficial que se pueda obtener.

Figura 2.4. Esquema del proceso de corte, a) arranque de material en macromecanizado, b) arranque de material en micromecanizado.

El efecto filo sumado a la acumulación de material en la punta hace que las fuerzas en el micromecanizado se disparen, comparado con el macromecanizado, la punta de la herramienta no tiene una escala consistente, el diámetro de la herramienta varía mucho con respecto a la punta. En micromecanizado usualmente el ancho de viruta no formada es menor que el radio de punta, esto causa que el ángulo de filo de corte tenga un efecto parecido al de una herramienta de corte con ángulo de filo negativo (Waldorf 2006). Por medio de un análisis de elementos finitos (Woon et al. 2008) se ha definido que el radio de viruta no formada con respecto al radio de punto de la herramienta de corte es un elemento importante que afecta la deformación del material y los esfuerzos que se producen en la herramienta, pero por la naturaleza del análisis de elementos finitos (FEM), su implementación en un proceso de corte no es práctico, por lo que se limita a simulaciones fuera de línea.

Conociendo las causas y los efectos de las fuerzas de corte se pueden construir modelos matemáticos los cuales pueden ayudar a tener una descripción más clara de

los fenómenos que involucran la interacción de las variables del proceso mecanizado, la herramienta, la máquina y los materiales para crear una geometría determinada.

2.4. Modelos de corte

La relación que hay entre la punta de la herramienta y el ancho de viruta no formada es una de las causas primordiales de las fuerzas en el mecanizado, el fenómeno ligado a esta relación es la causante de una serie de fenómenos que se presentan en el micromecanizado, cuando el radio de punta es menor al ancho de viruta que se pretende cortar, no es posible la formación de viruta durante el corte, entonces a este mínimo valor de corte se le define como ancho mínimo de viruta (Ikawa, Shimada, and Tanaka 1992), diferentes efectos se pueden observar con este fenómeno, (Chae, Park, and Freiheit 2006) propone un esquema básico (Figura 2.5) de cómo se puede o no formar viruta en el proceso de corte en micromecanizado.

Figura 2.5. Esquema de los efectos del ancho mínimo de viruta basado en (Chae, Park, and Freiheit 2006).

El caso representado en la figura (Figura 2.5a) nos muestra el efecto al intentar mecanizar una profundidad de corte (h) inferior a la dimensión que tiene el radio de punta de la herramienta (r_p), el resultado es una deformación elástica que genera fuerzas en el proceso, pero que no remueve ninguna cantidad de material, un caso

interesante es cuando la profundidad de corte ronda las mismas dimensiones que el radio de punta de la herramienta ([Figura 2.5b](#)), se lograra hacer una remoción de material , pero que no equivale a la profundidad de corte deseada, parte de las fuerzas producidas se traducen en una deformación plástica, el caso mostrado en la [Figura 2.5c](#) es el típico caso de mecanizado con formación de viruta adecuada, donde la remoción de material es equivalente a la profundidad de corte debido a que la profundidad de corte es mayor al radio de punta de la herramienta. Una selección adecuada de la profundidad de corte en relación con la punta de la herramienta es importante para minimizar las deformaciones plásticas y lograr la remoción de material deseada, este dato no es del todo claro, el uso de simulación dinámica molecular ha logrado determinar que es necesario un mínimo de 5% para poder desprender material ([Shimada et al. 1993](#)), pero a su vez en un trabajo con herramientas de diamante se estimó que se requiere un mínimo del 20% ([Yuan, Zhou, and Dong 1996](#)).

Una de las primeras representaciones del modelado de este efecto consiste en un análisis geométrico matemático de la herramienta en conjunto con un modelo ortogonal de corte ([Kim and Kim 1995](#)) que al comprobarse con datos experimentales se puede ver una tendencia lineal entre la profundidad de corte y las fuerzas de corte, inclusive autores han propuesto el manejo de dos modelos simultáneos de fuerzas para lograr una mejor estimación ([Vogler, Kapoor, and DeVor 2004](#)). Existe un amplio campo de opciones por las cuales el proceso puede ser modelado, cada uno de ellos aporta una visión distinta del proceso, complementándose y abriendo nuevas posibilidades de exploración del estudio de estos fenómenos en el proceso.

2.4.1. Clasificación de los modelos de corte

Los procesos de corte han sido ampliamente estudiados, dando pie a diferentes métodos para la obtención de modelos de corte, esto con el fin de explicar de una manera más clara y precisa los fenómenos que ocurren en el mecanizado, cada uno de estos métodos tiene sus limitantes y ventajas, de manera general, estos métodos se pueden clasificar como se muestra en la [Figura 2.6](#).

Figura 2.6. Diagrama de los tipos de métodos para la obtención de modelos de corte en mecanizado.

La complejidad del fenómeno de corte se debe a la interacción del conjunto de variables que en él actúan, varios modelos se basan en asumir el efecto de un solo fenómeno físico relacionado al arranque de material, lo que limita su precisión, otros hacen uso de metodologías más complejas, estos modelos son más precisos, pero tienen la desventaja de ser poco prácticos y requieren de mayor poder computacional, a continuación, se exploran los diferentes métodos presentados en el diagrama.

2.4.2. Modelos basados en métodos analíticos

Estos modelos tienen un fundamento geométrico muy marcado y relacionan el origen de las fuerzas de corte con tres elementos principales, la viruta instantánea sin deformar, el plano de desprendimiento y mecanismos no lineales.

El cálculo del plano de desprendimiento es de particular interés pues es una de las bases de los modelos analíticos (Merchant 1945), este modelo no cuenta con mucha precisión en comparación a los datos experimentales, pero es la aproximación base para poder definir los elementos básicos del corte ortogonal, en la Figura 2.7. se muestra el diagrama concentrado de las fuerzas en el corte ortogonal.

Figura 2.7. Diagrama de las fuerzas del proceso de corte ortogonal (Merchant 1945).

Este modelo calcula el ángulo del plano de desprendimiento (ϕ) como se muestra en la ecuación (2.1), donde (α) es el ángulo de inclinación de la arista de corte y (λ) es el ángulo de fricción, se está considerando que se mecaniza un material ideal, el cual no tiene esfuerzos internos, no hay endurecimiento durante el proceso y no se

ve afectado por la temperatura que se produce por el corte, esto explica las discrepancias de los resultados experimentales y de los obtenidos con el modelo.

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \lambda}{2} \quad (2.1)$$

Autores han ampliado esta propuesta agregando la influencia de la temperatura (Moufki, Molinari, and Dudzinski 1998), reformulando el modelo como lo muestra la ecuación (2.2) , donde A_1 y A_2 son constantes del material mecanizado y con esto se obtuvieron resultados con mayor precisión.

$$\varphi = A_1 + A_2(\alpha - \lambda) \quad (2.2)$$

La naturaleza de estos modelos basados en elementos matemáticos-analíticos es su relativa sencillez en cuanto a la descripción del fenómeno, un ejemplo de modelo con bases geométricas (Tobias, S.A.;Fishwick 1959; Gurney and Tobias 1961), encuentra una relación proporcional que se muestra en la ecuación (2.3) entre la viruta instantánea sin deformar (ds) y una constante (k_1) que en este caso representa el coeficiente del ancho de viruta.

$$dF = k_1 ds \quad (2.3)$$

Este modelo introduce el efecto de las vibraciones de la máquina herramienta durante el proceso de corte, cabe señalar que el fenómeno relacionado a los efectos dinámicos del mecanismo no son lineales (Albrecht 1965), esto fue la base para la introducción de una teoría de vibraciones regenerativas no lineales (Hanna and Tobias 1974), y aun tomando en cuenta la vibración de la máquina, no se llegan a describir los fenómenos dinámicos con resultados muy precisos.

Fenómenos relacionados con el efecto filo, donde el material no es arrancado pero se producen fuerzas de corte se introdujeron como términos de amortiguamiento (D. W. Wu and Liu 1985), desarrollando una ecuación (2.4) para la determinación de la fuerza causada por el efecto filo en la punta de la herramienta (f_x), donde (K_w) es el coeficiente de amortiguamiento, (w) el ancho de corte y (v_o) la velocidad de corte.

$$f_x = \frac{K_w}{v_o} \dot{x} \quad (2.4)$$

La mayor ventaja de esta metodología es la facilidad de implementación, y que no requiere de mucho poder computacional, aun en trabajos recientes se ha re visitado el modelo de Merchant dándole unos ajustes, los cuales han acercado más al modelo a los datos experimentales (Molinari and Moufki 2008), la ecuación (2.5) obtenida agrega un elemento nuevo que es el ángulo de forma de perturbación de superficie libre (θ), este ángulo se encuentra en una zona transitoria entre la sección de viruta sin deformar y la sección de viruta deformada.

$$\varphi_{MM} = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \theta - \lambda}{2} \quad (2.5)$$

2.4.3. Modelos basados en métodos experimentales

Esta metodología se basa en extraer la dinámica de las interacciones de las variables del proceso de corte por medio del análisis de datos experimentales, esto dio pie al estudio de los coeficientes dinámicos de fuerza de corte, el problema asociado con estos es su naturaleza empírica, muchas de las expresiones obtenidas no pueden ser explicadas con la claridad analítica necesaria para poderlos relacionar con un fenómeno físico en específico.

Analizar la dinámica de corte desde el punto de vista estático asume relaciones lineales y fuerzas de corte en equilibrio, como ejemplo esta la modelación de la variación del plano de desprendimiento causado por la oscilación de la herramienta ([Baradie 1993](#)), el análisis dinámico se puede hacer midiendo con un dinamómetro las componentes de la fuerza y sus vibraciones usando una perturbación periódica controlada ([Sisson and Kegg 1969](#)), la dinámica del corte también puede ser analizada por series de tiempo, de esta manera se puede representar la función de transferencia del proceso y la identificación de los coeficientes dinámicos de fuerza de corte ([Yang, Eman, and Wu 1985](#)), las series de tiempo tienen una buena aproximación a los datos reales del proceso de corte, pero no profundiza en sus orígenes físicos, y como desventaja adicional, la gran cantidad de datos empíricos a usar en estos modelos hace que sus expresiones sean complicadas y poco prácticas para la mayoría de aplicaciones de corte.

2.4.4. Modelos basados en métodos de simulación de dinámica molecular

Debido al reciente aumento de la capacidad computacional de los sistemas electrónicos se han podido implementar modelos basados en interacciones a nivel molecular y atómico, en el estudio de los procesos de corte se usan particularmente en micro y nano mecanizado, relacionando la interacción a nivel atómico de la geometría de la herramienta de corte y la formación de viruta (Cai, Li, and Rahman 2007) en la Figura 2.8 se muestra una representación esquemática de la simulación, la interacción entre los átomos se asume como una interacción mecánica newtoniana.

Figura 2.8. Diagrama de simulación molecular basado en (Cai, Li, and Rahman 2007).

El movimiento relativo de los átomos se puede determinar por la fuerza aplicada a ellos, y la interacción entre ellos se puede aproximar por medio de su fuerza potencial, un estudio ha realizado simulaciones de más de diez millones de átomos en tres dimensiones (Pei et al. 2009).

Fenómenos que eran difíciles de observar y estudiar, como el dislocamiento de los planos al cortar el material, o la influencia de la fusión del material mecanizado en la superficie de la punta de la herramienta se pueden modelar de manera más robusta (Oluwajobi and Chen 2011), sin duda es una de las herramientas más poderosas para

el modelado de los fenómenos enfocados al micro y nano mecanizado, claro está, que se debe tener en cuenta que para este tipo de simulaciones se necesita la representación de muchos átomos, lo que se traduce a un mayor consumo de capacidad de cómputo, o en su defecto, simulaciones que tomarán mucho tiempo (Sun and Cheng 2010), este tiempo también depende de la complejidad del modelo de interacción entre los átomos.

2.4.5. Modelos basados en métodos de elementos finitos

El método de elementos finitos es un método numérico ampliamente usado en el ámbito de la mecánica de sólidos, que consta en definir cargas que afectan la interacción de los elementos del análisis, así como los anclajes sus anclajes, a estos elementos se les subdivide en pequeñas regiones interconectadas entre si por medio de nodos y en base a las cargas aplicadas se analiza el desplazamiento entre cada uno de estos nodos.

La aproximación de los modelos basados en elementos finitos cuenta con dos principales variantes, los modelos Lagrangianos y los modelos Eulerianos. Los modelos Eulerianos (Figura 2.9.) no requieren de mucho poder computacional (Raczy, Altenhof, and Alpas 2004), y son capaces de modelar el comportamiento del material alrededor de la herramienta, pero no son adecuados para el modelado de mecanizado discontinuo.

En contraste los modelos Lagrangianos son muy adecuados para analizar la entrada y salida de la herramienta de corte en el proceso, su implementación ha podido

determinar las temperaturas que se pueden llegar a producir y tener un estimado del desgaste de la herramienta (Arrazola and Özel 2008).

Figura 2.9. Formación de viruta durante el proceso de corte usando métodos Eulerianos (Raczy, Altenhof, and Alpas 2004).

Una de las mayores desventajas de este enfoque es cuando la deformación plástica es muy alta, esto produce mucha distorsión en la malla creada, estas deformaciones plásticas son predominantes en el mecanizado y comparados con su contraparte Euleriana su costo en capacidad de cómputo es más elevado. Un estudio combino las virtudes de ambos métodos para simular el fresado trocoidal (Gao, Ko, and Lee 2018), con este estudio se obtienen las simulaciones de la formación de distintas morfologías de virutas (Figura 2.10), estudios de esta naturaleza ayudan a un mejor diseño de herramientas de corte.

Figura 2.10. Entrada de herramienta en análisis de elementos finitos usando un método Euleriano-Lagrangiano, con una profundidad de corte de 0.3mm (Gao, Ko, and Lee 2018).

2.4.6. Modelos basados en métodos de simulación multi escala.

Ampliando los límites presentados por los modelos de elementos finitos, el método multi escala aborda los fenómenos del mecanizado dividiendo el enfoque de la estructura del material por partes, continua cuando se analizan elementos a nivel macro mecanizado y discreto cuando se analizan elementos del micro mecanizado, lo que es básicamente la fusión de los métodos de elementos finitos con las simulaciones moleculares, una aplicación muy utilizada en el análisis de MEMS ([Rudd 2001](#)) y en la formación de viruta a nivel nanométrico ([Sun and Cheng 2010](#)), este enfoque en dos partes se acoplan por condiciones de frontera entre la parte de los átomos y la región continua, esto ayuda a reducir en gran parte el problema de simulaciones muy complejas, el modelo se divide en regiones y donde el fenómeno tiene elementos de deformación plástica se mantiene los modelos de los átomos, y con las fuerzas que actúan en ellos se calculan los desplazamientos, mientras que las zonas que tienen deformaciones elásticas se discretizan y se abordan con la metodología de los elementos finitos. Esta metodología tiene gran futuro en la investigación de fenómenos en micro y nanofabricación, describiendo más a fondo la interacción y el cambio de fase entre las diferentes escalas del corte.

2.4.7. Modelos basados en métodos mecanicistas.

Con la metodología mecanicista se describen las interacciones complejas entre el material mecanizado, la formación de viruta y las fuerzas de corte por medio de una pequeña cantidad de experimentos, que a su vez relacionan la geometría de la herramienta y la mecánica del corte con las entradas y salidas de las condiciones del proceso, considerando como consecuencias de las fuerzas de corte la precisión de la superficie mecanizada y su acabado. Uno de los primeros modelos analizó las fuerzas tangenciales en fresado ([Koenigsberger and Sabberwal 1961](#)), de las cuales se obtuvo la ecuación (2.6), la cual describe a la fuerza (F_t) como una relación lineal de la presión específica de corte (K_1), con los parámetros del proceso, el ancho de viruta (b) y de el grosor de la viruta sin deformar, que equivale a la profundidad de corte (t_c).

$$F_t = K_1 (b t_c) \quad (2.6)$$

La flexibilidad de estos modelos ha podido integrar efectos como la deflexión ([Sutherland and DeVor 1986](#)), y el efecto de la punta de la herramienta en las fuerzas de corte rondando los 100µm de profundidad de corte ([Vogler, Kapoor, and DeVor 2004](#)), aplicando principios plásticos cuando el radio de punta de la herramienta es menor a la profundidad de corte, y principios elásticos cuando el radio de punta de la herramienta era mayor a la profundidad de corte, el mismo concepto también se aplica tomando en cuenta la dinámica del corte y el run-out de herramienta ([Malekian, Park, and Jun 2009](#)), estos estudios encontraron que hay una profundidad de corte crítica que determina el fenómeno predominante en el proceso de corte.

Las constantes de presión específica se obtienen realizando una serie de experimentos variando la profundidad de corte y el ancho de viruta, las cuales pueden englobar algunos fenómenos de la formación de viruta (Jun et al. 2012), la metodología se hace más robusta cuando se aplica la teoría del plano de desprendimiento e inclusive incluyendo la dinámica del instrumento de medición (dinamómetro).

En general , este tipo de modelos requiere la calibración de las constantes para cada combinación de herramienta-material, también requiere de instrumentación precisa (Figura 2.11), cabe señalar que estos modelos son muy flexibles en cuanto a la aplicabilidad en la escala del mecanizado , se ha comprobado que se puede aplicar modelos de macromecanizado para operaciones de micro fresado inclinado esférico (Graham, Park, and Park 2014) lo que demuestra la robustez de los modelos mecanicistas, una vez obtenida la expresión matemática es fácil de implementar en el proceso de corte.

Figura 2.11. Configuración de micro fresado esférico propuesto por (Graham, Park, and Park 2014).

2.5. Herramientas de corte.

El comportamiento del proceso de corte depende del tipo de herramienta a utilizar, y esta a su vez depende de la cantidad de filos que la conformen, de esta manera se pueden clasificar a las herramientas en dos (Figura 2.12), de filo único o multi filo.

Figura 2.12. Clasificación de herramientas de corte según la cantidad de filos.

Las herramientas multi filo son las que están conformadas por más de un solo filo principal, los cuales actúan en la pieza para arrancar material, un ejemplo común son las herramientas de fresado, algunas varían de 3 a 20 filos de corte, el uso de estas herramientas depende de la velocidad, acabados y porcentaje de arranque de material deseado.

Las ventajas de tener varios filos de corte radican en la distribución de la carga, pues se reparte con cada uno de los filos de la herramienta, además durante el corte ninguno de los dientes se mantiene de manera constante en contacto con la pieza a

mecanizar, esto da tiempo a dispersar el calor generado en el proceso lo que a su vez ayuda a prolongar la vida útil de la herramienta. Por otro lado, las desventajas de estas herramientas son que, al estar en contacto intermitente con el material, esto produce efectos de fatiga en los filos, lo que aumenta su probabilidad de fallo, así como las vibraciones, lo que se traduce en un mal acabado superficial. En términos de micro mecanizado, llegar a formar herramientas de varios filos con una alta precisión es muy difícil, y aun cuando se logra fabricar este tipo de herramientas tienden a tener poca vida útil, el equilibrio entre acabado superficial y la complejidad de los filos no es tarea fácil (Fang et al. 2003).

Las herramientas de filo único son aquellas que solo cuentan con un filo principal para el arranque de material, la herramienta de corte de un solo filo más usada es la de torno, la principal desventaja de esta herramienta radica en que el filo de corte pertenece todo el tiempo en contacto con la pieza a mecanizar, lo que ocasiona altas temperaturas las cuales dañaran a la herramienta y a la pieza, al solo tener un solo filo de corte, el porcentaje de arranque de material es menor comparado a las herramientas multi filo. En cuanto a ventajas es evidente, que al tener un solo filo la geometría de la herramienta es muy sencilla, lo cual facilita su fabricación y reduce sus costos, en términos de micro mecanizado se han explorado las opciones que ofrece el micro torneado, con el cual se han obtenido contorneados, cuerdas y desbastes en cilindros de 100 μm (Lu and Yoneyama 1999), así como el estudio de acabados superficiales (Lutfi et al. 2018). También el micro planeado está siendo explorado y demuestra compensar los problemas de las fresas multi filo (Reichenbach, Fallenstein, and Aurich 2014), lo cual demuestra el potencial de las herramientas de filo único en micromecanizado.

2.5.1. Micro corte de filo único.

El corte de filo único en la industria de la microfabricación está liderado por la miniaturizando el torneado convencional, se han realizado técnicas combinadas al llevar esta tecnología al ámbito del micromecanizado ([Masuzawa 2000](#)), y su limitación al crear geometrías radica en los grados de libertad que posee. La ventaja más evidente de este proceso es la sencillez de su herramienta, la cual no cuenta con las hélices ni la cantidad de filos que poseen las herramientas de fresado, por lo que miniaturizar estas herramientas es más barato en términos de fabricación.

La exploración del estado del arte ha dejado ver la oportunidad de expandir las alternativas del micromecanizado enfocadas a las herramientas de filo único, la mayor limitante de esta técnica son los grados de libertad de la máquina herramienta, un proceso alternativo denominado micro limado consta de agregar grados de libertad a la máquina herramienta y eliminando el giro a alta velocidad sobre su eje, ya sea de la propia herramienta o de la pieza mecanizada, pero que a su vez es capaz de orientar la herramienta de corte a través de la trayectoria de mecanizado, lo que reduce las vibraciones las cuales se traducen en errores de precisión y de acabado superficial en la pieza mecanizada.

2.5.2. Proceso de micro mecanizado de filo único propuesto.

Al observar la oportunidad de ampliar las capacidades del proceso de corte con herramienta de filo único, se propone el proceso de micro limado como alternativa. Este proceso consiste en orientar la herramienta a lo largo de la trayectoria de corte, manteniendo una posición que mantenga las condiciones del mecanizado, para esto se requieren más grados de libertad que los empleados en micro torneado, de esta manera se pueden crear una variedad más amplia de geometrías. Este concepto requiere tener un control total de la herramienta en el proceso, la [Figura 2.13a](#) muestra un esquemático de los giros por cada eje de la herramienta, que en una trayectoria de corte ([Figura 2.13b](#)) se van adaptando para siempre mantener unas condiciones constantes.

Figura 2.13. Esquemático del proceso de microlimado, a) Giros en los ejes (x, y, z) de la herramienta a ser controlados, b) Orientación de la herramienta por una trayectoria determinada donde (v) es el vector de velocidad.

La posición de la herramienta en la trayectoria es representada por un conjunto de coordenadas en el espacio de trabajo $\mathbf{P} = [P_x \ P_y \ P_z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$, un desplazamiento y un giro por cada uno de los ejes de la herramienta. Un análisis previo de esta técnica revela su potencial, logrando cortar secciones de viruta de entre 5 y 3 μm (López-Estrada et al. 2015) y que además se demostró que cortando de forma tangente (Hsieh 2010) a la trayectoria de mecanizado se logran los mejores acabados superficiales en las geometrías obtenidas.

Para este propósito se requiere una máquina herramienta capaz de poder hacer este tipo de orientación, varias configuraciones han sido exploradas y de las cuales destaca la serie-paralelo (Fajardo-Pruna et al. 2014) esto se debe a la alta rigidez de la máquina herramienta lo que mitiga los efectos de deflexión por parte de la misma, la velocidad no es un factor determinante, pues las cantidades de remoción de material a nivel micromecanizado son muy pequeñas, por lo que inclusive a bajas velocidades de corte se puede competir con las tecnologías existentes.

Con esto, se desarrolla un modelado y análisis del proceso micromecanizado con herramientas de filo único para expandir las posibilidades de esta propuesta y establecer esta como una alternativa viable a los procesos de microfabricación, compitiendo con las tecnologías actuales de micro corte que hay en la industria.

Análisis del proceso de mecanizado con herramientas de filo único

3.1. Definición de la herramienta de corte de filo único.

Para definir el proceso es necesario identificar las principales características de la geometría de la herramienta, este proceso usa el estándar de la norma ISO 3002, que define los planos de la herramienta y los ángulos principales de la herramienta de filo único (torneado). La [Figura 3.1a](#) y la [Figura 3.1b](#) muestran la disposición de los planos de referencia, estos planos definen los ángulos principales de la herramienta.

Figura 3.1. Planos de herramienta según la norma ISO 3002 a) Planos de referencia P_r, P_f, P_p , b) Planos de referencia P_s, P_o, P_n .

El punto C_a en las figuras representa el punto de la arista donde ocurre el corte, desde este punto se empiezan a definir los planos, el plano de referencia de la herramienta P_r se define como el plano paralelo o perpendicular a un eje o plano de la herramienta que facilite su orientación tanto para su afilado o su fabricación, siempre se recomienda que este plano este perpendicular a la supuesta dirección de corte ($\mathbf{v}$), el plano de trabajo supuesto P_f se posiciona perpendicularmente al plano P_r que de la misma manera debe de ser perpendicular a un plano o eje de la herramienta, este plano se debe de ir paralelo a la supuesta dirección de corte, el plano de retroceso P_p es un plano perpendicular al plano P_r y al plano P_f , el plano P_s es el plano tangente al punto C_a y a su vez perpendicular al plano de referencia P_r , el plano normal P_n se define como el plano perpendicular a la arista donde se encuentra el punto C_a , por último el plano ortogonal P_o es el plano perpendicular al plano P_r y a su vez perpendicular al plano P_s .

Teniendo los planos de la herramienta definidos se definen los ángulos de la herramienta, el análisis se enfocará en 3 ángulos, (χ_r) que es el ángulo de posicionamiento y para la geometría seleccionada se define desde la arista de corte hasta el plano P_f y se mide en el plano P_r (Figura 3.2b), el ángulo de inclinación de la arista de corte (λ_s) está definida por el ángulo de la arista de corte y el plano de referencia P_r y se mide por el plano de referencia P_s (Figura 3.2a), y por último el ángulo de desprendimiento (γ_n) el cual comprende desde la cara de desprendimiento de la herramienta hasta el plano de referencia P_r , y el cual se mide desde el plano normal P_n (Figura 3.2c).

Figura 3.2. Definición de los ángulos para el análisis, a) ángulo de inclinación λ_s , b) ángulo de posicionamiento χ_r , c) ángulo de desprendimiento γ_n .

Enfocar el análisis en estos ángulos radica en su importancia en el mecanizado, estos dominan el comportamiento del filo de corte y tienen una influencia directa en el área de corte que se puede obtener. La herramienta seleccionada cuenta con una geometría simétrica, para que de esta manera la herramienta pueda mecanizar en dos sentidos (a derechas o izquierdas) y así obtener los mismos resultados, el concepto de microlimado se basa en la elaboración de una trayectoria libre en el espacio de trabajo la cual hace que estos ángulos varíen conforme evoluciona la trayectoria de corte planeada, estos cambios se deben hacer para mantener las condiciones de corte, una misma geometría se puede mecanizar de distintas maneras, pero no todas darán los mismo resultados, por lo que es necesario considerar las estrategias de mecanizado para lograr una geometría ideal, todas estas variables se deben de tomar en cuenta para sacar el mayor provecho de esta técnica, un ejemplo esquemático del corte se presenta en la [Figura 3.3](#).

Figura 3.3. Esquema del proceso de micromecanizado de filo único.

El área de corte se conforma por la profundidad de corte (a_p) y su ancho (a_e) y junto con la geometría de la herramienta definen la cantidad de material que se va a arrancar, la forma de la región del área de corte (Figura 3.4) no es una sección rectangular, la geometría que tenga el filo de corte en relación con la pieza a mecanizar forma un romboide, esto afecta en particular a la profundidad de corte programada (h) la cual se tomará como equivalente a (a_p), esto se debe a que en áreas de corte pequeñas estos dos valores tienen a converger.

El análisis de la sección de viruta (Dabade, Joshi, and Ramakrishnan 2003), encontró una relación entre la formación de la sección de viruta y el ángulo de inclinación, esta relación también se ve afectada por la profundidad de corte, cuando el ángulo de inclinación disminuye la sección transversal de viruta aumenta, y esta reducción del ángulo de inclinación afecta el acabado superficial de manera adversa.

Figura 3.4. Esquema del área de corte en términos de la profundidad de corte ($a_p = h$) y el espesor de corte (a_e), a) Área de corte vista desde P_T , b) Área de corte vista desde P_S .

El estudio de la profundidad de corte y su relación con las fuerzas de corte arroja que al incrementar el valor de (a_p), las fuerzas de corte aumentaban (Rao, Nageswara Rao, and Srihari 2013) y el acabado superficial no se veía afectado, la velocidad de corte no afecta ni el acabado superficial y las fuerzas de corte, por lo que el proceso propuesto a pesar de tener una relativa velocidad baja no afectaría el acabado de las geometrías obtenidas.

3.2. Modelo mecanicista de corte

En la sección 2.4 se hace una revisión de los métodos por los cuales se pueden modelar los procesos de corte, cada uno con sus fortalezas y debilidades, con esto en mente, la selección de la metodología se basa en tener la flexibilidad de poder conectar la geometría de la herramienta con los fenómenos que se producen en el proceso de corte y a su vez poder aplicarlo de una manera práctica después de su obtención.

Los modelos mecanicistas parten de la suposición de que las fuerzas de corte son proporcionales al espesor de la viruta sin cortar, tomando en cuenta que la formación de la viruta depende de las condiciones de corte y de la geometría de la herramienta esta metodología tiene el potencial de describir de manera muy precisa el proceso de microlimado. Los modelos mecanicistas han arrojado buenos resultados relacionando los fenómenos particulares del micromecanizado con las condiciones del proceso (Uriarte et al. 2008), sin embargo se necesita mayor exploración para el proceso propuesto.

Como primer paso del análisis tomando los fundamentos del modelo mecanicista de Sabberwaal (1960) que se muestra en la ecuación (3.1) se hacen pruebas de corte de filo único para explorar el proceso. La fuerza de corte tiene un comportamiento linealidad en relación con la presión específica de corte y la sección de corte, la cual se conforma por la profundidad de corte a_p y el ancho de corte a_e .

$$F = k_s a_e a_p \quad (3.1)$$

3.2.1. Primer análisis experimental del proceso de corte

La primera exploración experimental tiene la finalidad encontrar configuraciones de áreas de corte del menor rango posible, variando las condiciones de corte tales como los ángulos de corte y las velocidades de corte, esto ayudara a tener un mejor panorama de las posibles ramificaciones del modelado.

Estos ensayos se realizan en una maquina Deckel Maho DMU 50 Evolution, la cual cuenta con 5 grados de libertad, en la cual se programan trayectorias lineales variando la profundidad y ancho del corte, a su vez se hará una giro a la orientación de la herramienta para hacer cambios del ángulo de desprendimiento (γ_n), las fuerzas son recolectadas con dinamómetro de 3 ejes Kistler, la señal es amplificada y enviada a una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, las cuales son filtradas y mostradas en el ordenador (Figura 3.5).

Figura 3.5. Esquema del primer procedimiento experimental para la captura de fuerzas en el proceso de corte de filo único.

La herramienta de corte es simétrica fabricada a medida y se mecaniza usando acero para herramienta (Figura 3.6), la simetría de la herramienta hace que los ángulos χ_r y K_r tengan el mismo valor, también se cuenta con un ángulo de incidencia α_r de 18° , este ángulo no participa en el arranque de material, pero se debe de tomar en cuenta para cuando la herramienta tenga que mantener una posición en particular y evitar que la parte posterior de la misma colisione con la pieza a mecanizar. La probeta de pruebas es de Aluminio 7075 T-6, la cual también es mecanizada en la máquina herramienta Deckel Maho DMU 50 Evolution.

Figura 3.6. Fotografía de la herramienta de corte, vista frontal y lateral, $\chi_r = K_r = 60^\circ$.

El primer conjunto de pruebas se enfoca en variar la velocidad de corte y observar el efecto que esta tiene sobre las fuerzas que se producen en el proceso, el área de corte se mantendrá constante ($a_p = 100\mu m$, $a_e = 100\mu m$) y el ángulo de desprendimiento (γ_n) se mantendrá a 0° , se programan pasadas lineales de 115mm a 500, 750, 1000, 2500, 5000 y 7500 milímetros por minuto. La Figura 3.7 muestra los resultados obtenidos con las condiciones de mecanizado seleccionadas.

Figura 3.7. Resultados de corte de filo único con área de corte y ángulo de desprendimiento constante, variando la velocidad de corte.

Analizando las gráficas se puede apreciar que la fuerza (F_x) la cual equivale a la componente de la fuerza resultante en dirección X es de alrededor de los 23 N, la fuerza (F_y) la cual equivale a la componente de la fuerza resultante en dirección Y es de alrededor de 15 N y la fuerza (F_z) que equivale a la componente de la fuerza resultante en la dirección Z es alrededor de los 19N, estos resultados muestran que al variar la velocidad de corte no hay un efecto significativo en la magnitud de las fuerzas de corte obtenidas, el comportamiento de las fuerzas en relación con el tiempo que la herramienta permanece en contacto con la pieza a mecanizar no es concluyente, las fuerzas oscilan un poco menos entre 2500 y 5000 mm/min , pero no es suficiente para determinar si esta es la velocidad más adecuada para el corte, estos efectos pueden ser causados por el comportamiento de la máquina herramienta o a la estructura de grano del Aluminio 7075 -T6, este resultado nos demuestra que la velocidad de corte no es una variable crítica por lo que los cortes a baja y alta velocidad arrojan un comportamiento similar, debido a este resultado la variable de velocidad de corte no será considerada en el modelo.

Como segunda etapa de la prueba se probará el efecto del cambio en el área de corte sobre las fuerzas que se producen en el proceso, se programan trayectorias lineales de 115mm de largo, con ángulo de desprendimiento (γ_n) de 0° (corte ortogonal) y con velocidad constante de corte (1000 mm/min). Se hace una reducción del área de corte en relación con la prueba anterior por debajo de un 50%, creando un corte con área de $a_p = 50\mu m$, $a_e = 20\mu m$ y uno de $a_p = 50\mu m$, $a_e = 30\mu m$. Los resultados se muestran en la [Figura 3.8](#).

Figura 3.8. Resultados de corte de filo único con área de corte variable, con velocidad de corte y ángulo de desprendimiento constante.

Para el área de $a_p = 50\mu m$, $a_e = 20\mu m$, los resultados arrojan valores para F_x de 12 N, para F_y 8.5 N y para F_z 3 N, comparados con los obtenidos en el área de $a_p = 50\mu m$, $a_e = 30\mu m$, donde el valor de F_x es de 14 N, F_y de 11 N y F_z de 4 N, se puede observar un claro incremento en las fuerzas de corte, a pesar que solo fue un incremento de 10 μm en a_e , esto produce un cambio en los valores de fuerza de alrededor de dos Newtons por componente, lo que demuestra que las fuerzas son muy sensibles al cambio de área de corte, a mayor área de corte, mayor fuerza de corte, un comportamiento lineal de estas variables.

La tercera etapa de este análisis involucra el cambio en el ángulo de desprendimiento (γ_n), este puede ser positivo (Figura 3.9c), negativo (Figura 3.9a) o neutro (Figura 3.9b), su clasificación depende de la dirección a la que este se incline en referencia a la dirección de la velocidad de corte (v), se selecciona un gradiente de valores del ángulo de desprendimiento (γ_n) de -30, -20, -10, 10, 20, 30 grados para analizar el efecto que estos tienen en las fuerzas de corte, se mantendrá una velocidad constante (1000mm/min) y un área de corte constante ($a_p = 50\mu m$, $a_e = 30\mu m$), los resultados se muestran en la Figura 3.10. y en la Figura 3.11.

Figura 3.9. Clasificación del ángulo de desprendimiento según su inclinación, a) ángulo negativo, b) ángulo neutro, c) ángulo positivo.

Figura 3.10. Resultados de corte de filo único con área de corte y velocidad de corte constante, variando ángulo de desprendimiento en un rango de ángulos positivos.

Figura 3.11. Resultados de corte de filo único con área de corte y velocidad de corte constante, variando ángulo de desprendimiento en un rango de ángulos negativos.

Los resultados de la [Figura 3.10](#) muestran como los ángulos positivos afectan la magnitud de las fuerzas de corte, cuando $\gamma_n = -10^\circ$ los valores de las fuerzas que se obtienen son: $F_x = 12.3$ N, $F_y = 11.8$ N y $F_z = 3.8$ N, estos datos comparados con $\gamma_n = 0$ de la [Figura 3.8](#) muestran un claro descenso en el valor de las fuerzas obtenidas, al cambiar el valor a $\gamma_n = -20^\circ$ los datos obtenidos son: $F_x = 7.3$ N, $F_y = 6.5$ N y $F_z = 2.9$ N, que de igual manera al ser comparados con los datos anteriores se muestra también una tendencia a la baja en las fuerzas de corte, el cambio de $\gamma_n = -20^\circ$ obtiene las fuerzas que son: $F_x = 5.7$ N, $F_y = 4.6$ N y $F_z = 1.4$ N, la tendencia se mantiene y bajan aun más las fuerzas del proceso de corte.

La [Figura 3.11](#) muestra el efecto de los ángulos negativos en las fuerzas de corte, cuando el ángulo de desprendimiento es de -10° (γ_n), las fuerzas que se obtienen son: $F_x = 13.8$ N, $F_y = 11.5$ N y $F_z = 4.2$ N, se nota un aumento marginal en comparación a $\gamma_n = 0$ de la [Figura 3.8](#), más sin embargo si hay un aumento, las fuerzas que se obtienen cuando a $\gamma_n = -20^\circ$ también muestran un aumento significativo, $F_x = 14.4$ N, $F_y = 12$ N y $F_z = 4.7$ N, de igual manera el aumento en las fuerzas no es muy significativo, pero también demuestra el aumento de las fuerzas de corte, cuando $\gamma_n = -30^\circ$ las fuerzas que se capturan son: $F_x = 18$ N, $F_y = 17$ N y $F_z = 7.5$ N, las magnitudes de las fuerzas muestran un claro aumento en comparación con las dos condiciones anteriores, por lo que los cambios en el ángulo de la herramienta en sentido negativo afectan a las fuerzas de corte aumentando su magnitud.

Estos resultados muestran entonces que el incremento del ángulo de desprendimiento de manera positiva manteniendo las condiciones de corte (velocidad y área de corte) ayudan a disminuir las fuerzas de corte en el proceso, mientras que, al mantener la misma área y velocidad de corte, he incrementar el ángulo de desprendimiento de manera negativa se obtiene el efecto opuesto, que es el aumento de las fuerzas de corte. Este comportamiento es el mismo que se obtiene en el macromecanizado ([Saglam, Unsacar, and Yaldiz 2006](#)), esto demuestra que este fenómeno se mantiene en áreas de corte a nivel micromecanizado.

La primera etapa del análisis del proceso arroja que fenómenos presentes en el macromecanizado se mantienen en micromecanizado, se ha comprobado que la velocidad de corte no afecta la magnitud de las fuerzas de corte. La máquina herramienta Deckel Maho DMU 50 Evolution ha demostrado tener alta precisión , mas no está diseñada para el proceso de micro corte de filo único, por lo que lograr las posiciones deseadas para las pruebas es necesario el uso de sus 5 grados de libertad, lo cual dificulta tener un control total de los ángulos de la herramienta en el proceso, para seguir con el análisis del proceso de corte de filo único se necesitan maquinas herramientas diseñadas para poder sacar el mayor provecho del proceso propuesto.

3.2.2. Segundo análisis experimental del proceso de corte

Para contar con más información del comportamiento del micromecanizado de filo único es necesario contar con máquinas herramientas capaces de posicionar con precisión la punta de la herramienta y que sean capaces de lograr mantener las condiciones de corte a lo largo de las trayectorias programadas, por lo tanto se deben diseñar y fabricar máquinas herramientas que tengan las necesidades del proceso en consideración, a su vez es necesario que sea fáciles de integrar con elementos comerciales para su control, de esta manera se podrá sacar todo el provecho al proceso propuesto.

3.2.2.1 Máquina de 4 grados de libertad para mecanizado de filo único.

Como prueba de concepto se diseña y fabrica una máquina herramienta de alta precisión, la cual considera las necesidades del proceso propuesto, integra tecnología utilizada en la industria para poder adaptar el proceso propuesto más directamente al mercado. La máquina herramienta diseñada cuenta con 4 grados de libertad, que son traslaciones en los ejes **X**, **Y**, **Z** y una rotación alrededor del eje **Z**, la cual se denomina **C** (Figura 3.12), este giro orienta la herramienta a lo largo de las trayectorias programadas.

Figura 3.12. Máquina herramienta de 4 grados de libertad para mecanizado de filo único.

La máquina cuenta con una resolución de posicionamiento de $1\ \mu\text{m}$ en cada eje, y estos son controlados por un control CNC Fagor® 8070 de esta manera sus movimientos se pueden programar en lenguaje ISO. Para la correcta implementación del proceso propuesto es fundamental saber la localización de la punta de la herramienta, se consideraron palpadores industriales, pero debido a la limitación del espacio del trabajo y sus costos elevados se optó por el diseño de un sistema de visión artificial, el cual es diseñado como un accesorio (se puede montar y desmontar según se requiera), y consta de un par de cámaras DinoLite® AM7515MZT con una resolución de 5 megapíxeles y zoom óptico de hasta 273x, estas cámaras se han seleccionado por su diseño enfocado a metrología, lo que garantiza una imagen clara y sin deformaciones, las cámaras se instalan en posición perpendicular una de otra, lo cual da información estereoscópica de la herramienta (Figura 3.13), esto es

fundamental debido a la naturaleza de la herramienta, la cual en su fabricación no es posible garantizar que la punta este alineada con el eje de la misma, por lo que este desface induce errores de posicionamiento los cuales afectan directamente la calidad del mecanizado, el sistema de visión es programado en Matlab®, el cual toma una foto por cada cámara y busca el contorno de la herramienta, al identificar la herramienta la segmenta hasta encontrar la punta de la misma, el algoritmo es lo suficientemente robusto para eliminar algunos de los brillos que provocan las herramientas metálicas, se ha comprobado que es una solución viable y confiable para la tarea que se requiere (López-Estrada, Fajardo-Pruna, Sánchez-González, Pérez, and Vizán 2018).

Figura 3.13. Configuración del sistema de visión, a) Render del CAD del sistema de visión, b) Sistema de visión implementado en la máquina herramienta.

Con los datos que se obtienen del sistema de visión, se puede crear una corrección en el código ISO y de esta manera obtener una trayectoria controlada y precisa, teniendo control de la posición de la punta de la herramienta se hacen pruebas en esta máquina y se obtuvieron diversas geometrías con una buena calidad (Figura 3.14), la imagen muestra la elaboración del logo del grupo de investigación de ingeniería de fabricación, el cual queda centrado en un área de 2 x 2 mm en aluminio 7075-T6 con una profundidad de 5µm, la precisión de los elementos mecánicos en

conjunto con el control comercial logran la precisión requerida para aplicar los principios del proceso de micro corte de filo único propuesto.

Figura 3.14. Pruebas de mecanizado con máquina de 4 grados de libertad, a) Logo del grupo de investigación de ingeniería de procesos de fabricación (IPF), b) Acercamiento al logo mecanizado con una superposición de algunas de las trayectorias de mecanizado programadas.

El rango de geometrías que se pueden lograr es amplio (Figura 3.15), para cada una de ellas se aplican diferentes estrategias de mecanizado, pues cabe señalar que la máquina al tener solo 4 grados de libertad, las trayectorias deben de tomar en cuenta esta limitante, teniendo un control total del área de corte y de la posición de la herramienta, se puede hacer un segundo análisis del proceso de corte de filo único.

Figura 3.15. Micro mecanizado en máquina de 4 grados de libertad, a) geometría tipo “puzzle” con pasadas de 10 μm , b) Matriz rectangular con paredes de 20 μm de espesor.

3.2.2.2 Análisis de las fuerzas y presión específica de corte en el proceso.

La obtención de los datos experimentales se basa en la técnica usada en el primer análisis del proceso de corte, un dinamómetro Kistler MiniDyn 9256B y una tarjeta de adquisición de datos National Instruments DAQ PCI-6251 se usan para recopilar los datos de fuerza, los cuales son procesados en el ordenador (Figura 3.16).

Figura 3.16. Diagrama del procedimiento experimental para la captura de fuerzas en el proceso de corte de filo único en máquina de 4 grados de libertad.

Se seleccionan un rango de valores de a_e , a_p , λ_s y γ_n (Tabla 3.1) los cuáles son representativos de diferentes condiciones de corte, se reduce en cada experimento el área de corte y se varían los ángulos, con este efecto combinado se obtendrá un análisis de la influencia que estos parámetros tienen sobre las fuerzas de corte y la presión específica de corte, el material seleccionado es Aluminio 7075-T6.

Tabla 3.1

Parámetros de corte para el análisis de fuerzas en máquina de 4 grados de libertad.

$a_p(\mu\text{m})$	$a_e(\mu\text{m})$	$\gamma_n(^{\circ})$	$\lambda_s(^{\circ})$
30	30,20,10,8	-15, -5, 0, 5, 15, 20	0,4,8
20	20,10,8,5	-15, -5, 0, 5, 15, 20	0,4,8
10	20,10,8,5,3	-15, -5, 0, 5, 15, 20	0,4,8
5	10,5,3,2	-15, -5, 0, 5, 15, 20	0,4,8

En cada conjunto de experimentos λ_s se mantiene constante a cero, cuatro y ocho grados, y a su vez cada subgrupo de experimentos se mantiene a_p constante para una determinada combinación de a_e y γ_n , en cada combinación se hace una trayectoria lineal a velocidad constante, de cada ensayo se hace una media aritmética de la muestra obtenida y esta se representa como un punto en las gráficas comparativas de fuerzas, a su vez, estas se usan para el cálculo de la presión específica de corte. De los experimentos se toman las componentes (F_x) y (F_y) de la fuerza resultante, debido a que son las dos componentes dominantes del proceso de corte.

Las fuerzas obtenidas del primer conjunto conformado por las combinaciones de $a_p = 30\mu\text{m}$ con $\lambda_s = 0^{\circ}$ se muestran en la [Figura 3.17](#), en la cual se observa un comportamiento lineal entre el ángulo γ_n y el área de corte, a mayor área de corte y ángulos de desprendimiento negativos, la fuerza en el proceso de corte de filo único aumenta, en cuanto a la presión específica de corte ([Figura 3.18](#)), el efecto es potencial cuando el tamaño de a_e disminuye, y a su vez, ángulos negativos de γ_n aumentan la magnitud de la presión específica.

Figura 3.17. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^{\circ}$.

Figura 3.18. Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$.

Los efectos observados coinciden con los trabajos presentados con respecto a las fuerzas de corte y la presión específica, sin embargo, es necesario explorar los límites a los cuales los fenómenos se mantienen comparables con los del macromecanizado, para el siguiente conjunto de experimentos se reduce a_p a 20 μ m y se mantiene el ángulo de inclinación ($\lambda_s = 0^\circ$), las fuerzas obtenidas (Figura 3.19) mantienen el mismo comportamiento, ángulos negativos de γ_n provocan un aumento de la fuerza de corte en ambas componentes, a su vez, valores de a_e que en combinación con a_p forman áreas de corte mayores, la linealidad del comportamiento de las fuerzas es muy evidente.

La presión específica de corte (Figura 3.20) también mantiene el mismo comportamiento que en el anterior conjunto, valores negativos de γ_n en conjunto con áreas de corte pequeñas aumentan considerablemente la presión específica de corte, los ángulos positivos en γ_n muestran tener los valores más bajos de presión específica de corte, mientras que el ángulo neutro se mantiene en un rango medio, también se puede ver que la pendiente del comportamiento logarítmico es un poco más pronunciada.

Figura 3.19. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 20\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^{\circ}$.

Figura 3.20. Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 20 \mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$.

Para el siguiente conjunto de combinaciones se aplica un valor de $10\mu\text{m}$ para a_p y 0° para λ_s , la magnitud de las fuerzas (Figura 3.21) comparadas con experimentos anteriores se reduce considerablemente, pero dentro del conjunto mantiene su comportamiento lineal en relación a los valores de γ_n y el área de corte, en cuanto a la presión específica de corte (Figura 3.22) cuando se comparan las magnitudes con experimentos previos se puede observar un claro incremento, y dentro del mismo conjunto se mantiene el efecto logarítmico entre la combinación de a_e y γ_n .

El siguiente conjunto se considera muy representativo por contener la combinación de área de corte más pequeña, la inclinación λ_s se mantiene en 0° y a_p se reduce a $5\mu\text{m}$, las magnitudes de las fuerzas (Figura 3.23) se han reducido de manera considerable, en algunos casos por debajo de 1 Newton, pero de igual manera se sigue manteniendo la tendencia de comportamiento que se presentó en los conjuntos anteriores, en cuanto a la presión específica de corte (Figura 3.24), las magnitudes se han elevado también, se mantiene el comportamiento, pero dentro del conjunto los valores se mantienen en un rango muy cerrado, los escalones de magnitudes entre las diferentes combinaciones de a_e y γ_n no son tan notorios como en experimentos previos.

Figura 3.21. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 10\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^{\circ}$.

Figura 3.22. Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 10\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$.

Figura 3.23. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$) y ($F_y = F_t$) con $a_p = 5\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^{\circ}$.

Figura 3.24. Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 5\mu\text{m}$ y $\lambda_s = 0^\circ$.

Los experimentos con inclinación $\lambda_s = 0^\circ$ conforman el comportamiento base del proceso, estos equivalen a tener la herramienta perpendicular a la trayectoria de corte, los siguientes conjuntos de experimentos tienen como meta obtener el efecto que el aumento en la inclinación λ_s tiene sobre las fuerzas y presiones específicas del corte de filo único, la cual para el primer conjunto de datos es de 4° .

La [Figura 3.25](#) y la [Figura 3.26](#) muestra los resultados obtenidos para $a_p = 30\mu\text{m}$ y $a_p = 20\mu\text{m}$ con sus respectivas combinaciones de a_e y γ_n . En general el comportamiento se mantiene, la influencia de γ_n y el área de corte obtiene los mismos efectos entre experimentos y en el mismo conjunto, estos datos comparados con los obtenidos con $\lambda_s = 0^\circ$ tiene como diferencia las magnitudes de las fuerzas y de la presión específica de corte, las cuales disminuyen.

Los resultados de $a_p = 10\mu\text{m}$ y $a_p = 5\mu\text{m}$ con la nueva inclinación se muestran en la [Figura 3.27](#) y la [Figura 3.28](#), el aumento de fuerzas dentro de los conjuntos se debe a los ángulos negativos de γ_n y al aumento del área de corte, mientras que la presión específica depende de la disminución área de corte y su combinación con γ_n , a su vez, comparados con los datos base de inclinación cero, hay una reducción de la magnitud de ambos elementos (fuerza y presión específica de corte).

Figura 3.25. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 30\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$.

Figura 3.26. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$.

Figura 3.27. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 10 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$.

Figura 3.28. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 5\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^{\circ}$.

Se realiza un conjunto de experimentos adicionales con una inclinación λ_s de 8 grados con sus respectivas combinaciones de a_e y γ_n , de esta manera se tendrá un gradiente más amplio para poder confirmar las tendencias observadas en experimentos anteriores.

La [Figura 3.29](#) y la [Figura 3.30](#) muestra las fuerzas producidas con $a_e=30\mu\text{m}$ y $a_e=20\mu\text{m}$, de la misma manera que el conjunto previo de experimentos el comportamiento se mantiene, linealidad para las fuerzas de corte dependientes de γ_n y el área de corte, y exponencial para la presión específica de corte, de igual manera la inclinación de 8 grados disminuye la magnitud de ambas, en los conjuntos con $a_e=10\mu\text{m}$ y $a_e=5\mu\text{m}$ los resultados ([Figura 3.31.](#) y [Figura 3.32](#)) siguen manteniendo este comportamiento, sin embargo, la magnitud de la componente F_y en algunos casos esta alrededor de los valores obtenidos para la componente F_x , esto nos puede indicar el cambio de geometría efectiva del área de corte, la cual se ve afectada por el ángulo de inclinación.

También se observa que se mantiene el comportamiento comparado con los experimentos anteriores, pero con la diferencia de que la magnitud de las fuerzas y la presión específica de corte en el conjunto no difiere tanto una de otra, los resultados obtenidos por la variación de ángulos positivos y negativos de γ_n no son tan diferentes como en conjuntos y experimentos anteriores.

Figura 3.29. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 30 \mu m$, $\lambda_s = 8^{\circ}$.

Figura 3.30. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$.

Figura 3.31. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 10\mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$.

Figura 3.32. Fuerzas de corte ($F_x = F_c$, $F_y = F_t$) y Presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con $a_p = 5 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 8^\circ$.

Teniendo un panorama más amplio de los efectos de los ángulos y el área de corte en el proceso se puede concluir que los ángulos negativos de γ_n aumentan las fuerzas de corte, mientras que los ángulos positivos las mitigan, a su vez la fuerzas de corte aumentan al aumentar el área de corte, en cuanto a la presión específica, la combinación de áreas de corte pequeñas y ángulos positivos de γ_n aumentan su magnitud, a su vez, la inclinación λ_s reduce las magnitudes de las fuerzas de corte y la presión específica de corte, pero se observa que esta inclinación tiene un efecto geométrico, que afecta la creación de viruta, la [Figura 3.33](#). muestra el acabado superficial de la sección de corte más baja obtenida y ángulos de inclinación de cero y ocho, las fuerzas disminuyen, pero se debe a que en realidad no es un corte efectivo por la elongación del área de corte.

Figura 3.33. Comparativa visual del acabado superficial de la mínima sección de corte lograda con diferentes inclinaciones.

Modelo de corte con herramienta de filo único

4.1. Bases del modelo de micro corte de filo único

Los resultados de los experimentos obtenidos en el capítulo anterior nos dan un amplio panorama del comportamiento que tienen las fuerzas al modificar los parámetros del proceso de corte de filo único, las fuerzas de corte tienen una relación lineal entre el ángulo de desprendimiento y el área de corte, mientras que la presión específica de corte una relación logarítmica para las diferentes condiciones de profundidad y ancho de corte en relación al ángulo de desprendimiento, las magnitudes de ambas pueden ser afectadas por el ángulo de inclinación de la herramienta. Entender la interacción de estos elementos es fundamental para la elaboración del modelo ([Brecher, Esser, and Witt 2009](#)), el modelo debe de ser fácil de implementar y que tome en cuenta las interacciones que han arrojado los experimentos realizados. Secciones de corte por debajo de los 3 μm demuestran un comportamiento dominado por el radio de la punta de la herramienta, cuando el radio de punta es mayor a la sección de viruta sin deformar, los fenómenos observados en los experimentos dejan de aplicarse, y se observa una discontinuidad en el comportamiento de la presión específica de corte ([Yoon and Ehmann 2016](#)), es así como se marca el límite de un modelo mecanicista en las condiciones presentadas en este trabajo.

Basado en la teoría de corte oblicuo y en la teoría de deformación basadas en el ángulo de desprendimiento (Ozturk and Altan 2012), se propone una expresión que considere la geometría de la herramienta en términos de la presión específica de corte, la cual se presenta en la ecuación (4.1).

$$k_s = k_0(1 + k_1\gamma_n + k_2\lambda_s)(a_e \cdot \text{sen } \chi_r)^{-m} \quad (4.1)$$

La presión específica de corte (k_s) está en función de la relación lineal del ángulo de desprendimiento de la herramienta (γ_n) y la inclinación (λ_s) de la misma, esta relación lineal se ve afectada por el efecto logarítmico del área de corte, el área de corte depende del ángulo de posicionamiento de la herramienta (χ_r). Esta función consta de cuatro coeficientes (k_0, k_1, k_2, m) que deben de ser calculados para cada conjunto de herramienta-material elegidos para el micromecanizado.

Con la presión específica de corte se puede tener un control más completo del comportamiento del proceso, pues esta describe las condiciones a las que está sometida la herramienta y los efectos que la geométrica tiene en las fuerzas que se producen en el micromecanizado, la presión específica de corte es un instrumento que describe con precisión el proceso y se ha implementado con éxito para el monitoreo de procesos de mecanizado (Saglam 2011).

4.2. Comparación del modelo de corte de filo único con datos experimentales.

Con la definición de la expresión del modelo propuesto, se procede a comparar los resultados obtenidos con los datos que se pueden calcular de la función. Se calculan los coeficientes (k_0, k_1, k_2, m) que corresponden a las condiciones de mecanizado de los primeros conjuntos seleccionados del capítulo anterior, la [Figura 4.1](#) muestra una comparativa de los datos experimentales de K_{sx} y K_{sy} con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $a_p = 20\mu\text{m}$ y una inclinación de cero grados, la superficie teórica creada con la función propuesta se ajusta con un rango de 92% de precisión con los datos experimentales en las dos componentes, en presiones específicas de mayor magnitud, las cuales son causa de áreas de corte más pequeñas, es donde el modelo se separa un poco del comportamiento experimental, lo que concuerda con la frontera de aplicación planteada en el capítulo anterior.

La interpretación de la influencia de los parámetros geométricos en el proceso es adecuada permitiendo de esta manera calcular las presiones específicas, y con esto, las fuerzas de corte que se producen con determinadas variables.

Figura 4.1. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con datos experimentales ($a_p = 30\mu\text{m}$ y $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 0$).

Aplicando los parámetros del siguiente conjunto de experimentos se obtienen los resultados que se muestran en la [Figura 4.2](#), la cual compara K_{sx} y K_{sy} con $a_p = 10\mu\text{m}$ y $a_p = 5\mu\text{m}$. De igual manera que la comparativa anterior la función es capaz de describir el comportamiento del proceso de corte, esta vez con un 90% de precisión.

Cuando se comparan las magnitudes de K_{sx} y K_{sy} con los resultados de la [Figura 4.1](#) se puede distinguir claramente como la pendiente exponencial de la presión específica es más brusca. En la presión específica de corte K_{sy} se puede apreciar más claramente como la dispersión aumenta al acercarse a áreas de corte pequeñas, en ambas gráficas alrededor de los $5\mu\text{m}$ de a_e y con ángulos negativos la presión específica se dispara, en este rango es donde los fenómenos del micromecanizado ocasionados por el radio de punta de la herramienta empiezan a ser más evidentes, sin embargo, el modelo es capaz de obtener buenos resultados aún alrededor de los $3\mu\text{m}$.

Figura 4.2. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) con datos experimentales ($a_p = 30\mu\text{m}$ y $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 0$).

Las comparativas de los demás conjuntos de condiciones se muestran el [Anexo A](#), en las cuales se sigue manteniendo una buena precisión que ronda el 92% con respecto a los datos experimentales, esto nos demuestra que el modelo es válido para un gradiente amplio de condiciones de mecanizado.

Las dispersiones observadas en los conjuntos de área de corte reducida pueden ser ocasionadas, además del efecto de la punta de la herramienta, por el tamaño de grano del material elegido, con tamaños de grano pequeños, el material es más resistente, mientras que con granos de mayor tamaño, el material es más frágil, cuando la aleación tiene granos variados, estos al dislocarse pueden producir estos disparos en las fuerzas de corte ([X. Wu et al. 2015](#)), el uso de una media aritmética del valor de las fuerzas que se obtuvieron en los experimentos ha mitigado el efecto del material en el modelo.

Aun cuando el modelo es lo suficientemente robusto para describir el proceso, es necesario garantizar las condiciones de corte adecuadas, pues como el análisis ha demostrado, a pesar de que se pueden tener rangos de trabajo aceptable en cuanto a fuerzas de corte, el acabado superficial de la geometría mecanizada puede verse afectado si el ángulo de inclinación no es el adecuado. Esto lleva a la necesidad de la elaboración de estrategias de mecanizado que garanticen la calidad de la geometría deseada.

Estrategias de mecanizado para el corte de filo único

5.1. Estrategias de mecanizado para el corte de filo único.

La posición de la herramienta con respecto a la superficie a mecanizar es un elemento crucial, de esta dependen el acabado superficial, las magnitudes de las fuerzas y de la presión específica de corte. Dependiendo de la forma en que la máquina herramienta que se use posicione el filo de la herramienta en el espacio de trabajo, puede llegar a modificar los valores geométricos de los ángulos de esta con respecto a la superficie a mecanizar, herramientas con ángulos de corte y posicionamiento adecuados pueden perder sus ventajas si su posicionamiento no cumple con las condiciones adecuadas para poder posicionar y mantener sus condiciones de mecanizado. Con la información adquirida en los experimentos se pueden definir zonas de mecanizado que ofrecen las condiciones más adecuadas dependiendo de las geometrías que se requieran mecanizar. La geometría que se desea mecanizar se puede dividir en diferentes zonas, las cuales presentan diferentes grados de dificultad para el posicionamiento adecuado de la herramienta, estas zonas varían desde aquellas que aportan las mejores condiciones de mecanizado las cuales garantizan un buen acabado superficial y una formación de viruta adecuada, hasta las zonas en las cuales no se puede ni obtener un corte preciso ni un acabado superficial aceptable.

Los resultados experimentales arrojan que la posición más estable de la herramienta durante el proceso de corte de filo único es aquella cuando la herramienta

esta perpendicular a la trayectoria de corte ($\lambda_s=0^\circ$), y a su vez es la condición en la cual se ha podido observar un mejor acabado superficial. La condición geométrica que más afecta la sección de corte es el ángulo de posicionamiento de la herramienta (χ_r), este ángulo puede crecer o disminuir dependiendo de cómo su posición evolucione a lo largo de la trayectoria de corte, la combinación entonces de cómo se modifique el valor del ángulo de inclinación (λ_s), y el ángulo de posicionamiento (χ_r) durante la planificación de las trayectorias de corte definirán las magnitudes de las fuerzas y presiones específicas del proceso, así como el acabado superficial de la geometría obtenida. El efecto combinado de ambas condiciones da como resultado la definición de las zonas de trabajo, y dependiendo de la dirección de avance lateral (f_l) y del avance en la dirección de corte (f_d) se define al filo de corte principal (E_m) y al filo auxiliar de corte (E_s) en conjunto con la superficie de flanco (E_r) pueden afectar la remoción de material (Figura 5.1)

Figura 5.1. Ángulos de corte del proceso de micromecanizado con herramienta de filo único y definición de filo principal de corte (E_m), filo auxiliar de corte (E_s) y superficie de flanco (E_r).

5.2. Zonas de mecanizado que dependen del ángulo λ_s .

Las zonas de trabajo definidas por el ángulo de inclinación (λ_s) varían según la herramienta se acerca o aleja de una posición perpendicular a la trayectoria de corte, esta dirección se define con el vector de la velocidad de corte tal y como se muestra en la [Figura 5.2](#).

Figura 5.2. Zonas de mecanizado definidas por el ángulo de inclinación.

Cuando la inclinación de la herramienta se acerca a la dirección avance de corte f_d (el ángulo de inclinación disminuye) el efecto que produce esta posición es la modificación del espesor de viruta real, esto modifica las condiciones de corte y por lo tanto las fuerzas que se obtienen en el proceso, así como el acabado superficial de la pieza mecanizada.

Incluso cuando las condiciones de corte han cambiado se pueden considerar como posibles zonas para mecanizar, trayectorias de corte con este tipo de inclinaciones se pueden clasificar como de zonas no adecuadas, en las cuales el mecanizado de la geometría deseada es posible, pero el espesor de viruta real no corresponde con el programado, lo que provoca una modificación de las fuerzas de corte y no se obtendrán buenos acabados superficiales. Las zonas no optimas de corte se producen cuando la inclinación de la herramienta ronda un valor medio entre el avance de corte (f_d) y la perpendicularidad, en estas condiciones el mecanizado mejora, pero sin llegar a ser óptimas.

Si el ángulo de inclinación ronda la perpendicularidad con respecto a la dirección de avance de corte (f_d) , las condiciones programadas de espesor de viruta están dentro de un rango equivalente a los que realmente se están produciendo, esta zona optima de mecanizado obtiene la mejor combinación de condiciones de corte para obtener un buen control del proceso y un acabado superficial adecuado.

Un ángulo de inclinación que sobrepasa la perpendicularidad en dirección contraria al avance de corte (f_d) produce una elongación extrema del espesor de viruta, y a su vez la superficie de flanco (E_r) puede causar una interferencia mecánica con la pieza mecanizada, esta zona es no útil para el mecanizado con herramienta de filo único.

5.3. Zonas de mecanizado que dependen del ángulo χ_r .

Otro tipo de zonas de mecanizado son aquellas que se definen por el ángulo de posicionamiento (χ_r), este parámetro tiene un efecto en el área de corte efectiva, para mantener un resultado óptimo, por lo que es necesario que en el proceso de corte mantenga el valor real del ángulo de posicionamiento, lo que requiere que se mantenga el valor geométrico definido por la herramienta de corte en relación con el plano de trabajo supuesto (Figura 5.3).

Figura 5.3. Zonas de mecanizado definidas por el ángulo de posicionamiento.

Una zona considerada no útil en el proceso es cuando la posición del plano de trabajo supuesto con respecto al filo de corte principal (E_m) tiende a ser paralelos, lo que equivale a que el ángulo χ_r tienda a cero grados, esta zona de mecanizado elonga el contacto entre la pieza mecanizada y la herramienta de corte a lo largo del

filo principal de corte, lo que produce un área de corte que no es equivalente a la programada, además aumenta el desgaste de la herramienta y un produce un acabado superficial no aceptable.

Cuando el ángulo χ_r se aleja de cero, pero sigue sin alcanzar su valor nominal geométrico se considera que la herramienta está en una zona de mecanizado no adecuada, la formación de viruta será posible pero la reducción del área de corte sigue siendo considerable, así como el contacto elongado a lo largo de el filo de corte principal E_m . La zona optima de mecanizado consta en mantener el valor real del ángulo de posicionamiento al valor nominal del ángulo χ_r , de esta manera el área de corte real se apegará al área de corte programada, y debido a esto se obtendrán las fuerzas de corte esperadas, así como un buen acabado superficial.

Una zona no optima es aquella en que el ángulo de posicionamiento real sobrepasa el valor nominal de χ_r , la particularidad de esta zona es que el mecanizado es posible, pero dependiendo del crecimiento de ángulo real de posicionamiento el filo de corte auxiliar de corte (E_s) puede llegar a arrancar material, el cual puede variar desde la remoción de rebaba ocasionada por el corte del filo principal de una pasada anterior, hasta la interferencia con la geometría realizada modificando el resultado del mecanizado.

5.4. Planeación de trayectorias de corte.

Con las zonas de mecanizado definidas se puede hacer una planeación adecuada de trayectorias para el mecanizado con herramienta de filo único, para sacar el mayor provecho del proceso y del modelo de corte propuesto, es necesario que la máquina a utilizar sea capaz de orientar la herramienta que mantengan los valores óptimos de χ_r , λ_s y γ_n , y así obtener un mecanizado adecuado, y cuando no sea posible, evitar las zonas no útiles.

Hay tres tipos de trayectorias para el corte de filo único, aquellas en las que ángulo de inclinación λ_s es dominante en el comportamiento del corte, esto sucede cuando se tienen trayectorias lineales o curvas que hacen que el vector de velocidad siga una dirección hacia arriba o abajo (equivalente a un movimiento en los planos **X-Z** con avance en **X** o **Y-Z** con avance en **Y**) sobre la superficie que se quiere mecanizar, aquellas trayectorias donde el ángulo de posicionamiento χ_r es dominante en el comportamiento del corte, sus desplazamientos consisten en trayectorias rectas o curvas en el plano **X-Y** con un avance en dirección **Z**, y también existen las trayectorias que combinan ambos comportamientos, donde el ángulo dominante no siempre el de inclinación ni el de posición, pues la geometría deseada exige que durante toda la trayectoria cambie uno u el otro ángulo ([Figura 5.4](#)).

Figura 5.4. Clasificación de trayectorias de corte en el micromecanizado de filo único.

Como se muestra en la figura anterior, una sola pieza a mecanizar puede requerir el uso de todos los tipos de trayectorias, la selección o el descarte de ellas depende de la complejidad de la geometría deseada, pues con geometrías simples, las trayectorias dominadas por λ_s o χ_r pueden llegar a ser intercambiables, pero en geometrías con mayor complejidad, donde las formas requieren curvas caprichosas (micro hélices) solo serán capaces de mecanizarse usando una trayectoria combinada.

La orientación de la herramienta sobre su propio eje (C) modifica el valor de γ_n , la modificación de este ángulo dentro de las trayectorias de inclinación ayuda a compensar el efecto de trabajar en una determinada zona de mecanizado, pero siempre hay que observar que el rango de γ_n este dentro de unos márgenes predeterminados, pues como se pudo observar en el capítulo 3 el cambio del valor de

este ángulo puede hacer que las fuerzas aumenten, lo que se traduce en malos acabados superficiales, en un desgaste mayor de la herramienta de corte y aumentan la deflexión de la herramienta, lo que hace que la precisión del mecanizado se vea afectada, la [Tabla 5.1.](#) muestra las diversas condiciones para clasificar la zona de corte comparando el ángulo de ataque crítico (γ_{ncr}), el ángulo de ataque seleccionado (γ_{ns}), el ángulo de ataque crítico no utilizable (γ_{ncre}) contra el ángulo de desprendimiento de la herramienta de corte (γ_n).

Tabla 5.1.

Influencia del ángulo γ_n en las zonas de corte.

Condición.	Zona de corte
$\gamma_n < \gamma_{ncr}$	no adecuada.
$\gamma_n < \gamma_{ns}$	no óptima.
$\gamma_n = \gamma_{ns}$	óptima.
$\gamma_n > \gamma_{ncr}$	no óptima.
$\gamma_n > \gamma_{ncre}$	no útil.

A su vez se pueden definir las zonas de mecanizado con el ángulo de posicionamiento χ_r , este ángulo nominal se compara con el ángulo de posicionamiento seleccionado (χ_{rs}) y el ángulo de posicionamiento crítico (χ_{rcr}), para obtener las condiciones y clasificarlos como lo muestra [Tabla 5.2.](#)

Tabla 5.2.Influencia del ángulo χ_r en las zonas de corte.

Condición.	Zona de corte
$\chi_r > \chi_{rs}$	no óptima.
$\chi_r = \chi_{rs}$	óptima.
$\chi_r < \chi_{rs}$	no óptima.
$\chi_r < \chi_{rcr}$	no útil.
$\chi_r < 0$	no útil.

Considerar las interferencias mecánicas es fundamental para garantizar un mecanizado óptimo, las condiciones que se deben de cumplir a lo largo de la trayectoria de corte seleccionada son: que el filo de corte principal sea diferente a la dirección de avance lateral ($E_m \nparallel f_l$), que el filo auxiliar de corte sea diferente a la dirección de avance lateral ($E_s \nparallel f_l$) y que la superficie de flanco sea diferente a la avance de dirección ($E_r \nparallel f_d$).

Con una planeación adecuada de la estrategia de mecanizado se garantiza el máximo provecho de las características del proceso de corte propuesto, la [Figura 5.5](#) muestra el efecto combinado de las condiciones en trayectorias de corte.

Figura 5.5. Ejemplo de las diferentes zonas de mecanizado en función de las trayectorias seleccionadas.

6.1. Comprobación del modelo de corte en maquina hibrida de 6 grados de libertad.

Para la comprobación final del modelo de corte, se usa una máquina herramienta diseñada con el proceso en mente, esta máquina herramienta consta de un sistema hibrido serial paralelo que le permite tener un alto grado de rigidez, una alta precisión y la capacidad de orientar la herramienta en su totalidad en un área de trabajo de 100x100x260 mm ([Fajardo-Pruna, López-Estrada, Pérez et al. 2019](#)) .

Un elemento fundamental para garantizar trayectorias de alta precisión y del correcto posicionamiento de la herramienta es la localización de la misma en el espacio de trabajo, para esta función se diseña un sistema de visión estereoscópico mejorado para la localización de la punta de la herramienta ([López-Estrada, Fajardo-Pruna, Sánchez-González, Pérez, Fernández-Robles, et al. 2018](#)) del cual se describen sus principales características en el [Anexo B](#).

El sistema hibrido proporciona la capacidad de orientar la herramienta de manera completa (en sus 6 ejes de posicionamiento) que consta de 3 ejes paralelo-rotula que es su combinación de movimientos hacen que la base donde se coloca la herramienta se incline según se requiera, a su vez se tiene un servo motor que hace que gire la herramienta sobre si propio eje (**C**), las posiciones en las cuales el mecanismo paralelo no es capaz de llegar o de cumplir con las condiciones de mecanizado necesarias, una cama de coordenadas **X-Y** hace la compensación necesaria por

medio de desplazamientos combinados en el plano **X-Y**, el sistema de visión proporciona la posición real de la punta de la herramienta, y con esta información se programan las trayectorias en el control numérico Fagor 8070 que se desean realizar (Figura 6.1).

Figura 6.1. Máquina herramienta híbrida de 6 grados de libertad para el proceso de micromecanizado con herramientas de filo único.

La selección de elementos mecánicos de alta precisión en conjunto con el control y el sistema de visión dotan a la máquina con todas las características necesarias para poder sacar el mayor provecho al modelo de corte propuesto, para su comprobación se realizan dos experimentos. El primer experimento consta de la comprobación del modelo por medio de cortes lineales en diferentes inclinaciones, en las cuales la máquina herramienta debe de mantener las condiciones de corte programadas, esto a su vez sirve de comprobación de la precisión de la máquina herramienta en su posicionamiento. El segundo experimento consta de realizar una

trayectoria combinada manteniendo la herramienta en zonas específicas de mecanizado.

6.2. Cortes lineales con diferentes inclinaciones.

Para verificar el comportamiento del modelo, en la máquina herramienta híbrida se mecanizan micro cortes lineales con una herramienta con $\chi_r=60^\circ$, a diferentes inclinaciones, la máquina herramienta sigue una trayectoria recta a lo largo de una probeta de Aluminio 7075-T6 escalonada a 25, 20, 15, 10 y 5 grados como se muestra en la [Figura 6.2](#). En cada rampa se hacen cortes desde $50 \times 50 \mu\text{m}$ hasta bajar a $5 \times 5 \mu\text{m}$, lo cual recrea un amplio rango de condiciones de mecanizado, de esta manera se garantiza como una prueba adecuada del modelo de corte propuesto.

Figura 6.2. Trayectorias lineales a diferente inclinación para la comprobación del modelo de corte.

Los resultados obtenidos tienen un comportamiento similar al de los datos presentados en el Capítulo 3, la magnitud de la fuerza varía según el tamaño del área de corte, siendo las áreas con mayor dimensión las que tienen mayor fuerza de corte, no se observa un efecto adicional en las fuerzas, por lo que las condiciones de corte se han podido mantener sin importar la inclinación a la que se mecaniza, los resultados del experimento se muestran en la [Figura 6.3](#).

Figura 6.3. Fuerzas de corte del experimento comparadas con el modelo propuesto (línea punteada).

6.3. Corte combinado aplicando estrategias de mecanizado.

El segundo experimento consta en mecanizar una trayectoria tomando en cuenta las estrategias de mecanizado previamente exploradas, así como la medición del acabado superficial de la geometría obtenida, dentro de las características de la máquina herramienta híbrida, cuenta con la capacidad de inclinar la herramienta hasta 30° , esto en conjunto con el ángulo de la herramienta $\chi_r=60^\circ$ con pasadas de $a_p=50\ \mu\text{m}$ y $a_e=10\ \mu\text{m}$ serán las bases para la selección de las zonas de mecanizado en la geometría planeada.

En una probeta de Aluminio 7075-T6 de 2x2x1 mm se mecanizara una geometría que incluye trayectorias rectas y arcos (Figura 6.4), de esta manera se pondrán a prueba las estrategias de mecanizado, se mantendrá el corte en una primera etapa en la zona no optima de mecanizado, para después pasar a la zona optima de mecanizado por medio de una zona de transición.

Figura 6.4. Esquema de la trayectoria de corte en conjunto con las zonas de mecanizado.

La trayectoria consta de diferentes segmentos, siguiendo la numeración de la [Figura 6.5](#), El segmento 1 al 2 consta de una trayectoria recta con una pendiente de 50° en la cual se planea posicionar la herramienta de corte en una zona de mecanizado no óptima, con fines de probar el modelo y las estrategias, del punto 2 al 4 la trayectoria forma un arco con un radio de 0.5mm, le sigue una sección recta horizontal de .319mm, del punto 6 al 6 la trayectoria forma un arco de 0.5mm, el último segmento forma una trayectoria recta del punto 6 al 7 con una pendiente de 150° .

Figura 6.5. Segmentos de la trayectoria de mecanizado.

En cuanto a zonas de mecanizado, desde el punto 1 al 3 se mantendrá la posición de la herramienta con respecto de la normal de la superficie con 20° de desfase, de esta manera se forzará una zona no óptima de mecanizado para su análisis, del punto 3 al punto 4 se formará una zona de transición, en la cual la herramienta pasará de su desfase de 20° con respecto a la normal a 0° , lo que hará que cambien las condiciones de mecanizado en ese segmento, del punto 4 al 5 la herramienta se mantiene en una zona óptima donde se mantiene los 0° con respecto a la normal, la

zona conformada entre el punto 5 al 6 se programa para mantener las condiciones óptimas, el último segmento del punto 6 al 7 se sigue manteniendo la zona optima de mecanizado. Las fuerzas se capturan usando un dinamómetro Kistler MiniDyn 9256B y los resultados se muestran en la [Figura 6.6](#), se puede observar como el modelo propuesto (linea) sigue el comportamiento de las fuerzas que se producen en el proceso de micromecanizado con herremineeta de filo unico, la tendencia de las fuerzas (linea discontinua) describe los cambios de condiciones de mecanizado, los puntos alejados a la tendencia pueden ser fenomenos relacionados con el micro corte (fronteras de grano del material, deformacion elastica) y el modelo es capaz de seguir la zona de transicion de condiciones de mecanizado.

Figura 6.6. Resultados de las fuerzas de corte en la trayectoria realizada comparadas con el modelo de corte propuesto.

6.4. Análisis de la geometría obtenida.

La geometría obtenida se compara con la trayectoria programada en la ,la cual muestra las dimensiones de la pieza mecanizada, se puede ver que la trayectoria programada sigue el contorno de las rectas y los arcos ([Figura 6.7a](#)), la [Figura 6.7b](#) muestra el acabado superficial que se obtiene cuando se mantiene la herramienta en las zonas óptimas y no óptimas, en contraste , la [Figura 6.7c](#) muestra el acabado de la misma trayectoria del apartado anterior, pero en esta ocasión se mantiene la herramienta perpendicular al plano **X-Y** a lo largo de todos los segmentos de la trayectoria de corte, esto corrobora lo obtenido en el Capítulo 3 por el efecto de la inclinación de la herramienta de corte, los datos obtenidos de la rugosidad del mecanizado óptimo ([Figura 6.8](#)) son comparables con otras tecnologías de arranque de material.

Figura 6.7. Comparación de la geometría de corte programada con la geometría obtenida.
a) Acabado superficial de las zonas de mecanizado óptima y no óptima, b) acabado superficial sin orientación de la herramienta de corte.

Figura 6.8. Rugosidad de la superficie mecanizada dentro de la zona óptima.

Por medio de un microscopio DinoLite AM7515MZT se miden las dimensiones de la geometría obtenida (Figura 6.9), comparados con los datos programados de la sección 6.3 se puede observar que las dimensiones rondan los valores esperados, tomando en cuenta la incertidumbre la máquina herramienta (Fajardo-Pruna, López-Estrada, Pérez et al. 2019) los resultados demuestran la efectividad del modelo para el proceso de micromecanizado de filo único.

Figura 6.9. Medidas de la geometría obtenida por medio de microscopio DinoLite.

Conclusiones

7.1. Conclusiones del trabajo presentado.

Este trabajo de tesis presenta el análisis y modelado del proceso de micromecanizado con herramienta de filo único, el modelado tiene una base mecanicista y el análisis se enfoca en explorar los límites aplicables del modelo en el proceso de micro corte.

El modelo se obtiene de una serie de experimentos por los cuales se analiza el comportamiento de la evolución de las fuerzas en relación con las características geométricas de la herramienta y los parámetros del corte requerido en el proceso. El comportamiento arroja una relación lineal entre el ángulo de desprendimiento y el área de corte, a su vez un comportamiento exponencial del mismo ángulo con el área de corte con respecto a la presión específica. El ángulo de inclinación influye en las fuerzas que se obtienen en el proceso, pero se observa que tiene mayor influencia en el acabado superficial de la pieza mecanizada.

Con la obtención del modelo se proponen estrategias de mecanizado las cuales se enfocan a sacar el mayor provecho del proceso propuesto, clasificando las características del posicionamiento de la herramienta en zonas las cuales arrojan resultados específicos en las trayectorias de corte planeadas.

Durante el desarrollo del trabajo, se desarrolla un sistema de visión el cual es aplicable para las dos máquinas herramientas diseñadas para el micromecanizado, el cual es una técnica no invasiva para localizar la punta de la herramienta la cual es crucial para lograr un mecanizado preciso y controlado de las geometrías deseadas.

El modelo se comprueba con dos experimentos los cuales arrojan resultados satisfactorios, el modelo propuesto es capaz de predecir las fuerzas que se obtienen en el micro corte basado en las condiciones geométricas de la herramienta y en las características programadas de la trayectoria de micro corte.

Con los resultados obtenidos en este trabajo se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se ha desarrollado un modelo mecanicista para el proceso de micro mecanizado con herramientas de filo único el cual relaciona las características geométricas de la herramienta y los parámetros programados de corte con las fuerzas y la presión específica de corte.
2. Con este modelo se exploran los límites de aplicación de un método puramente mecanicista para el proceso de micro mecanizado de filo único, con el cual se puede llegar a predecir con alta confianza profundidades de corte de alrededor de $3\mu\text{m}$.
3. Se plantean y exploran diferentes estrategias de mecanizado las cuales se enfocan en zonas en las cuales los resultados varían según la posición de la herramienta, con este se garantiza tener los mejor resultados posibles al aplicar el modelo y proceso propuesto.

4. El modelo es capaz de obtener una buena predicción las fuerzas de corte involucradas en el proceso, las discrepancias de valores (picos) en los datos obtenidos son fenómenos característicos del micro corte.
5. El proceso propuesto se consolida como una alternativa a las diferentes tecnologías de micro arranque de material, con una herramienta más sencilla y la capacidad de obtener un rango amplio geometrías con acabados superficiales competentes.
6. Por medio de las estrategias de mecanizado propuestas se puede llegar a compensar grados de libertad de una máquina herramienta, y obtener geometrías optimas por medio de la combinación de trayectorias que dependan del ángulo de inclinación o del ángulo de posicionamiento.
7. La aplicabilidad del modelo depende de los grados de libertad de la máquina herramienta, su precisión de posicionamiento y la capacidad del sistema de control, pues el modelo requiere tener el cambio de la posición y orientación de la herramienta a lo largo de la trayectoria de corte para garantizar resultados óptimos.
8. Los resultados obtenidos durante el trabajo demuestran que el modelo obtenido, en conjunto con máquinas herramienta especializadas en el proceso propuesto son alternativas viables y confiables como una tecnología emergente en el campo de la micro fabricación.

7.2. Trabajos futuros

El desarrollo de una nueva tecnología de micro mecanizado basados en el modelo propuesto abre la siguiente gama de posibilidades de exploración del conocimiento adquirido:

- Ampliar el modelo de corte para rebasar la frontera de la metodología mecanicista, incluyendo fenómenos característicos de los procesos de arranque de material a nivel micro.
- La inclusión del efecto del desgaste de la herramienta en el proceso de micro corte con herramienta de filo único.
- La inclusión directa en el modelo de las estrategias de mecanizado.
- El desarrollo de un diseño óptimo de la herramienta de filo único que maximice los alcances del modelo mecanicista propuesto.

Estas líneas de investigación aumentaran el alcance del modelo propuesto, lo que encamina al proceso de micro mecanizado con herramienta de filo único como una alternativa sólida y fácil de implementar en el demandado mercado de las tecnologías de micro fabricación.

Superficies del modelo de corte.

B.1. Comparativa de datos experimentales de presión específica de corte con el modelo teórico.

Las siguientes figuras muestran el comportamiento de la presión específica de corte (K_{sx} , K_{sy}) de los experimentos con la respectiva combinación de condiciones (puntos) presentadas en el Capítulo 3, y se comparada con el modelo propuesto el cual es representado por una superficie.

El material utilizado es Aluminio 7075-T6, con una velocidad de constante, el modelo es capaz de representar el comportamiento del fenómeno de micro corte con herramienta de filo único con un alto grado de fidelidad.

Figura A.1. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30 \mu\text{m}$ y $a_p = 20 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 0$.

Figura A.2. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10 \mu\text{m}$ y $a_p = 5 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 0$.

Figura A.3. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30\mu\text{m}$ y $a_p = 20\mu\text{m}$, $\lambda_s = 4^\circ$.

Figura A.4. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10\mu m$ y $a_p = 5\mu m$, $\lambda_s = 4^\circ$.

Figura A.5. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 30\mu m$ y $a_p = 20\mu m$, $\lambda_s = 8^\circ$.

Figura A.6. Comparación de la función propuesta de presión específica de corte (superficie) con datos experimentales de K_{sx} , K_{sy} (puntos) con $a_p = 10\mu m$ y $a_p = 5\mu m$, $\lambda_s = 8$.

Determinación de la posición de la punta de la herramienta.

B.2. Ámbito de aplicación del sistema de visión artificial.

La determinación de la posición de la de la punta de la herramienta es de alto interés, dada la naturaleza de la maquina hibrida de 6 grados de libertad en conjunto con el control industrial Fagor 8070 requieren la información de las coordenadas de la punta de la herramienta para poder obtener una trayectoria de corte precisa (Figura B.1). El espacio de trabajo restringido por las características geométricas de la máquina herramienta limita el tipo de tecnología que puede adaptarse para esta función, con este en mente se elige la opción de diseñar un sistema de visión estereoscópica el cual es modular, de un costo aceptable y con alta precisión.

Figura B.1. Esquema de la corrección de la trayectoria tomando en cuenta la posición de la punta de la herramienta con el sistema de visión artificial.

Las cámaras se colocan de modo que queden en posición perpendicular una de otra, y a su vez, cada una está alineada al plano **XZ** y **YZ** respectivamente. Los planos en los cuales las cámaras se colocan son coplanares a los del sistema de coordenadas de la punta de la herramienta (R_{ct}), el cual por medio de la cinemática de la maquina se relaciona con los sistemas de coordenadas de la cama de coordenadas de **X-Y** (R_w), y el de la base de granito (R_b) los cuales se muestran en la [Figura B.2](#), la cual es la base para el cálculo de la trayectoria de la herramienta y su posición durante todo el tiempo del mecanizado. El comportamiento del mecanismo de la cama **X-Y** es directo (accionamiento directo de cada eje), mientras el mecanismo paralelo serial requiere el accionamiento de los ejes **Z** más dos rotaciones, la rotación del eje **C** a lo largo de la trayectoria es necesario para la compensación de movimientos parásitos que existen por la naturaleza del mecanismo serie paralelo.

Figura B.2. Sistemas de coordenadas de los diferentes elementos de la máquina herramienta de 6 grados de libertad.

Para poder definir la posición real del filo de corte es necesario medir la desviación que la herramienta tenga en relación con el sistema de coordenadas (R_{ct}), los valores necesarios para la corrección de la posición de la punta de la herramienta son Δ_x , Δ_y y $\Delta\theta$ los cuales corresponden a la desviación en x_3 , y_3 y la posición angular alrededor de z_3 respectivamente.

B.2.1. Sistema de visión artificial.

La máquina herramienta cuenta con un cabezal que se conecta a un sistema serie paralelo el cual tiene la capacidad de obtener inclinaciones de la herramienta necesarias para el posicionamiento requerido en el proceso propuesto de corte de filo único, en el cabezal se acopla el sistema de visión ([Figura B.3](#)), el cual está conformado por cámaras DinoLite AM7515MZT con aumento óptico de 273x, una resolución de 5 Megapíxeles, estas cámara están diseñadas para metrología, lo que ayuda a obtener imágenes claras y sin deformaciones.

Figura B.3. configuración de la maquina hibrida de 6 grados de libertad para corte de filo único. a) cabezal de la herramienta con el sistema de visión montado. b) Configuración mecánica paralela. c) Control CNC y PC para el análisis y monitoreo del proceso.

El diagrama de flujo general del sistema de visión se muestra en la [Figura B.4](#), una etapa de pre procesamiento la imagen se transforma a tonos de grises y transforma a su inversa a la cual se le aplica una técnica de thresholding, el resultado obtenido se convierte a una imagen binaria donde los valores lógicos de uno indican que el píxel pertenece a la herramienta y los valores de cero indican lo contrario. Debido a que la herramienta de corte tiene un cuerpo cilíndrico y metálico (altamente reflectivo), es común que se vean reflejos en las imágenes capturadas, lo cual puede inducir problemas al realizar una imagen binaria de las mismas, por lo que pixeles con valor lógico cero que quedan aislados debido a este efecto con tratados con filtros Gaussianos y técnicas de rellenado los cuales mitigan el efecto de los reflejos capturados, el algoritmo es capaz de identificarlos y eliminarlos de la segmentación de la herramienta de corte.

Figura B.4. Diagrama de flujo del procesamiento de información del sistema de visión artificial estereoscópico.

Una vez localizada la herramienta el siguiente paso es determinar su eje central, el cual coincide con z_3 del sistema de coordenadas de la máquina herramienta, para esto se localizan los lados del cuerpo cilíndrico de la herramienta, los cuales se representan con dos vectores, un vector geoméricamente interpolado paralelo al centro de estos vectores es calculado y representado por una línea, la cual a su vez se extiende a lo largo de sí mismo. Se calculan dos líneas guía auxiliares para ayudar a la alineación de las cámaras, y con esto se crean dos regiones de interés, el cuerpo de la herramienta y la punta de esta. El diámetro de la herramienta en conjunto con el aumento utilizado para las imágenes se usa para el cálculo de la relación de pixeles por milímetro.

Con la herramienta localizada, se procede a identificar la punta de esta, geoméricamente se le puede considerar como una esquina, un algoritmo basado en el presentado por Harris and Stephens se aplica para encontrar la punta de la herramienta, el cual combina el método de identificación de esquinas y contornos con autocorrelación local, la [Figura B.5](#) muestra las diferentes etapas del procesamiento de la imagen y la posición de la punta de la herramienta.

Figura B.5. Las diferentes etapas del procesamiento de imagen, a) Imagen original, b) tonos de grises, normalización del histograma y filtro Gaussiano, c) Imagen inversa, d) Limpieza de la imagen e identificación de la herramienta, e) Localización de contornos y esquinas, f) Alineación de la herramienta y localización de la punta de la herramienta.

Las coordenadas de la punta de la herramienta se guardan en dos variables, una por cada cámara, estas coordenadas son proyectadas al eje central de la herramienta, y con esto se calcula la distancia en conjunto con el radio de milímetros por píxel previamente obtenido.

B.2.2. Corrección de posición con los datos adquiridos.

Teniendo el desfase de la punta con respecto a los ejes x_3 , y_3 , (Δ_x , Δ_y) y una posición inicial del eje C ($\Delta\theta$) que se representan en la ecuación (1), se hacen los cálculos necesarios para la corrección de la posición de la herramienta (ecuación 4 y 5) para mantener el filo de corte tangente a la trayectoria **P**, (Figura B.6).

Figura B.6. Diagrama esquemático de la trayectoria y la rotación de la herramienta.

Estos desplazamientos corresponden a los movimientos de un círculo que tiene como radio el delta (r_Δ) el cual se obtiene de la ecuación (3), obtenido con una posición real del filo de corte definida por Φ y donde γ es la suma angular de los movimientos parásitos del mecanismo serie paralelo en conjunto con la actuación del eje **C** (ecuación 2).

$$\Delta\theta = \text{atan}\left(\frac{\Delta_x}{\Delta_y}\right) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \Delta\theta + \gamma \quad (2)$$

$$r_\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2} \quad (3)$$

Con los cálculos obtenidos de las ecuaciones anteriores, se les aplica una matriz de rotación para relacionarlas con el sistema de coordenadas del granito ($\mathbf{R}_b$), el cual es el sistema de coordenadas general (ecuación 6).

$$\delta_{xr} = r_\Delta \cos(\phi) \quad (4)$$

$$\delta_{yr} = r_\Delta \sin(\phi) \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}_{\mathbf{R}_b} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} \delta_{xr} \\ \delta_{yr} \\ 0 \end{bmatrix}_{\mathbf{R}_{ct}} \quad (6)$$

Como último paso se calculan los desplazamientos correspondientes a los ejes, que serán los datos que se introducen en el código ISO de la trayectoria de corte, estos datos se obtienen de las ecuaciones 7,8,9.

$$X_p = X + \delta_x \quad (7)$$

$$Y_p = Y + \delta_y \quad (8)$$

$$Zi_p = Zi + \delta_z \quad (9)$$

Bibliografía

- Albrecht, Paul. 1965. "Dynamics of the Metal-Cutting Process." *Journal of Engineering for Industry* 87 (4). American Society of Mechanical Engineers: 429. doi:10.1115/1.3670857.
- Alting, L., F. Kimura, H.N. Hansen, and G. Bissacco. 2003. "Micro Engineering." *CIRP Annals* 52 (2). Elsevier: 635–57. doi:10.1016/S0007-8506(07)60208-X.
- Aramcharoen, A, P T Mativenga, S Yang, K E Cooke, and D G Teer. 2008. "Evaluation and Selection of Hard Coatings for Micro Milling of Hardened Tool Steel." doi:10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011.
- Arrazola, P J, and T Özel. 2008. "Numerical Modelling of 3D Hard Turning Using Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Method." *Int. J. Machining and Machinability of Materials*. Vol. 3. <https://pdfs.semanticscholar.org/15f9/c6dd137c876a4bf0ae9c6f11aa81dde3e33d.pdf>.
- Bao, W.Y, and I.N Tansel. 2000. "Modeling Micro-End-Milling Operations. Part III: Influence of Tool Wear." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (15). Pergamon: 2193–2211. doi:10.1016/S0890-6955(00)00056-0.
- Baradie, M. A. 1993. "Statistical Analysis of the Dynamic Cutting Coefficients and Machine Tool Stability." *Journal of Engineering for Industry* 115 (2). American Society of Mechanical Engineers: 205. doi:10.1115/1.2901651.
- Bifano, T.G., and Y. Yi. 1992. "Acoustic Emission as an Indicator of Material-Removal Regime in Glass Micro-Machining." *Precision Engineering* 14 (4): 219–28. doi:10.1016/0141-6359(92)90019-S.

- Boswell, Brian, & M N Islam, and Ian J Davies. 2018. "A Review of Micro-Mechanical Cutting." Accessed December 25. doi:10.1007/s00170-017-0912-y.
- Brecher, C., M. Esser, and S. Witt. 2009. "Interaction of Manufacturing Process and Machine Tool." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 588–607. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.005.
- Cai, M.B., X.P. Li, and M. Rahman. 2007. "Study of the Mechanism of Nanoscale Ductile Mode Cutting of Silicon Using Molecular Dynamics Simulation." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (1). Pergamon: 75–80. doi:10.1016/J.IJMACHTOOLS.2006.02.016.
- Câmara, M. A., J. C Campos Rubio, A. M. Abrão, and J. P. Davim. 2012. "State of the Art on Micromilling of Materials, a Review." *Journal of Materials Science and Technology*. doi:10.1016/S1005-0302(12)60115-7.
- Chae, J., S.S. Park, and T. Freiheit. 2006. "Investigation of Micro-Cutting Operations." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (3–4): 313–32. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.
- Chen, Pin-Chuan, Chang-Wei Pan, Wei-Chen Lee, and Kuan-Ming Li. 2018. "An Experimental Study of Micromilling Parameters to Manufacture Microchannels on a PMMA Substrate." Accessed December 24. doi:10.1007/s00170-013-5555-z.
- Cheng, Xiang, Zhigang Wang, Kazuo Nakamoto, and Kazuo Yamazaki. 2010. "Design and Development of PCD Micro Straight Edge End Mills for Micro/ Nano Machining of Hard and Brittle Materials †." *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (11): 2261–68. doi:10.1007/s12206-010-0804-7.
- Childs, T.H.C., C.J. Evans, E.C. Browy, J.R. Troutman, and E. Paul. 2015. "Tool Temperatures and Wear in Micro-Machining Cu-Ni Alloys with Diamond Tools: Models, Simulations and Experiments." *Procedia CIRP* 31 (January). Elsevier: 270–75. doi:10.1016/J.PROCIR.2015.03.077.

- Cristofaro, S De, N Funaro, G C Feriti, M Rostagno, M Comoglio, A Merlo, C Stefanini, and P Dario. 2012. "High-Speed Micro-Milling: Novel Coatings for Tool Wear Reduction." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 63: 16–20. doi:10.1016/j.ijmachtools.2012.07.005.
- Dabade, Uday A, S.S Joshi, and N Ramakrishnan. 2003. "Analysis of Surface Roughness and Chip Cross-Sectional Area While Machining with Self-Propelled Round Inserts Milling Cutter." *Journal of Materials Processing Technology* 132 (1–3): 305–12. doi:10.1016/S0924-0136(02)00949-4.
- Fajardo-Pruna, Marcelo, Eduardo Diez, Hilde Pérez, and Antonio Vizán. 2014. "Desarrollo de Una Máquina Herramienta Paralela Para Micromecanizado Con Herramienta de Filo Único." In *Congreso Latinoamericano de Ingeniería Mecánica*, 1012–17. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Fajardo-Pruna, Marcelo, Luis López-Estrada, Hilde Pérez, Eduardo Diez, and Antonio Vizán. 2019. "Analysis of a Single-Edge Micro Cutting Process in a Hybrid Parallel-Serial Machine Tool." *International Journal of Mechanical Sciences* 151 (February). Pergamon: 222–35. doi:10.1016/J.IJMECSCI.2018.11.023.
- Fang, F Z, H Wu, X D Liu, Y C Liu, and S T Ng. 2003. "Tool Geometry Study in Micromachining." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13 (5). IOP Publishing: 726–31. doi:10.1088/0960-1317/13/5/327.
- Fortgang, Joel, William Singhose, Juan De Juanes Márquez, and Jesus Perez. 2011. "Command Shaping Control for Micro-Milling Operations." *International Journal of Control, Automation, and Systems* 9 (6): 1136–45. doi:10.1007/s12555-011-0615-3.
- Gao, Yifan, Jeong Hoon Ko, and Heow Pueh Lee. 2018. "3D Coupled Eulerian-Lagrangian Finite Element Analysis of End Milling." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (1–4). Springer London: 849–57. doi:10.1007/s00170-018-2284-3.

- Graham, E., C. I. Park, and S. S. Park. 2014. "Force Modeling and Applications of Inclined Ball End Milling of Micro-Dimpled Surfaces." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70 (1–4). Springer London: 689–700. doi:10.1007/s00170-013-5310-5.
- Gurney, J.P., and S.A. Tobias. 1961. "A Graphical Method for the Determination of the Dynamic Stability of Machine Tools." *International Journal of Machine Tool Design and Research* 1 (1–2). Pergamon: 148–56. doi:10.1016/0020-7357(61)90049-X.
- Hanna, N. H., and S. A. Tobias. 1974. "A Theory of Nonlinear Regenerative Chatter." *Journal of Engineering for Industry* 96 (1). American Society of Mechanical Engineers: 247. doi:10.1115/1.3438305.
- Hsieh, Jung F. 2010. "Mathematical Modeling of Interrelationships among Cutting Angles, Setting Angles and Working Angles of Single-Point Cutting Tools." *Applied Mathematical Modelling* 34 (10). Elsevier Inc.: 2738–48. doi:10.1016/j.apm.2009.12.009.
- Huo, Dehong, and Kai Cheng. 2013. "Overview of Micro Cutting." In *Micro-Cutting*, 1–17. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd. doi:10.1002/9781118536605.ch1.
- Ikawa, N, S Shimada, and H Tanaka. 1992. "Minimum Thickness of Cut in Micromachining." *Nanotechnology* 3 (1): 6–9. doi:10.1088/0957-4484/3/1/002.
- Jayal, Anshu D., and A.K. Balaji. 2009. "Effects of Cutting Fluid Application on Tool Wear in Machining: Interactions with Tool-Coatings and Tool Surface Features." *Wear* 267 (9–10). Elsevier: 1723–30. doi:10.1016/J.WEAR.2009.06.032.
- Jun, Martin B. G., Chanseo Goo, Mohammad Malekian, and Simon Park. 2012. "A New Mechanistic Approach for Micro End Milling Force Modeling." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 134 (1). American Society of Mechanical Engineers: 011006. doi:10.1115/1.4005429.

- Kim, Jeong-Du, and Dong Sik Kim. 1995. "Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining." *Journal of Materials Processing Technology* 49 (3–4). Elsevier: 387–98. doi:10.1016/0924-0136(94)01345-2.
- Kirsch, Benjamin, Martin Bohley, Peter Arrabiyeh, Jan Aurich, Benjamin Kirsch, Martin Bohley, Peter A. Arrabiyeh, and Jan C. Aurich. 2017. "Application of Ultra-Small Micro Grinding and Micro Milling Tools: Possibilities and Limitations." *Micromachines* 8 (9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 261. doi:10.3390/mi8090261.
- Koenigsberger, F., and A.J.P. Sabberwal. 1961. "An Investigation into the Cutting Force Pulsations during Milling Operations." *International Journal of Machine Tool Design and Research* 1 (1–2). Pergamon: 15–33. doi:10.1016/0020-7357(61)90041-5.
- König, W., K. Kutzner, and U. Schehl. 1992. "Tool Monitoring of Small Drills with Acoustic Emission." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32 (4): 487–93. doi:10.1016/0890-6955(92)90040-N.
- Liu, X., R. E. DeVor, S. G. Kapoor, and K. F. Ehmann. 2004. "The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (4): 666. doi:10.1115/1.1813469.
- López-Estrada, Luis, Marcelo Fajardo-Pruna, Lidia Sánchez-González, Hilde Pérez, Laura Fernández-Robles, Antonio Vizán, Luis López-Estrada, et al. 2018. "Design and Implementation of a Stereo Vision System on an Innovative 6DOF Single-Edge Machining Device for Tool Tip Localization and Path Correction." *Sensors* 18 (9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute: 3132. doi:10.3390/s18093132.
- López-Estrada, Luis, Marcelo Fajardo-Pruna, Lidia Sánchez-González, Hilde Pérez, and Antonio Vizán. 2018. "Design and Implementation of a Vision System on an Innovative Single Point Micro-Machining Device for Tool Tip Localization." In

International Joint Conference SOCO'17-CISIS'17-ICEUTE'17 León, Spain, September 6–8, 2017, Proceeding, 219–28.

López-Estrada, Luis, Juan Márquez, Hilde Pérez, and Antonio Vizán. 2015. "Four Axis Single Point Cutting Micro-Machining Model." In *AMPT 2015 Book of Abstracts*.

Lu, Zinan, and Takeshi Yoneyama. 1999. "Micro Cutting in the Micro Lathe Turning System." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 39. https://ac.els-cdn.com/S0890695598000923/1-s2.0-S0890695598000923-main.pdf?_tid=060e2e01-fb51-4c04-bd15-c3e95b162df1&acdnat=1544442673_25ed0d28a85e5ff29a4bc40efdeb990a.

Lutfi, Munira, Prasetyo Edi, Azuddin Mamat, and Aznihar Ahmad-Yazid. 2018. "Surface Roughness and Machining Accuracy When Micro-Turning Copper." Accessed December 31. https://umexpert.um.edu.my/file/publication/00008510_50419.pdf.

Malekian, Mohammad, Simon S. Park, and Martin B.G. Jun. 2009. "Modeling of Dynamic Micro-Milling Cutting Forces." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (7–8). Pergamon: 586–98. doi:10.1016/J.IJMACHTOOLS.2009.02.006.

Masuzawa, T. 2000. "State of the Art of Micromachining." *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. doi:10.1016/S0007-8506(07)63451-9.

Masuzawa, T., and H.K. Tönshoff. 1997. "Three-Dimensional Micromachining by Machine Tools." *CIRP Annals* 46 (2): 621–28. doi:10.1016/S0007-8506(07)60882-8.

Mekid, Samir, Tahar Laoui, and Faheemuddin Patel. 2011. "Exploring a Manufacturing Route to Produce WC-Based Micro-Cutting Tool With Nanostructured Material." In *Volume 11: Nano and Micro Materials, Devices and Systems; Microsystems Integration*, 171–76. ASME. doi:10.1115/IMECE2011-

62334.

Merchant, M. Eugene. 1945. "Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip." *Journal of Applied Physics* 16 (5): 267–75. doi:10.1063/1.1707586.

Molinari, A., and A. Moufki. 2008. "The Merchant's Model of Orthogonal Cutting Revisited: A New Insight into the Modeling of Chip Formation." *International Journal of Mechanical Sciences* 50 (2). Pergamon: 124–31. doi:10.1016/J.IJMECSCI.2007.07.015.

Moufki, A., A. Molinari, and D. Dudzinski. 1998. "Modelling of Orthogonal Cutting with a Temperature Dependent Friction Law." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 46 (10). Pergamon: 2103–38. doi:10.1016/S0022-5096(98)00032-5.

NISHIKAWA, Fumitaka, Shigeka YOSHIMOTO, and Kei SOMAYA. 2012. "Ultrahigh-Speed Micro-Milling End Mill with Shank Directly Supported by Aerostatic Bearings." *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* 6 (6). The Japan Society of Mechanical Engineers: 979–88. doi:10.1299/jamdsm.6.979.

Noori-Khajavi, A., and R. Komanduri. 1995. "Frequency and Time Domain Analyses of Sensor Signals in Drilling—II. Investigation on Some Problems Associated with Sensor Integration." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 35 (6). Pergamon: 795–815. doi:10.1016/0890-6955(94)00061-N.

Ogawa, Keiji, Hirotaka Tanabe, and Heisaburo Nakagawa. 2014. "A Proposal of Process Strategy for Micro-Cutting Edge Fabrication: Effects of Shape Formation after Laser Hardening." *Key Engineering Materials* 625 (August): 545–49. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.625.545.

Oluwajobi, Akinjide, and Xun Chen. 2011. "The Effect of Interatomic Potentials on the Molecular Dynamics Simulation of Nanometric Machining." *International*

- Journal of Automation and Computing* 8 (3). Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences: 326–32. doi:10.1007/s11633-011-0588-y.
- Özel, T., T. Thepsonthi, D. Ulutan, and B. Kaftanoğlu. 2011. “Experiments and Finite Element Simulations on Micro-Milling of Ti–6Al–4V Alloy with Uncoated and CBN Coated Micro-Tools.” *CIRP Annals* 60 (1). Elsevier: 85–88. doi:10.1016/J.CIRP.2011.03.087.
- Ozturk, Sabri, and Erhan Altan. 2012. “Slip-Line Metal Cutting Model with Negative Rake Angle.” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 34 (3): 246–52. doi:10.1590/S1678-58782012000300004.
- Park, Heung-Kil, Hiromichi Onikura, Osamu Ohnishi, and Ahmad Sharifuddin. 2010. “Development of Micro-Diamond Tools through Electroless Composite Plating and Investigation into Micro-Machining Characteristics.” *Precision Engineering* 34: 376–86. doi:10.1016/j.precisioneng.2009.09.001.
- Pei, Q X, C Lu, H P Lee, and Y W Zhang. 2009. “Study of Materials Deformation in Nanometric Cutting by Large-Scale Molecular Dynamics Simulations.” *Nanoscale Research Letters* 4 (5). Springer: 444–51. doi:10.1007/s11671-009-9268-z.
- Piljek, Petar, Zdenka Keran, and Miljenko Math. 2014. “Micromachining.” *Interdisciplinary Description of Complex Systems* 12 (1): 1–27. doi:10.7906/indexs.12.1.1.
- Raczy, A, W J Altenhof, and A T Alpas. 2004. “An Eulerian Finite Element Model of the Metal Cutting Process.” *8 Th Internal LS-DYNA Users Conference*.
- Rahman, M, A Senthil Kumar, and J.R.S Prakash. 2001. “Micro Milling of Pure Copper.” *Journal of Materials Processing Technology* 116 (1). Elsevier: 39–43. doi:10.1016/S0924-0136(01)00848-2.
- Rao, C J, D Nageswara Rao, and P Srihari. 2013. “ScienceDirect International

- Conference On DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM 2013 Influence of Cutting Parameters on Cutting Force and Surface Finish in Turning Operation." *Procedia Engineering* 64: 1405–15. doi:10.1016/j.proeng.2013.09.222.
- Reichenbach, Ingo Gustav, Felix Fallenstein, and Jan C. Aurich. 2014. "CAE Analysis of Single-Edge Micro End Mills - Methodology and Results," April. 9th International Conference on MicroManufacturing (ICOMM 2014). <https://minds.wisconsin.edu/handle/1793/68758>.
- Rooks, Brian. 2004. "The Shrinking Sizes in Micro Manufacturing." *Assembly Automation* 24 (4): 352–56. doi:10.1108/01445150410562534.
- Rudd, Robert E. 2001. "Concurrent Multiscale Modeling of Embedded Nanomechanics." *MRS Proceedings* 677 (January): AA1.6. doi:10.1557/PROC-677-AA1.6.
- Sabberwaal, A.J.P. 1960. "Chip Section and Cutting Force during the Milling Operation." *Annals of CIRP* 10 (3): 197–203.
- Saglam, Haci. 2011. "Tool Wear Monitoring in Bandsawing Using Neural Networks and Taguchi's Design of Experiments." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55 (9–12). Springer-Verlag: 969–82. doi:10.1007/s00170-010-3133-1.
- Saglam, Haci, Faruk Unsacar, and Suleyman Yaldiz. 2006. "Investigation of the Effect of Rake Angle and Approaching Angle on Main Cutting Force and Tool Tip Temperature." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2): 132–41. doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.05.002.
- Shimada, S., N. Ikawa, H. Tanaka, G. Ohmori, J. Uchikoshi, and H. Yoshinaga. 1993. "Feasibility Study on Ultimate Accuracy in Microcutting Using Molecular Dynamics Simulation." *CIRP Annals* 42 (1). Elsevier: 91–94. doi:10.1016/S0007-8506(07)62399-3.

Sisson, T. R., and R. L. Kegg. 1969. "An Explanation of Low-Speed Chatter Effects." *Journal of Engineering for Industry* 91 (4). American Society of Mechanical Engineers: 951. doi:10.1115/1.3591778.

Sun, Xizhi, and Kai Cheng. 2010. "Multi-Scale Simulation of the Nano-Metric Cutting Process." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47 (9–12). Springer-Verlag: 891–901. doi:10.1007/s00170-009-2125-5.

Sutherland, J. W., and R. E. DeVor. 1986. "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems." *Journal of Engineering for Industry* 108 (4): 269. doi:10.1115/1.3187077.

Takeuchi, Y., Y. Sakaida, K. Sawada, and T. Sata. 2000. "Development of a 5-Axis Control Ultraprecision Milling Machine for Micromachining Based on Non-Friction Servomechanisms." *CIRP Annals* 49 (1). Elsevier: 295–98. doi:10.1016/S0007-8506(07)62949-7.

Tansel, I., O. Rodriguez, M. Trujillo, E. Paz, and W. Li. 1998. "Micro-End-Milling—I. Wear and Breakage." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (12). Pergamon: 1419–36. doi:10.1016/S0890-6955(98)00015-7.

Tansel, I.N., T.T. Arkan, W.Y. Bao, N. Mahendrakar, B. Shisler, D. Smith, and M. McCool. 2000. "Tool Wear Estimation in Micro-Machining." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (4): 609–20. doi:10.1016/S0890-6955(99)00074-7.

Tobias, S.A.;Fishwick, W. 1959. "The Chatter of Lathe Tools under Orthogonal Cutting Conditions." *ASME, Transactions* 80 (5). Elsevier: 1079–1088. doi:10.1016/0043-1648(59)90080-8.

Uhlmann, E, D Oberschmidt, A Löwenstein, Y Kuche, and Matthias Putz. 2016. "Influence of Cutting Edge Preparation on the Performance of Micro Milling Tools." doi:10.1016/j.procir.2016.03.204.

- Uriarte, L, S Azcárate, A Herrero, L N Lopez de Lacalle, and A Lamikiz. 2008. "Mechanistic Modelling of the Micro End Milling Operation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 222 (1): 23–33. doi:10.1243/09544054JEM837.
- Vasile, Michael J., Craig R. Friedrich, Bharath Kikkeri, and Rob McElhannon. 1996. "Micrometer-Scale Machining: Tool Fabrication and Initial Results." *Precision Engineering* 19 (2–3). Elsevier: 180–86. doi:10.1016/S0141-6359(96)00024-4.
- Vogler, Michael P., Shiv G. Kapoor, and Richard E. DeVor. 2004. "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 126 (4): 695. doi:10.1115/1.1813471.
- Waldorf, Daniel J. 2006. "A Simplified Model for Ploughing Forces in Turning." *Journal of Manufacturing Processes* 8 (2). Elsevier: 76–82. doi:10.1016/S1526-6125(07)00005-9.
- Wang, Xinxin, Xiaohong Lu, Zhenyuan Jia, Wentao Wang, and Fengchen Wang. 2015. "Control System for Micro Milling Machine." *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 21 (1): 83. doi:10.1504/IJISE.2015.070876.
- Wirtz, A. 1991. "Vectorial Tolerancing for Production Quality Control and Functional Analysis in Design." In *Proceedings of the International Working Seminar on Computer-Aided Tolerancing*, 77–84. University Park, Pennsylvania: Pennsylvania State University.
- Woon, K.S., M. Rahman, F.Z. Fang, K.S. Neo, and K. Liu. 2008. "Investigations of Tool Edge Radius Effect in Micromachining: A FEM Simulation Approach." *Journal of Materials Processing Technology* 195 (1–3). Elsevier: 204–11. doi:10.1016/J.JMATPROTEC.2007.04.137.

- Wu, D. W., and C. R. Liu. 1985. "An Analytical Model of Cutting Dynamics. Part 1: Model Building." *Journal of Engineering for Industry* 107 (2): 107. doi:10.1115/1.3185972.
- Wu, Xian, Liang Li, Ning He, Meng Zhao, and Zhongbo Zhan. 2015. "Investigation on the Influence of Material Microstructure on Cutting Force and Bur Formation in the Micro Cutting of Copper." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (1–4). Springer London: 321–27. doi:10.1007/s00170-015-6828-5.
- Yang, X. G., K. F. Eman, and S. M. Wu. 1985. "Analysis of Three-Dimensional Cutting Process Dynamics." *Journal of Engineering for Industry* 107 (4). American Society of Mechanical Engineers: 336. doi:10.1115/1.3186006.
- Yoon, Hyung Suk, and Kornel F. Ehmann. 2016. "Dynamics and Stability of Micro-Cutting Operations." *International Journal of Mechanical Sciences* 115–116: 81–92. doi:10.1016/j.ijmecsci.2016.06.009.
- Yuan, Z.J., M. Zhou, and S. Dong. 1996. "Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining." *Journal of Materials Processing Technology* 62 (4). Elsevier: 327–30. doi:10.1016/S0924-0136(96)02429-6.
- Zhong, Li, Liang Li, Xian Wu, and Ning He. 2018. "Micro Cutting of Pure Tungsten Using Self-Developed Polycrystalline Diamond Slotting Tools." Accessed December 24. doi:10.1007/s00170-016-9292-y.
- Zhu, K., G. S. Hong, Y. S. Wong, and W. Wang. 2008. "Cutting Force Denoising in Micro-Milling Tool Condition Monitoring." *International Journal of Production Research* 46 (16): 4391–4408. doi:10.1080/00207540500469610.