



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**ANÁLISIS DE LAS FUERZAS DE CORTE EN EL PROCESO DE CILINDRADO EN
ACEROS DE MEDIA ALEACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico e Ingeniera Mecánica

**AUTORES: CHRISTIAN ANDRÉS DOMÍNGUEZ MERO
JOSSELYN MISHHELL CAIZA TOAPANTA**

TUTOR: EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA

Quito-Ecuador
2022

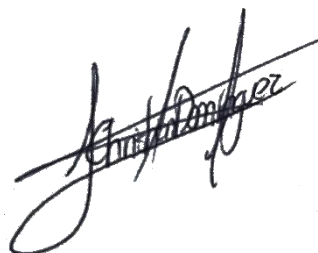
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Christian Andrés Domínguez Mero con documento de identificación N° 1719598128 y Josselyn Mishell Caiza Toapanta con documento de identificación N° 1726609199 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de marzo del 2022

Atentamente,



Christian Andrés Domínguez Mero
1719598128



Josselyn Mishell Caiza Toapanta
1726609199

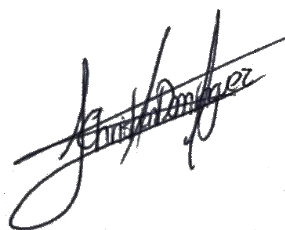
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Christian Andrés Domínguez Mero con documento de identificación N° 1719598128 y Josselyn Mishell Caiza Toapanta con documento de identificación N° 1726609199, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores de la Propuesta Tecnológica: “Análisis de las fuerzas de corte en el proceso de cilindrado en aceros de media aleación mediante elementos finitos”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico e Ingeniera Mecánica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de marzo del 2022

Atentamente,



Christian Andrés Domínguez Mero
1719598128



Josselyn Mishell Caiza Toapanta
1726609199

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Eduardo Xavier Vaca Michilena con documento de identificación N° 1721078424, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **ANÁLISIS DE LAS FUERZAS DE CORTE EN EL PROCESO DE CILINDRADO EN ACEROS DE MEDIA ALEACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS**, realizado por Christian Andrés Domínguez Mero con documento de identificación N° 1719598128 y Josselyn Mishell Caiza Toapanta con documento de identificación N° 1726609199, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de marzo del 2022

Atentamente,



Ing. Eduardo Xavier Vaca Michilena, Msc
1721078424

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

La presente propuesta tecnológica va dedicada a mi madre Idilia Bernardita Domínguez Mero quien es el pilar de mi vida por todas sus muestras de amor, entrega y sacrificio que ha hecho por mí, con mucho fervor y paciencia a sabido guiarme con paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas, a Dios, que es mi guía y nunca me ha abandonado en el caminar de mi vida. Agradezco a todas las personas que con sus palabras y apoyo han sabido aportar para mi crecimiento personal, amigos, compañeros y familiares, agradezco a Sor Isabel Ledesma que con su ayuda, ejemplo y guía supo acompañarme para poder continuar con mis estudios superiores, a todos los ingenieros que con su conocimiento y apoyo motivaron a poder ser un buen profesional, al Ing. Xavier Vaca que con su experiencia y motivación me oriento en la investigación.

Christian Andrés Domínguez Mero

El presente trabajo quiero dedicar y agradecer en primer lugar a Dios y a la Virgen María por ser mi fuerza y fortaleza en todo momento para lograr cumplir todas mis metas; a mis padres Patricio y Carmen por darme la oportunidad de estudiar, por ser mi motor para seguir adelante, por todo su apoyo, sus consejos, su amor y sobre todo por los valores y principios que me han inculcado para ser una buena persona; a mis hermanos Christian y Camila por ser mi mayor motivo e inspiración para seguir adelante; a Adrian por ser mi apoyo en muchos momentos de mi vida y por siempre recordarme que puedo y soy capaz de llegar muy lejos; a mis abuelitos, tíos y primos por todo su apoyo y por estar presentes en cada uno de mis logros, también quiero agradecer a todos mis amigos que formaron parte de esta etapa de mi vida y la llenaron de buenos e inolvidables momentos. Finalmente quiero agradecer a Christian por compartirme sus conocimientos para lograr culminar este trabajo y de igual manera a nuestro tutor el Ingeniero Xavier Vaca por su acompañamiento y paciencia durante la elaboración de este trabajo.

Josselyn Mishell Caiza Toapanta

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	i
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	ii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Torneado.....	5
1.1.1. Operaciones de torneado	5
1.1.2. Mecanizado axial o cilindrado	5
1.2. Parámetros influyentes en el proceso de cilindrado (torneado).....	6
1.2.1. Corte ortogonal.....	6
1.2.2. Corte oblicuo	6
1.3. Parámetros de Mecanizado	7
1.3.1. Velocidad de corte (V_c)	7
1.3.2. Velocidad de Rotación de la pieza (n)	7
1.3.3. Velocidad de Avance (f)	8
1.3.4. Profundidad de Corte (a_p).....	8
1.3.5. Fuerzas en el proceso de cilindrado	8
1.4. Proceso de arranque de viruta.....	11
1.5. Aceros de media aleación	12
1.5.1. Propiedades del acero 4340.....	13
1.5.2. Aplicaciones del acero 4340	13
1.6. Software de simulación	14
1.7. Metodología de elementos finitos.....	14
1.8. Modelado en el software a través de la ley de Johnson Cook	14
1.9. Herramientas de corte	15

1.9.1.	Materiales de las herramientas.....	15
1.9.2.	Insertos de metal duro	16
1.9.3.	Tipos insertos de metal duro	16
1.9.4.	Desgaste en herramientas de torneado	17
1.10.	Fluidos de corte.....	18
1.10.1	Taladrinas de aceites solubles (emulsiones)	18
1.11.	Relación de consumo de energía con la máquina herramienta	18
1.12.	Energía consumida en el mecanizado con relación a la simulación	18
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....		20
2.1.	Flujograma del análisis	20
2.2.	Parámetros geométricos de la herramienta	21
2.3.	Parámetros de corte	23
2.4.	Selección de lubricante de mecanizado	23
2.5.	Arreglo ortogonal	24
2.6.	Modelado del proceso de cilindrado.....	25
2.7.	Cálculos parámetros de corte.....	25
2.7.1.	Velocidad de rotación de la pieza (n)	25
2.7.2.	Rugosidad superficial máxima (Ra max).....	26
2.7.3.	Velocidad de Avance (f)	27
2.7.4.	Sección de Viruta	27
2.7.5.	Fuerza principal de corte.....	28
2.8.	Proceso de programación en la simulación	29
2.9.	Resultados obtenidos mediante simulación.....	33
2.10.	Resultados obtenidos mediante experimentación	34
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....		35
3.1.	Parámetros generados en la simulación.....	35
3.2.	Relación de consumo de energía con el mecanizado	39
3.3.	Emisiones de carbono (C _{ee}) con relación al consumo de energía	41
CONCLUSIONES.....		43
RECOMENDACIONES.....		44
LISTA DE REFERENCIAS.....		45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Proceso de cilindrado</i>	5
Figura 2. <i>Bosquejos de corte ortogonal</i>	6
Figura 3. <i>Esquemas de corte oblicuo</i>	7
Figura 4. <i>Fuerzas de corte presentes en el proceso de cilindrado</i>	9
Figura 5. <i>Zonas en el proceso de arranque de viruta</i>	12
Figura 6. <i>Zonas de desgaste presentadas en la herramienta</i>	17
Figura 7. <i>Flujograma del proceso</i>	20
Figura 8. <i>Geometría de la herramienta</i>	21
Figura 9. <i>Geometría de la herramienta</i>	22
Figura 10. <i>Desbaste de la herramienta</i>	22
Figura 11. <i>Inserto de la herramienta</i>	22
Figura 12. <i>Vista general de la herramienta</i>	23
Figura 13. <i>Esquema de la pieza a maquinar</i>	25
Figura 14. <i>(a) Tabla de valores de Ra (b) Aplicaciones de Ra</i>	27
Figura 15. <i>Configuración del proceso de simulación</i>	30
Figura 16. <i>Condiciones del proceso de simulación.</i>	30
Figura 17. <i>Configuración de la herramienta</i>	31
Figura 18. <i>Geometría de la pieza de trabajo</i>	31
Figura 19. <i>Configuración de malla (a) Herramienta de corte (b) Pieza de trabajo</i>	32
Figura 20. <i>Calidad de malla</i>	33
Figura 21. <i>Fuerza de corte F_z (a) V_c 180 m/min con a_p 0.5 mm (b) V_c 140 m/min con a_p 1 mm (c) V_c 140 m/min con a_p 1.5 mm</i>	35
Figura 22. <i>F_z (N) vs a_p (mm)</i>	36
Figura 23. <i>F_z (N) vs V_c (m/min)</i>	36
Figura 24. <i>F_z (N) vs V_c (m/min) vs R_a (μm)</i>	37
Figura 25. <i>F_z (N) vs V_c (m/min) vs R_a (μm)</i>	38
Figura 26. <i>F_z (N) vs V_c (m/min) vs R_a (μm)</i>	38
Figura 27. <i>Consumo de energía (a) V_c 140 m/min con a_p 0.5 mm (b) V_c 180 m/min con a_p 1 mm (c) V_c 220 m/min con a_p 1.5 mm</i>	40
Figura 28. <i>Consumo de energía en el proceso de cilindrado</i>	41

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Fuerza específica de corte en razón al Acero 4340</i>	10
Tabla 2. <i>Composición Química Acero 4340</i>	13
Tabla 3. <i>Propiedades Mecánica Acero 4340</i>	13
Tabla 4. <i>Propiedades de la herramienta de corte</i>	21
Tabla 5. <i>Velocidades de corte a analizar</i>	23
Tabla 6. <i>Profundidades de corte a analizar</i>	23
Tabla 7. <i>Propiedades fisicoquímicas del lubricante LACTUCA LT 3000</i>	24
Tabla 8. <i>Arreglo ortogonal L9</i>	24
Tabla 9. <i>Secciones de las virutas en relación con la Vc de 140, 180, 220 m/min</i>	28
Tabla 10. <i>Parámetros de entrada del mecanizado en la simulación</i>	29
Tabla 11. <i>Parámetros de corte obtenidos mediante simulación</i>	33
Tabla 12. <i>Parámetros de corte obtenidos mediante experimentación</i>	34
Tabla 13. <i>Datos de consumo de energía obtenidos mediante simulación</i>	40
Tabla 14. <i>Datos de emisiones de carbono con relación al consumo de energía</i>	42

RESUMEN

La optimización de los procesos de mecanizado sostenible tiene una importancia muy radical en los procesos de manufactura, mecanismo por el cual se puede realizar piezas, elementos de máquinas, matricerías, pernos, entre muchas más, al momento de trabajar en el proceso de torneado, se debe presentar soluciones óptimas en los diferentes parámetros de corte (P_c), analizar correctamente la velocidad de corte (V_c), velocidad de rotación de la pieza (n), velocidad de avance (F), profundidad de corte (a_p), rugosidad (R_a) y fuerzas en el proceso de cilindrado como: fuerza de corte (F_z), fuerza de empuje (F_y) y fuerza radial (F_x), con relación a los aceros de media aleación se trabajara en este caso con un acero AISI 4340 con un diámetro (D_c) de 40 mm de la pieza de trabajo (PT), mediante el análisis de elementos finitos y un ordenador se puede simular correctamente los procesos de cilindrado, roscado, entre otros, dando resultados favorables, este proceso es muy útil, menos costoso y sirve de validación para estudios de mucha importancia en la actualidad, el modelo 3D FEM permite obtener resultados experimentales con respecto a temperatura, F_z , F_y , ángulo de corte, los cuales después serán comprobados mediante ensayos en el material trabajado, por último se presenta resultados de mecanizado sostenibles obteniendo parámetros de trabajo adecuados en la herramienta de corte (H_c), geometría de la herramienta (GH), material, refrigeración, ahorro de energía y acabados favorables, por lo tanto los resultados de la simulación en el proceso de torneado mediante el software proporcionan una mejor comprensión de la situación de sostenibilidad a través del análisis del impacto ambiental.

Palabras clave: cilindrado, elementos finitos, parámetros de corte, fuerza de corte, acero 4340

ABSTRACT

The optimization of sustainable machining processes has a very radical importance in manufacturing processes, a mechanism by which parts, machine elements, tooling, bolts, among many others, can be made when working in the turning process, optimal solutions must be presented in the different cutting parameters (P_c), correctly analyze the cutting speed (V_c), rotation speed of the piece (n), feed rate (F), depth of cut (a_p), roughness (R_a) and forces in the turning process such as: cutting force (F_z), thrust force (F_y) and radial force (F_x), in relation to medium steels, in this case, AISI 4340 steel with a diameter (D_c) of 40 mm of the workpiece (PT), through the analysis of finite elements and a computer, it is possible to correctly simulate the processes of turning, threading, among others, giving favorable results, this process is very useful, less costs and serves and validation For studies of great importance today, the 3D FEM model allows experimental results to be obtained with respect to temperature, F_z , F_y , cutting angle, which will later be verified by tests on the worked material, finally machining results are presented sustainable by obtaining adequate work parameters in the cutting tool (H_c), tool geometry (GH), material, cooling, energy savings and favorable finishes, therefore the results of the simulation in the turning process using the software solid a better understanding of the sustainability situation through environmental impact analysis.

Keywords: contour turning, finite elements, cutting parameters, cutting force, 4340 steel

INTRODUCCIÓN

Un proceso de mecanizado es importante en la aplicación de diferentes estudios, trabajos en la industria, fabricación de piezas y muchas otras más, Salem et al [1] plantea que hoy en día, la implementación de técnicas sostenibles es un requisito imprescindible en los procesos de mecanizado; sin embargo, es necesario establecer una plataforma detallada y confiable para procesos de mecanizado sostenibles, cabe recalcar que la sostenibilidad es un tema fundamental dentro de la investigación, debido a que afecta a muchas industrias manufactureras diferentes [2], por lo cual se plantea una adopción de parámetros y prácticas de simulación tecnológica que ayuden en el proceso de estudio de los diferentes tipos de mecanizado, actualmente se plantean diferentes métodos de estudio de software de análisis que permitan obtener diferentes parámetros de mecanizado y técnicas que ayuden a lograr un mecanizado sostenible, Kadir menciona que un análisis por el método experimental o práctico es costoso y requiere mucho tiempo [3].

Gamage et al [4] menciona que los procesos de mecanizado no se basan en el tema de la sostenibilidad, dando a conocer que el 70% de las publicaciones que se registraron después del año 2006, muestra una clara evidencia de una brecha de investigación descubierta en el campo con un interés poco creciente.

Existen muchos métodos de resolución de procesos de mecanizado, se plantea desarrollar un modelo 3D a través de un software de aplicación, Mohammad et al [5] aduce que desarrollar un modelo 3D preciso de elemento finito permite predecir parámetros de corte en función del material propuesto a trabajar y herramientas de mecanizado, se plantea el análisis a través de elementos finitos, Liu et al [6] desarrollo y validó simulaciones tridimensionales (3D) para torneado, fresado u otra operación que contenga procesos de desbaste y acabado para el mecanizado muestran un rendimiento mejorado en los campos de fricción herramienta-viruta, formación de viruta, fuerza de corte, temperatura, tensión de la herramienta e algunos parámetros más.

En la actualidad, el consumo de energía debe disminuir en función de obtener un proceso de mecanizado sostenible, Mehmet et al [7] menciona que el modelado de elementos finitos en relación al consumo de energía y fuerzas de corte es bastante compatible con los resultados experimentales, por lo tanto se puede obtener una alta precisión sin experimentos de

mecanizado excesivos de diferentes materiales a trabajar.

Cabe recalcar que algunos parámetros de corte son de mucha importancia en el análisis del proceso de mecanizado, Weng et al [8] manifiesta que las fuerzas de corte cumplen un importante papel en el momento de analizar y afectar el acabado superficial, la vida útil de las herramientas y el material que interviene en la operación de mecanizado, por lo tanto se propone un modelo y método geométrico de simulación que permita verificar la viabilidad del modelo analítico propuesto en el análisis de fuerzas de corte, temperatura y algunos parámetros más.

Otro de los parámetros importantes al momento de analizar es la rugosidad, Ganesa et al [9] menciona que el impacto que producen los parámetros de corte y el modelo a desarrollar en el software sobre la rugosidad permitirá parámetros de corte y mecanizados óptimos. El análisis de la herramienta a trabajar es de mucha importancia, Dong et al [10] aduce que el grado de inclinación de la herramienta de corte es de mucha importancia para obtener un resultado favorable en cuanto a calidad y un estudio paramétrico de los resultados en relación a la herramienta y parámetros de corte, este tipo de inclinación puede ser de tipo perpendicular, paralelo, rectangular, ortogonal y oblicuo.

Ceretti et al [11] afirma que en los últimos años, la aplicación de la metodología de elementos finitos (FEM) a las operaciones de corte ha demostrado ser eficaz en el análisis del proceso de corte y formación de virutas, estos resultados de simulación pueden ser utilizados como una herramienta práctica tanto por investigadores, fabricantes de máquinas y herramientas tanto para diseñar nuevas herramientas y optimizar el proceso de corte.

El análisis por métodos de simulación numérica permite una optimización de recursos en el proceso de mecanizado, Sousa et al [12] establece que estos procesos son una alternativa más económica a otros sistemas convencional de medición de parámetros de corte, que consumen mucho tiempo y no arrojan resultados satisfactorios.

Actualmente, los procesos de mecanizados no tratan de economizar costos, mejorar la sustentabilidad de herramientas, refrigerantes, parámetros de corte, por lo tanto se plantea esta investigación para mejorar el proceso de mecanizado dentro de la industria, laboratorios y más, ahorrando grandes costos y disminuyendo la contaminación ambiental, se plantea que a través de la simulación de elementos finitos se logra buenos resultados, con un bajo costo de inversión

y muchos beneficiarios, debido a la crisis que se vive actualmente los procesos de mecanizado deben tener un consumo de energía reducido, para que las industrias, manufactureras y más puedan guiarse de análisis de simulación a través de software 3D, mejorando e innovando el proceso en la actualidad, para así llegar en un futuro a un mecanizado sostenible.

La UPS, en su afán de promover la investigación y aplicación de la Ingeniería Mecánica, propone el tema “SIMULACIÓN DE LAS FUERZAS DE CORTE EN PROCESOS DE CILINDRADO EN AISI 4340 MEDIANTE ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS”, que sirva para procesos de mecanizado para construcción de piezas, elementos de máquinas, investigaciones, pruebas de parámetros y materiales de corte, buscando un sistema de mecanizado sostenible, considerando la importancia que representa el estudio de la sostenibilidad en el mecanizado, importancia de las fuerzas de corte, parámetros de corte que mediante análisis y planteamiento mostrará los índices de sostenibilidad o mejora de recurso, búsqueda de un menor consumo de energía, mejores acabados en el mecanizado, disminución de costos de fabricación y menor impacto ambiental, la importancia de la sostenibilidad está tomando fuerza en la actualidad como medio necesario para ayudar a la conservación del planeta, teniendo en cuenta que la contaminación agresiva que el mundo está produciendo en la actualidad, uso innecesario de materiales, consumo excesivo de energía y más factores ayudan al incremento del calentamiento global debido al mal uso de recursos y parámetros de trabajo, por lo tanto se plantea el estudio para que favorezca a empresas de manufactura, investigaciones, laboratorios de manufactura y otros organismos que puedan beneficiarse de este estudio, colaborando en mejorar el impacto ambiental y la calidad de vida, además que reduce y mejora los procesos de mecanizado. Por lo tanto, se plantea los siguientes objetivos dentro de la investigación:

Objetivo general

Analizar las fuerzas de corte en los procesos de cilindrado en Aceros de media aleación mediante elementos finitos.

Objetivos específicos

- Identificar los principales parámetros de corte en los procesos de cilindrado en la manufactura de aceros de media aleación.
- Establecer los parámetros de corte para el análisis mediante elementos finitos a través

del software especializado 3d.

- Analizar los resultados del proceso de cilindrado desarrollados en la simulación.
- Validar resultados de la simulación a través de pruebas de ensayo en los laboratorios de la Universidad.
- Mostrar indicadores de sostenibilidad en el proceso de cilindrado con respecto a la simulación realizada obteniendo un mecanizado sostenible.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Torneado

Nalbant et al. [13] establece que el torneado es el primer procedimiento más común de corte y en especial para el mecanizado de piezas. En una operación de torneado, es fundamental elegir los parámetros de corte para poder obtener un rendimiento de corte alto. En diferentes datos experimentales, los parámetros de corte deseados se determinan por experiencia o por medio de la utilización de un manual. El torneado proporciona energía para girar PT, alimenta Hc a cierta velocidad de rotación, a una profundidad y velocidad de corte determinadas. Entonces, se deben establecer cinco parámetros de corte en el torneado, a saber, geometría de la herramienta (radio de la punta), V_c , F, a_p , y condiciones de mecanizado para optimizar los parámetros[14].

1.1.1. Operaciones de torneado

Riestra et al. [15] aduce que, conforme el desplazamiento de la herramienta, las operaciones en general del torneado se catalogan en el mecanizado axial (cilindrado), radial (refrentado) y perfilado. Entre las operaciones más usuales están el cilindrado y refrentado, para desbaste y para acabados se realiza con la operación de perfilado.

1.1.2. Mecanizado axial o cilindrado

Es una operación de torneado muy importante en la cual se obtiene geometrías cilíndricas de revolución. Se aplica tanto a exteriores como a interiores, la herramienta de corte de un solo punto elimina la viruta de PT cilíndrica giratoria, Hc se alimenta paralelamente al eje de rotación [14].

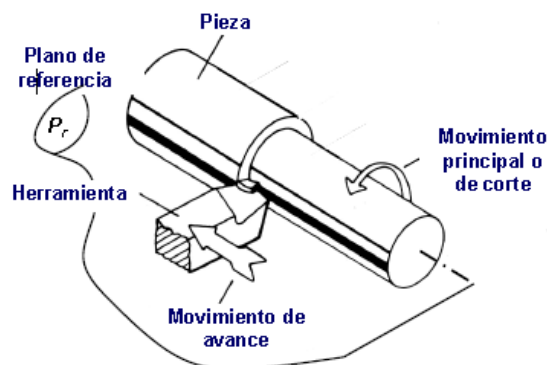


Figura 1. Proceso de cilindrado [16].

1.2. Parámetros influyentes en el proceso de cilindrado (torneado)

Se propone realizar el estudio en el proceso de cilindrado planteando algunos tipos de corte normalmente analizados dentro de la industria del mecanizado los cuales son:

1.2.1. Corte ortogonal

El corte ortogonal es utilizado en simulaciones 2D, el mecanizado se realiza por medio del filo de la herramienta, saliendo material desprendido a lo largo de la cara de la herramienta por lo que va perpendicularmente al movimiento de la herramienta. En la figura 2 se puede verificar los bosquejos en 2D y 3D.

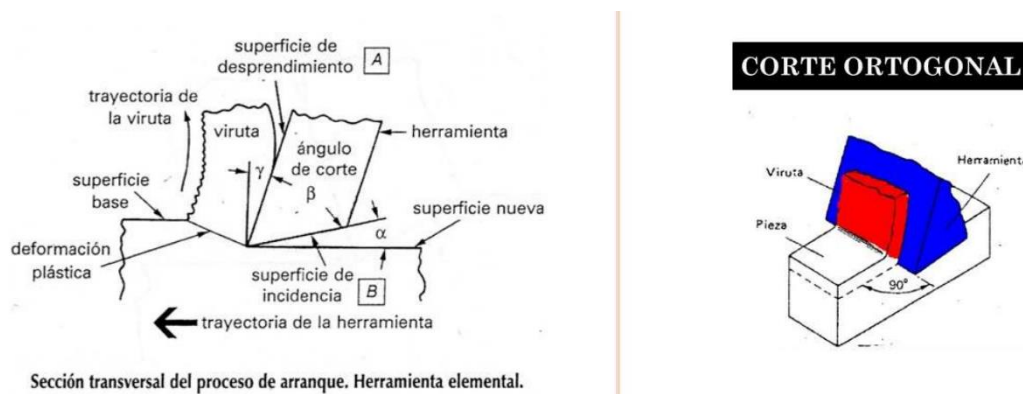


Figura 2. Bosquejos de corte ortogonal [16].

1.2.2. Corte oblicuo

Para este tipo de corte en el proceso de torneado, el filo tiene que formar un ángulo de inclinación con relación a su trayectoria. El material sobrante se traslada por encima de la cara de ataque de la herramienta. Una característica básica de la herramienta es el ángulo de desprendimiento, ya que, forma la normal a la recta y a la superficie de la pieza, forma parte de la cara de la herramienta, se visualiza por la figura 3.

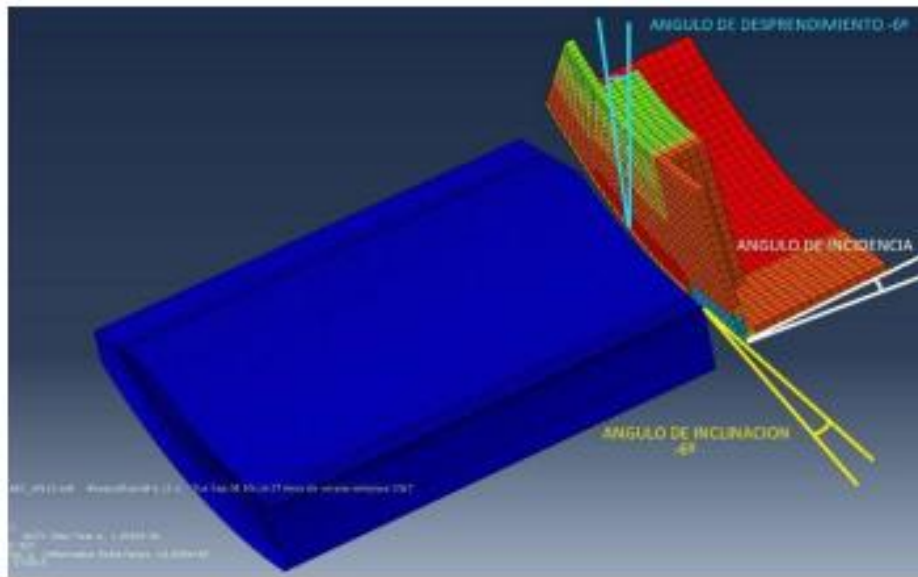


Figura 3. Esquemas de corte oblicuo [16].

1.3. Parámetros de Mecanizado

1.3.1. Velocidad de corte (Vc)

Viene dada entre la pieza de trabajo y el filo cortante de la herramienta y se expresa mediante la ecuación 1 [17].

$$V_c \left(\frac{m}{\text{min}} \right) = \frac{n(\text{min}^{-1}) \cdot \pi \cdot D_c(\text{mm})}{1000 \left(\frac{mm}{m} \right)} \quad (1)$$

Donde:

n: velocidad de rotación de la pieza.

Dc: diámetro de la pieza.

1.3.2. Velocidad de Rotación de la pieza (n)

Viene determinada por la velocidad a la que gira el cabezal del torno, usualmente se formula en RPM (revoluciones por minuto), se debe conocer que en los tornos convencionales esta variable es fija y cambia en razón a la caja de cambios, se establece que en tornos CNC el cabezal maneja un variador de frecuencia, el mismo que permite poseer la velocidad deseada hasta obtener la velocidad máxima de la máquina. Esta velocidad es directamente proporcional

a V_c e inversamente proporcional a D_c , se obtiene mediante la ecuación 2 [17].

$$n(\text{min}^{-1}) = \frac{V_c \left(\frac{m}{\text{min}} \right) \cdot 1000 \left(\frac{mm}{m} \right)}{\pi \cdot D_c (mm)} \quad (2)$$

Donde:

n: velocidad de rotación de la pieza.

V_c: velocidad de corte.

D_c: diámetro de la pieza.

1.3.3. Velocidad de Avance (f)

Es la V_c que avanza a lo largo del material, se presenta en Hc y PT, se expresa mediante la ecuación 3 [17].

$$f \left(\frac{mm}{\text{min}} \right) = n(\text{rpm}) * F \left(\frac{mm}{\text{rev}} \right) \quad (3)$$

Donde:

n: velocidad de rotación de la pieza.

F: avance con el que se va a trabajar.

1.3.4. Profundidad de Corte (ap)

Este parámetro varia en razón del material utilizado en la pieza de mecanizado y la potencia requerida por la máquina, se da entre los radios de la pieza a trabajar en cada pasada de la herramienta de corte; se presenta en mm [17].

1.3.5. Fuerzas en el proceso de cilindrado

Las fuerzas en el proceso de cilindrado generadas en el corte de metal poseen una predominación directa en la generación de calor, la calidad del área mecanizada, el desgaste de la herramienta, precisión en la PT, la figura 4 presenta fuerzas principales que intervienen en el cilindrado[18].

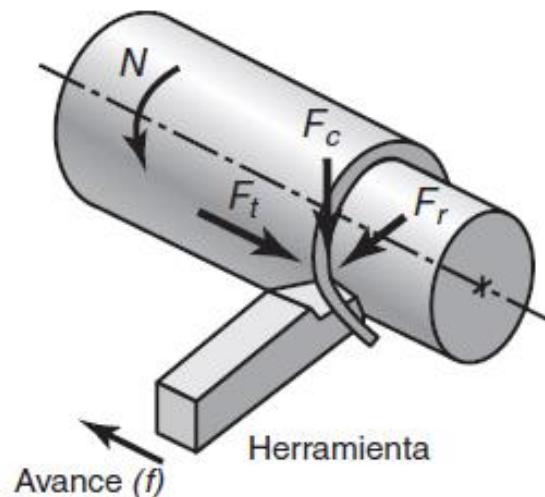


Figura 4. Fuerzas de corte presentes en el proceso de cilindrado[19].

1.3.5.1. Fuerza de corte (F_z)

Forma parte de las variables más importantes que deben controlarse durante los procesos de corte, ya que, es la fuerza necesaria para cortar secciones transversales de viruta y suministra la energía requerida para el proceso. La fuerza de corte va en trayectoria de V_c [18]. F_z se calcula a través de la siguiente expresión [19].

$$F_z(N) = kc(N / mm^2) \cdot S(mm^2) \quad (4)$$

Donde:

F_z : fuerza de corte.

kc : fuerza específica de corte.

S : sección de viruta.

1.3.5.2. Fuerza específica de corte (K_s)

Es el resultado entre anchura y profundidad de corte[19]. Esta fuerza se define como la energía absorbida durante el proceso de corte por la unidad de volumen del material de la pieza, los valores de esta fuerza se adquieren de tablas o gráficas según el tipo material a mecanizar [20]. En la Tabla 1 se observa el valor de K_s con relación al porcentaje de carbono que contiene el material de la pieza a mecanizar, entre otras variables como la dureza Brinell, resistencia al

desgaste, F y Vc, las cuales son recomendaciones de catálogo de Coromant.

Tabla 1. Fuerza específica de corte en razón al Acero 4340 [21].

ISO P		Acero % C	k_s	Dureza Brinell
P1.	N.º CMC		N/mm^2	HB
Aceros no aleados				
1.Z.AN	01.1	0.1-0.25	1500	125
2.Z.AN	01.2	0.25-0.55	1600	150
3.Z.AN	01.3	0.55-0.80	1700	170
P2. Acero baja aleación ($\leq 5\%$)				
1.Z.AN	02.1	No templado	1700	180
1.Z.AN	02.12	Para rodamientos de bola	1800	210
5.Z.HT	02.2	En Endurecido y en templado	1850	275
5.Z.HT	02.2	En Endurecido y en templado	2050	350
P3. Acero alta aleación ($>5\%$)				
0.Z.AN	03.11	Recocido	1950	200
0.Z.HT	03.21	De herramientas templadas	3000	325
Aceros fundidos				
P1.5.C.UT	06.1	No aleado	1550	180
P2.6.C.UT	06.2	De baja aleación ($\leq 5\%$)	1600	200
P3.0.C.UT	06.3	Alta aleación ($>5\%$)	2050	225

1.3.5.3. Fuerza de empuje (Fy)

Esta fuerza opera de manera longitudinal y siguiendo la trayectoria de la herramienta, mejor conocida como fuerza de avance, direccionando la herramienta a la derecha y separándola del plato [19].

1.3.5.4. Fuerza radial (Fx)

Opera de manera radial y separando la herramienta de la pieza a maquinar. Por los diversos factores que se dan en el proceso de corte, Fx y Fy son difíciles de calcular por lo que se pueden determinar de manera experimental [19].

1.3.6. Sección de viruta

La sección de viruta (S) se calcula mediante la siguiente ecuación [20].

$$S(mm^2) = F(mm) \cdot ap(mm) \quad (5)$$

Donde:

ap: profundidad de corte.

F: avance.

1.3.7. Rugosidad superficial (Ra)

En el proceso de cilindrado intervienen factores que no permiten un buen acabado en base a la rugosidad superficial los cuales son Hc, Pc y PT. Existen factores que van en relación con Hc los cuales son radio de la punta, material, ángulo de ataque, vibración y GH, propiedades como dureza, propiedades físicas y mecánicas, hay algunas condiciones a tomar en cuenta en el mecanizado como Vc, ap y F, está basada en la Norma ISO 4287. La ecuación 6 representa el cálculo para la Rugosidad superficial máxima [22].

$$Ra \max = \frac{F^2 \left(\frac{mm}{rev} \right)}{8 \cdot r (mm)} \cdot (1000) \quad (6)$$

Donde:

r: radio de la punta de la herramienta.

F: avance.

1.4. Proceso de arranque de viruta

Se presentan algunas zonas que se deben conocer mostradas en la figura 5, misma que indica una simulación a través de elementos finitos en un corte ortogonal, indicando la deformación equivalente unitaria ϵ , conociendo que puede ser hasta cuatro veces la longitud inicial, las zonas que se deben conocer son [23]:

- Zona de cizalladura primaria. Se presenta en el filo y con una dirección de ϕ grados en

la superficie a maquinarse, aquí se genera un cizallamiento rígido del material, la cual expulsa en forma de viruta, cabe recalcar que la deformación del material que se presenta en esta parte se transforma en una considerable energía de deformación, la cual se transforma en calor [23].

- Zona de cizalladura secundaria. Se genera un alto rozamiento entre la viruta y la herramienta, esta se presenta en la zona del material desprendido sobre la cara de desprendimiento de la herramienta, se debe a la presión y temperatura que alcanza, dado que el material se deforma en planos paralelos a la dirección de salida de la viruta [23].
- Zona de cizalladura terciaria. Se genera deformación superficial, posee dimensiones reducidas, semejante a una laminación, esto provoca un aplastamiento y genera que la rugosidad superficial reduzca en relación a la teórica [23].

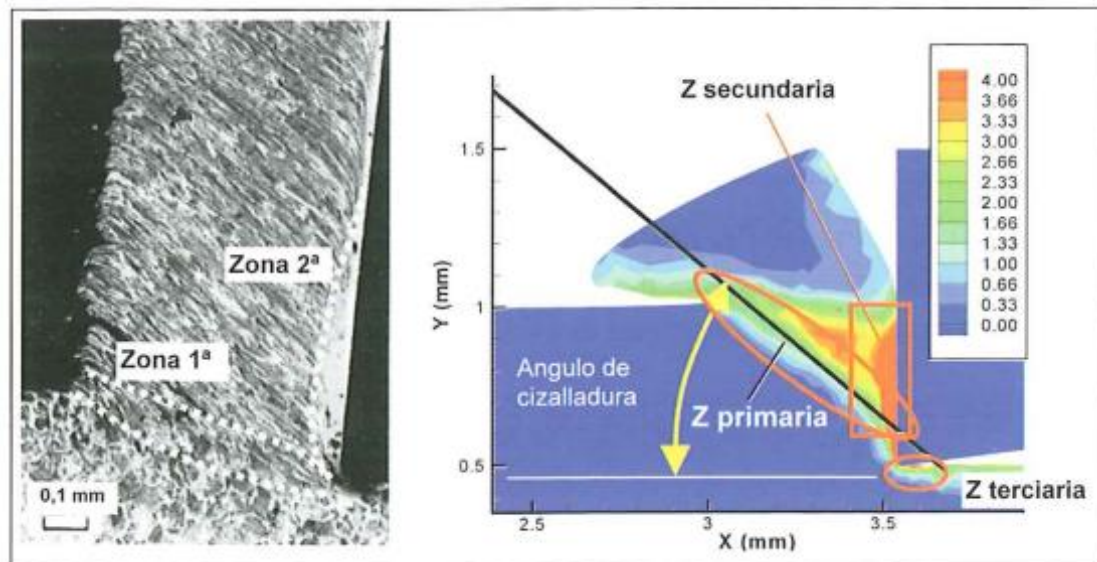


Figura 5. Zonas en el proceso de arranque de viruta [23].

1.5. Aceros de media aleación

Mishra y Dalai [24] investigan que, los aceros de media aleación otorgan una eficaz composición de resistencia y ductilidad, pertenecen al grupo de aceros avanzados de alta resistencia, tienen la posibilidad de ser mejorados por medio de procedimiento térmico de templado. Se los ocupa en la construcción de ejes, tornillos, cilindros de motores de explosión, elementos de maquinaria, partes resistentes y tenaces, pernos, transmisiones, entre otros[25].

1.5.1. Propiedades del acero 4340

El acero 4340 posee varias propiedades entre las cuales se encuentran la templabilidad, además de la tenacidad y una de las más importantes es resistencia a la fatiga. Se proporciona mediante bonificado que es un procedimiento térmico de temple y revenido. Su uso es en piezas que necesitan altos requerimientos tanto de dureza, como resistencia mecánica y tenacidad. La maquinabilidad del acero 4340 tiene baja soldabilidad y es regular [26]. Es insensible cuando existe sobrecalentamiento en el forjado, además de ser libre de propensión a la fragilidad del revenido[27].

Tabla 2. Composición Química Acero 4340 [27].

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
0,34	0,1 - 0,35	0,60 - 0,80	0,04 - 0,30	0,002 - 0,03

Tabla 3. Propiedades Mecánicas Acero 4340[27].

PROPIEDADES MECÁNICAS					
DIAMETRO (mm)	RESISTENCIA MECÁNICA (N/mm ²)	PUNTO DE FLUENCIA (N/mm ²)	ELONGACIÓN %Min	DUREZA ROCKWELL B	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
16 o menos	1200-1400	1000	9	240-380	
16-40	1100-1300	900	10	240-380	0.457
41-100	1000-1200	800	11	240-380	

1.5.2. Aplicaciones del acero 4340

Se aplica en la reparación y construcción de repuestos y piezas que permanecen expuestas a elevados esfuerzos dinámicos, por ejemplo: vástagos, cigüeñales, ejes de levas, barras de torsión, árboles de transmisión, ejes, tornillos, cilindros de motores de explosión, elementos oleo hidráulicos, barras, poleas, elementos de barras de perforación, piñones, discos de freno, tuercas y pernos. Generalmente, es recomendado en aplicaciones con altas exigencias mecánicas [26].

1.6. Software de simulación

Avila y Vásquez [28] estipulan que, los softwares de simulación son utilizados en la modelación de sistemas dinámicos complicados, los cuales son difíciles de realizar por medio de otros métodos estocásticos, debido a su versatilidad y la probabilidad de probar con varios casos sin representar un elevado precio; incluyendo un entorno amigable de interpretación de resultados sin tener algún conocimiento previo.

Los softwares de simulación tanto nuevos como ya existentes, tienen la posibilidad de valorarse, proyectarse, y observarse sin correr el peligro agrupado a prácticas realizadas en un sistema real. Posibilitando a empresas estudiar métodos a partir de visiones sistemáticas dando una mayor comprensión del impacto entre ellos, permitiendo una mejor predicción de ciertos casos [29].

1.7. Metodología de elementos finitos

Es el enfoque más útil, menos costoso y preciso para la determinación de variables de mecanizado debido a los avances en el poder computacional y de procesamiento de las computadoras con respecto al proceso de torneado a alta velocidad. Con el fin de simplificar el trabajo de investigación, se estudia el modelado de elementos finitos de torneado usando un software 3D.

Los parámetros, condiciones y GH se definirán según el proceso que se realice. En el torneado, la deformación plástica se genera en la punta de la herramienta, lo que hace que el gradiente de tensión, el gradiente de deformación y el gradiente de temperatura de la hoja sean más grandes, por lo que la malla de estas zonas debe ser más fina. Debido a que la deformación es pequeña en la otra parte, se pueden usar cuadrículas grandes para reducir el número de elementos. Elementos de cuatro nodos en la pieza de trabajo y se han utilizado modelos de herramientas para las deformaciones que se producen [30].

1.8. Modelado en el software a través de la ley de Johnson Cook

La ecuación 7 es establecida por muchos software de simulación en 3D con relación a los parámetros de corte a analizar es la ecuación de Johnson Cook, la misma esta en relación con el comportamiento de la pieza en concordancia con las deformación, temperatura y velocidad

de deformación, toma varios aspectos entre los cuales se encuentran propiedades térmicas además de propiedades como: viscosidad, elasticidad y plasticidad por lo cual se le conoce como ecuación termoviscoplastica [31].

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B \cdot \varepsilon^{n1}) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \cdot \left(1 - \frac{T - T_o}{T_f - T_o} \right) \quad (7)$$

Donde:

$\dot{\varepsilon}$: velocidad (deformación plástica efectiva).

ε : deformación (plástica efectiva).

$\dot{\varepsilon}_0$: velocidad (deformación de referencia).

T_f : temperatura (fusión del material).

T_o : temperatura (ambiente).

A : límite elástico (T_o).

B : factor de endurecimiento (deformación).

C : coeficiente de sensibilidad (velocidad de deformación).

$n1$: coeficiente de sensibilidad (endurecimiento por la deformación).

m : coeficiente de sensibilidad (temperatura) [31].

1.9. Herramientas de corte

Usadas frecuentemente en máquinas herramientas, las cuales hacen el primordial trabajo en toda clase de mecanizado. El proceso que realizan se denomina arranque de viruta y posibilita lograr la más grande proporción de viruta de la pieza a mecanizar. Frederick Winslow Taylor, definió a las herramientas de corte como: monofilo que son herramientas de un solo filo, y se aplican básicamente en tornos, acepilladoras o alisadoras, y multifilo que tienen más de un filo y son usadas en máquinas fresadoras, centros de mecanizado, o perforadoras [32].

1.9.1. Materiales de las herramientas

Se debe elegir la calidad y material en la herramienta de manera adecuada ya que es fundamental al proyectar una operación de mecanizado provechosa. Es importante conocer el rendimiento de los materiales de las herramientas para poder seleccionar adecuadamente. Es fundamental considerar el material, forma y tipo de la pieza, para mejorar la calidad de la pieza

y condiciones de mecanizado que se aplican en cada operación. Estos materiales deben permitir un mayor rendimiento con un mínimo desgaste [33]. Entre los materiales más empleados están los aceros rápidos y superrápidos, carburos sinterizados (Metal duro), aceros al carbono, Nitruro de boro cúbico (CBN) y diamante [34].

Tienen varias calidades con propiedades específicas como es dureza, la resistencia al desgaste, tenacidad, el material de la herramienta apto en un cierto tipo de trabajo debe tener ciertas características: tenaz, duro, químicamente estable y resistente a cambios repentinos de temperatura [33].

1.9.2. Insertos de metal duro

Se define como material metalúrgico en polvo; su composición es a partir de aglutinante de cobalto metálico (Co) y partículas de carburo de tungsteno (WC). Contienen aproximadamente un 80% de fase de carburo de tungsteno [33]. Son herramientas de corte con características muy importantes como: la resistencia al desgaste, la tenacidad y la dureza, además utilizado en todos los procesos de mecanizado y toda clase de materiales. Tiene dureza ya que permite tener un filo el cual dura lo máximo posible. Tenaz, para que soporte los mecanizados más severos con golpes e imperfecciones, además que sirva para mecanizar cualquier tipo de material [32].

1.9.3. Tipos insertos de metal duro

Existen 3 diversos tipos en las operaciones de torneado, los cuales están bajo la Norma ISO que es codificada con colores y letras como P (azul), M (amarillo) y K (rojo). Por lo general la letra está unida a un número que va incrementado en razón a la tenacidad del metal duro y disminuyendo su resistencia al desgaste [35].

- El tipo P (azul) generalmente utilizado en acero, su mecanizado es muy efectivo pero cambia en razón al contenido en carbono, dureza del material entre otros [36].
- El tipo M (amarillo) es utilizado en grandes cantidades en aceros inoxidable, es decir materiales aleados que poseen alrededor de 12 % de cromo, además existen varias aleaciones las cuales insertan molibdeno y níquel. Se presentan varias condiciones como austenítico-ferrítico (dúplex), martensítico y ferrítico crean una variedad de materiales [36].
- El tipo K (rojo) es utilizado para fundiciones entre las cuales está la fundición maleable

(MCI) y fundición gris, mismas que ayudan a mecanizar de una manera amigable, la fundición compacta (CGI), nodular (NCI), y austemperizada (ADI) son menos amigables que las mencionadas anteriormente [36].

1.9.4. Desgaste en herramientas de torneado

Se origina por el proceso de mecanizado que realizan, dando lugar a dos diferentes localizaciones que son:

- Desgaste de la superficie de desprendimiento (K): se caracteriza por la formación de un cráter a causa de la acción de la viruta al deslizarse y fluir a lo largo de la superficie de desprendimiento. Esto se origina por mecanismos relacionados con la fricción de la viruta a lo largo de dicha superficie.
- Desgaste en el labio o de flanco (VB): está localizado en la superficie de incidencia y es ocasionado por fricción abrasiva entre la superficie generada de la pieza y la herramienta [23].

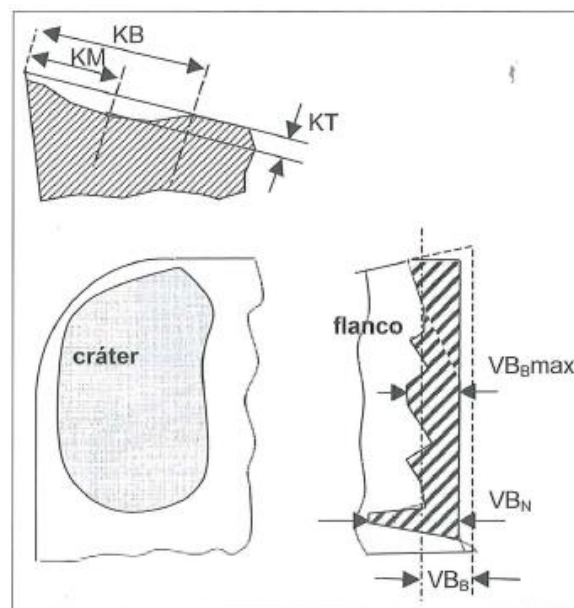


Figura 6. Zonas de desgaste presentadas en la herramienta[23].

En la figura 6 se indica la caracterización del desgaste de cráter según las normas ISO 3685, KT es la profundidad del cráter, KB el ancho total y KM la distancia del centro del cráter al filo original del a herramienta[23].

1.10. Fluidos de corte

Es de gran importancia en las operaciones de maquinado sus funciones principales son disminuir la fricción y desgaste y enfriar la zona de corte para optimizar resultados de calidad en el acabado superficial de la pieza y vida útil de la herramienta. Para tener resultados efectivos de los fluidos de corte se debe analizar factores del método de operación, material de la herramienta y de la PT, Vc y el método de aplicación. Los tipos que se utilizan para maquinar son: aceites, emulsiones, semisintéticos y sintéticos [19].

1.10.1 Taladrinas de aceites solubles (emulsiones)

La emulsión se da por una mezcla de agua, aceites minerales o vegetales en proporciones entre 3 y 10% con aditivos como agentes emulsionantes, este fluido de corte es el que más se aplica en procesos de maquinado y tiene un aspecto lechoso[20].

1.11. Relación de consumo de energía con la máquina herramienta

Sabiendo la importancia de la sostenibilidad en el mecanizado, en esta investigación se pretende analizar la dependencia que hay entre Fz y Pc como variables independientes, a través de una relación funcional entre las mismas. Se guía de las ecuaciones para Vc y el tiempo de duración (ecuaciones 2 y 4) [37].

$$T(\text{min}) = \frac{L(\text{mm})}{n(\text{rpm}) * F(\text{mm} / \text{rev})} \quad (8)$$

Donde:

n: número de revoluciones del husillo.

T: Tiempo (Prueba).

L: longitud (Barra).

F: avance.

1.12. Energía consumida en el mecanizado con relación a la simulación

El cálculo del SEC (Consumo de energía) para la máquina-herramienta, simboliza la tasa de energía que es consumida al remover cierto material de la pieza, el cálculo considera potencias de corte y tasas de remoción del material, dado en relación al software de simulación FEM y por la ecuación 9 [37].

$$SEC = \frac{E_c}{V} = \frac{\int P_i(t)dt}{\int MRR(t)dt} = 60 \cdot \frac{\int (P_c(t) + P_u(N) + P_{ad}(t))dt}{a_{sp} \cdot f \cdot V_c \cdot T} \quad (9)$$

Donde:

E_c : energía consumida (husillo).

V : volumen (material eliminado).

$P_i(t)$: potencia (entrada del husillo).

$MRR(t)$: tasa de remoción del material.

$P_c(t)$: potencia de corte (proceso de mecanizado).

$P_u(N)$: potencia inactiva.

$P_{ad}(t)$: pérdida de la carga adicional del husillo.

a_{sp} : profundidad de corte.

t : tiempo de maquinado.

Las expresiones $P_c(t)$, $P_u(N)$ y $P_{ad}(t)$ están determinadas por las ecuaciones 10, 11 y 12, con relación al software de simulación.

$$P_c(t) = F_c(t) \cdot \frac{V_c(t)}{60} = \sqrt{(F_x^2(t) + F_y^2(t) + F_z^2(t))} \cdot \frac{V_c(t)}{60} \quad (10)$$

$$P_u(N) = 1.573 \cdot n + 98 \quad (11)$$

$$P_{ad}(t) = 3 \cdot 10^{-6} \cdot P_c^2(t) + 0.1939 \cdot P_c(t) \quad (12)$$

Donde:

$F_x(t)$, $F_y(t)$ y $F_z(t)$: fuerzas con razón al tiempo hallados mediante simulación.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Flujograma del análisis

En la figura 7 se representa el proceso a desarrollar para el análisis de las fuerzas de corte mediante simulación con elementos finitos, el flujograma sigue una guía técnica la cual facilitará el desarrollo del proceso, además que indica todo lo primordial del análisis.

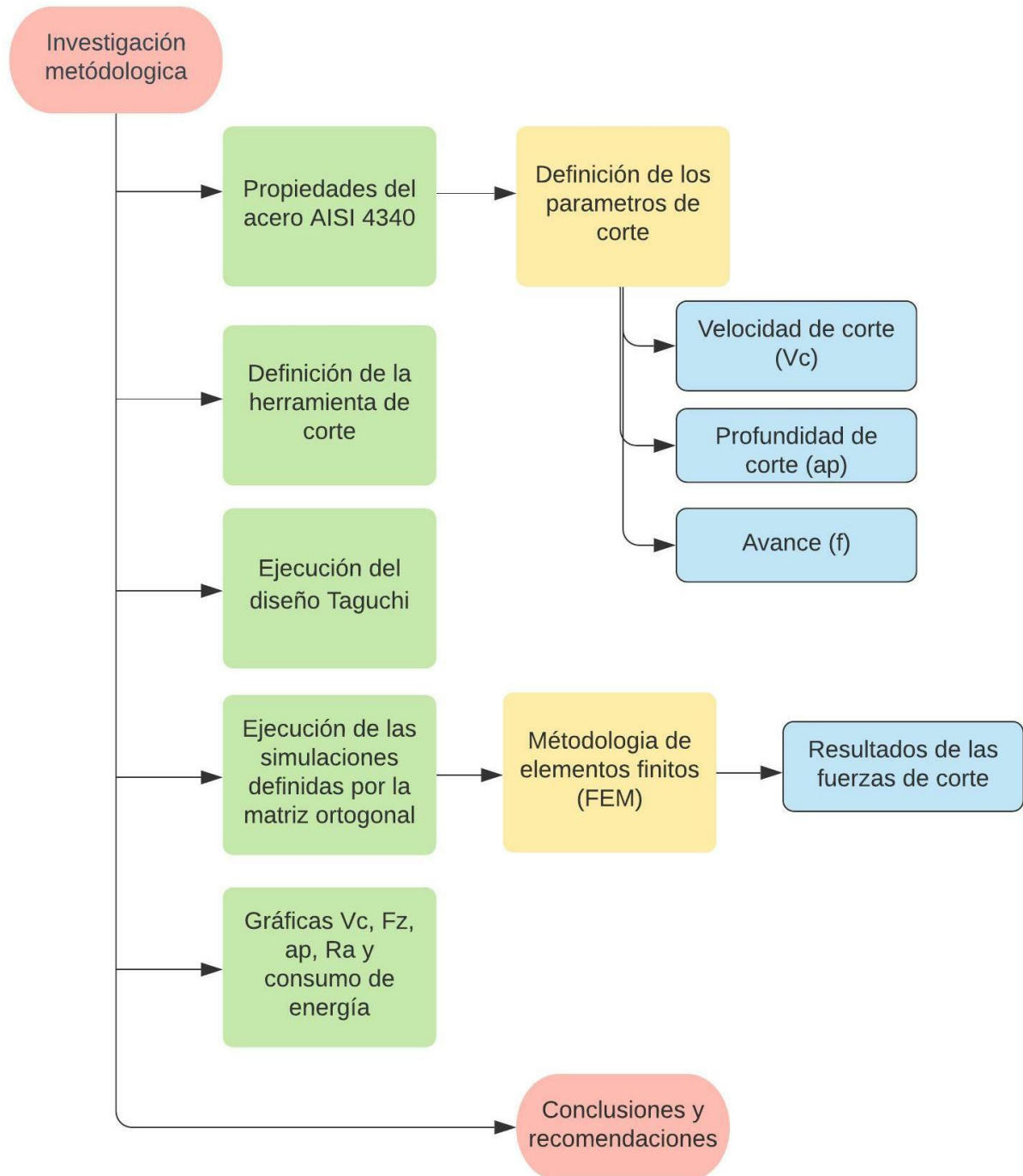


Figura 7. Flujograma del proceso.

2.2. Parámetros geométricos de la herramienta

Para el proceso de simulación y experimentación se define la herramienta de corte a utilizar, la misma que cuenta con un porta inserto, un tipo de recubrimiento CVD, este tipo de recubrimiento es usado por su alta resistencia al desgaste, por lo tanto, se detalla las características de la herramienta en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades de la herramienta de corte.

Propiedades	Descripción
Designación del portaherramientas	SDJCR2020K11
Descripción del inserto	DCMT11T308PM
Técnica de recubrimiento	CVD
Material de recubrimiento	TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN
Radio de la punta	0,8 mm

En la figura 8 se indica la Longitud efectiva del filo (LE) de 10.8279 mm, el Radio de Punta (RE) de 0.8 mm, el Diámetro del círculo inscrito (IC) de 9.525 mm, el Grosor de plaqueta (S) de 4 mm, parámetro del inserto para el proceso de simulación y experimentación [38].

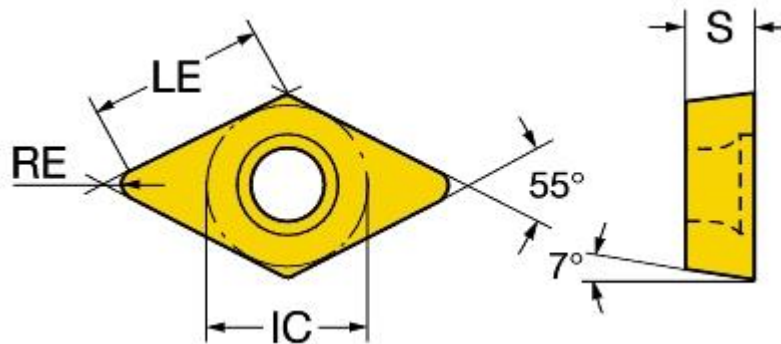


Figura 8. Geometría de la herramienta [38].

En la figura 9 se indica la Altura funcional (HF) de 20mm, la Altura de mango (H) de 20 mm, el Voladizo máximo (OHX) de 28 mm, el Angulo del filo de la herramienta (KAPR) de 93deg, la Anchura funcional (WF) DE 25 mm, la Longitud funcional (LF) de 125mm y la Anchura de mango (B) de 20mm para el proceso de simulación y experimentación [39].

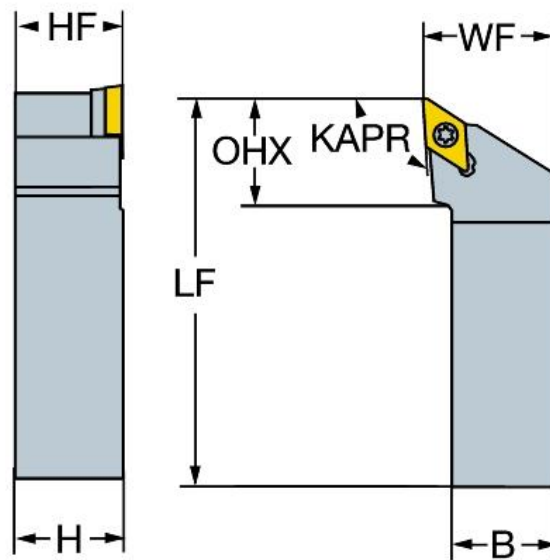


Figura 9. Geometría de la herramienta [39].

En la figura 10 se indica el Ángulo máximo de progresión en rampa el cual será de 27deg, proceso que realizará al momento de desbaste la herramienta con la pieza a maquinar [39].

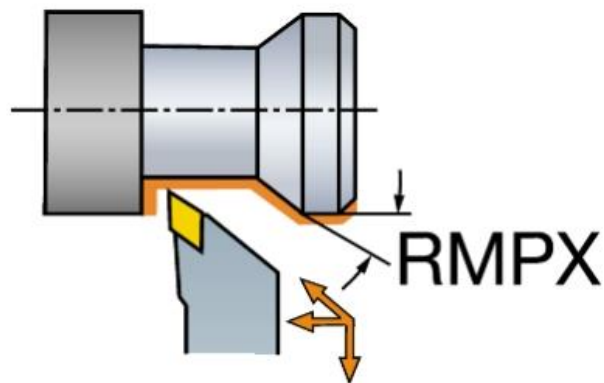


Figura 10. Desbaste de la herramienta [39].

En la figura 11 se indica la plaquita o inserto de la herramienta a utiliza con la norma ANSI la cual indica que el inserto viene calibrado.

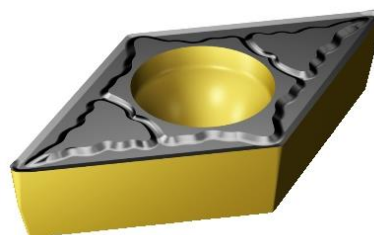


Figura 11. Inserto de la herramienta [38].

En la figura 12 se muestra un plano o vista general de la herramienta de corte a utilizar lo cual permite tener un esquema indicado de la herramienta a ocupar en el proceso de experimentación y simulación.

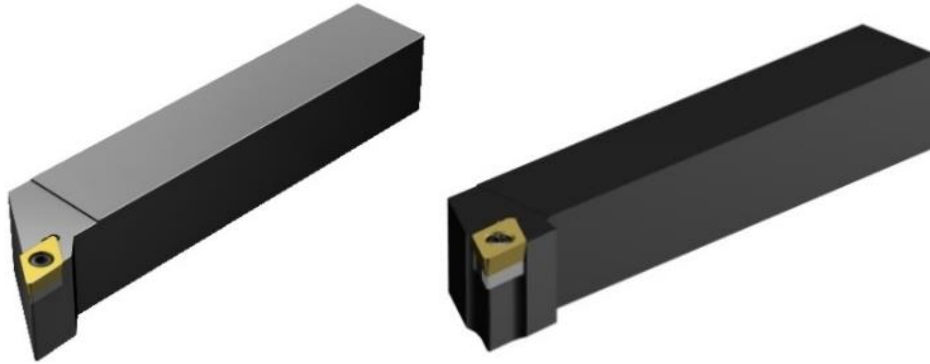


Figura 12. Vista general de la herramienta [39].

2.3. Parámetros de corte

En el estudio a realizar intervienen dos variables a definirse en el software de simulación, las cuales son V_c y a_p con tres niveles de estudio, se detalla en la Tabla 5 y 6.

Tabla 5. Velocidades de corte a analizar.

VELOCIDAD DE CORTE (m/min)		
1	2	3
140	180	220

Tabla 6. Profundidades de corte a analizar.

PROFUNDIDAD DE CORTE (mm)		
1	2	3
0.5	1	1.5

2.4. Selección de lubricante de mecanizado

Dentro del proceso de simulación y experimentación se define como lubricante predeterminado a utilizar LACTUCA LT 3000, el uso recomendado en base al catálogo es del 3 al 7 %, las características se detallan en la Tabla 7 [40].

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas del lubricante LACTUCA LT 3000 [40].

Propiedades	Descripción
Apariencia	Líquido límpido amarillo
PH	8.5 – 9.5
Viscosidad cinética	37 mm ² /s (@ 40° C)
Densidad	887-901 Kg/m ³ (@ 15° C)
Propiedades de explosión	No explosivo

2.5. Arreglo ortogonal

Stanziola menciona que la utilización del método Taguchi es eficaz para la optimización de parámetros de mecanizado, calidad, costos y reducción de pruebas experimentales, este método utiliza matrices ortogonales.

Una vez definidos los parámetros de corte a analizar se procede a realizar un arreglo ortogonal en relación con los factores y niveles establecidos anteriormente, a través de un software de análisis estadístico, obteniendo un arreglo ortogonal L9 que corresponden a los dos factores y tres niveles, obteniendo un total de simulaciones a realizar dadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Arreglo ortogonal L9

Simulaciones	Parámetros de mecanizado	
	V_c [m/min]	a_p [mm]
1	140	0.5
2	140	1
3	140	1.5
4	180	0.5
5	180	1
6	180	1.5
7	220	0.5
8	220	1
9	220	1.5

2.6. Modelado del proceso de cilindrado

Los software en 3D cuentan con diversos algoritmos especiales para poder modelar problemas de diversas índole, en este caso se analizará fuerzas de corte y consumo de energía con relación al proceso de mecanizado, se debe definir completamente la herramienta que se utilizará, el tipo de cuerpo a modelar el cual se definirá de manera rígida, no deformable, compuesto por un acero de media aleación, mismo que pasa por el proceso generando arranque de viruta y tomando forma, para la simulación se utilizará un modelo simplificado del diámetro de la pieza a mecanizar, debido a que el software cuenta con esta metodología.

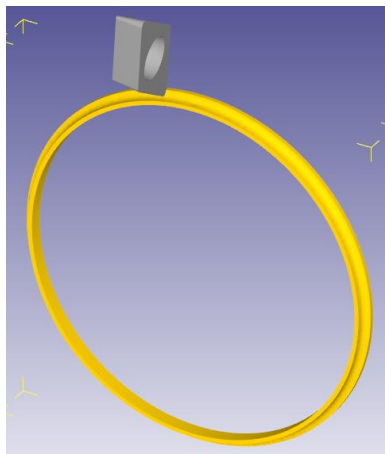


Figura 13. Esquema de la pieza a maquinar

2.7. Cálculos parámetros de corte

2.7.1. Velocidad de rotación de la pieza (n)

Conforme al proceso de simulación se realiza el cálculo correspondiente de n en función a las tres velocidades de corte a variar y en relación con el diámetro de la pieza a maquinar, lo cual se presenta en las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$n = \frac{140m / \text{min} \cdot 1000}{40mm \cdot \pi} = 1114RPM \quad (13)$$

$$n = \frac{180m / \text{min} \cdot 1000}{40mm \cdot \pi} = 1432RPM \quad (14)$$

$$n = \frac{220m / \text{min} \cdot 1000}{40mm \cdot \pi} = 1751RPM \quad (15)$$

2.7.2. Rugosidad superficial máxima (Ra max)

Para el proceso de cilindrado a realizar mediante experimentación, el cálculo de la rugosidad máxima va con relación a F de 0.1 mm/rev, el cálculo está dado en la ecuación 16.

$$Ra \text{ max} = \frac{0.1^2 \frac{mm}{rev}}{8 \cdot 0.8mm} \cdot (1000) = 1.5 \mu m \quad (16)$$

La razón de la selección del avance de 0.1 mm/rev está dado en relación con la rugosidad máxima de 1.5 μm , indica una clase de tolerancia N7 que es utilizada para el mecanizado en aceros 4340 para diferentes tipos de utilidades, se indica en la figura 14.

Valor de la rugosidad Ra		Clase de rugosidad	Signo de mecanizado equivalente (antiguo)
μm	μin		
50	2 000	N 12	~
25	1 000	N 11	
12,5	500	N 10	▽
6,3	250	N 9	
3,2	125	N 8	∇
1,6	63	N 7	
0,8	32	N 6	∇∇
0,4	16	N 5	
0,2	8	N 4	∇∇∇
0,1	4	N 3	
0,05	2	N 2	
0,025	1	N 1	

(a)

Ra [μm]	Aplicaciones típicas de rugosidad superficial
0,01	Bloques patrón – Reglas de alta precisión – Guías de aparatos de medida de alta precisión
0,02	Aparatos de precisión- Superficies de medida en micrómetros y calibres de precisión
0,03	Calibradores. Elementos de válvulas de alta presión hidráulica
0,04	Agujas de rodamientos. Superacabado de camisas de block de motores
0,05	Pistas de rodamientos. Piezas de aparatos control de alta precisión
0,06	Válvulas giratorias de alta presión. Camisas block de motor.
0,08	Rodamientos de agujas de grandes rodamientos
0,1	Asientos cónicos de válvulas. Ejes montados sobre bronce, teflón, etc. a velocidades medias. Superficies de levas de baja velocidad.
0,15	Rodamientos de dimensiones medias. Protectores de rotores de turbinas y reductores.
0,2	Anillos de sincronizados de cajas de velocidades
0,3	Flancos de engranaje. Guías de mesa de máquinas-herramientas
0,4	Pistas de asientos de agujas en crucetas.
0,6	Válvulas de esfera. Tambores de freno.
1,5	Asientos de rodamiento en cajas c/carga pequeña. Ejes-agujeros de engranajes. Cabezas de pistón
2	Superficies mecanizadas en general, ejes, chavetas, alojamientos, etc.
3	Superficies mecanizadas en general. Superficies de referencia. Superficies de apoyo
4	Superficies desbastadas
5 a 15	Superficies fundidas y estampadas
>15	Piezas fundidas, forjadas y laminadas.

(b)

Figura 14. (a) Tabla de valores de Ra (b) Aplicaciones de Ra [22].

2.7.3. Velocidad de Avance (f)

Para el cálculo a realizar en el proceso de simulación y experimentación se establece una distancia recorrida por la herramienta con respecto de la pieza y un F constante de 0.1 mm/rev, los cálculos se muestran en las ecuaciones 17, 18, 19.

$$f = 1114RPM \cdot \left(0.1 \frac{mm}{rev}\right) = 111.4 \frac{mm}{min} \approx 1.9 \frac{mm}{seg} \quad (17)$$

$$f = 1432RPM \cdot \left(0.1 \frac{mm}{rev}\right) = 143.2 \frac{mm}{min} \approx 2.4 \frac{mm}{seg} \quad (18)$$

$$f = 1751RPM \cdot \left(0.1 \frac{mm}{rev}\right) = 175.1 \frac{mm}{min} \approx 2.9 \frac{mm}{seg} \quad (19)$$

2.7.4. Sección de Viruta

El cálculo de sección de viruta en el proceso de simulación y experimentación se establece debido a F y a_p , el cálculo de muestra se indica en la ecuación 20 y los resultados en la Tabla

9.

$$S = \left(0.1 \frac{mm}{rev}\right) \cdot 0.5mm = 0.05mm^2 \quad (20)$$

Tabla 9. Secciones de las virutas en relación con la Vc de 140, 180, 220 m/min.

Sección de la viruta (mm²)			
Vc (m/min)	Ap (mm)	F (mm/rev)	S (mm²)
140	0.5	0.1	0.05
	1	0.1	0.1
	1.5	0.1	0.15
180	0.5	0.1	0.05
	1	0.1	0.1
	1.5	0.1	0.15
220	0.5	0.1	0.05
	1	0.1	0.1
	1.5	0.1	0.15

2.7.5. Fuerza principal de corte

Se realiza un cálculo referencial en razón a Fz, analíticamente en función de las secciones transversales de viruta de acuerdo a ap de 0.5, 1, 1.5 mm como se expresa en la ecuación 4 y se desarrolla en las ecuaciones 21, 22 y 23, se obtuvo una fuerza específica de corte (kc) de 1600 N/mm² de acuerdo al porcentaje de carbono del material a mecanizar del manual de torneado de Coromant [21].

$$F_z(N) = 1600 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \cdot 0.05mm^2 = 80N \quad (21)$$

$$F_z(N) = 1600 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \cdot 0.1mm^2 = 160N \quad (22)$$

$$F_z(N) = 1600 \left(\frac{N}{mm^2} \right) \cdot 0.15mm^2 = 240N \quad (23)$$

2.8. Proceso de programación en la simulación

Para el proceso de simulación se establecieron parámetros de corte definidos y calculados, se crea una Tabla 10 de proceso con la que se llevará a cabo cada simulación, el coeficiente de transferencia de calor y coeficiente de convección del refrigerante se obtuvieron por mecanizados realizados en investigaciones científicas [41].

Tabla 10. Parámetros de entrada del mecanizado en la simulación.

Parámetros de entrada de mecanizado en la simulación	
T ambiente	18 °C
Coefficiente de convección del refrigerante	0.02 N/sec/mm/°C
Factor de fricción cortante	0.457
Coefficiente de transferencia de calor	45 N/sec/mm/°C
T herramienta	18 °C
T pieza de trabajo	18 °C

Se procede a realizar la primera simulación con los parámetros antes definidos para obtener resultados favorables, se puede observar por la figura 15 ciertos parámetros definidos en el software de simulación para el proceso de cilindrado, mismos que fueron establecidos anteriormente.

Process Setup

Cutting Speed

Surface speed (v) 140 m/min

Rotational speed 1273.24 rpm

Workpiece Diameter (D) 0 mm

Depth of cut (d) 0.5 mm

Feed rate (f) 0.1 mm/rev

Close opr < Back Next >

Figura 15. Configuración del proceso de simulación.

Continuando con el proceso se indica ciertas condiciones que son fundamentales en la simulación con relación a la herramienta, refrigerante y PT, se observa en la figura 16.

Process Condition

Environment

Temperature 18 C

Coolant

Convection coefficient 0.02 N/sec/mm/C

Load from library Save to library

Tool-Workpiece Interface

Shear friction factor 0.457

Heat transfer coefficient 45 N/sec/mm/C

Close opr < Back Next >

Figura 16. Condiciones del proceso de simulación.

Se procede con la configuración de la herramienta, la cual se define como una nueva, ajustando las características indicadas en el manual de Coromant de Sandvik, indicado en la figura 17.

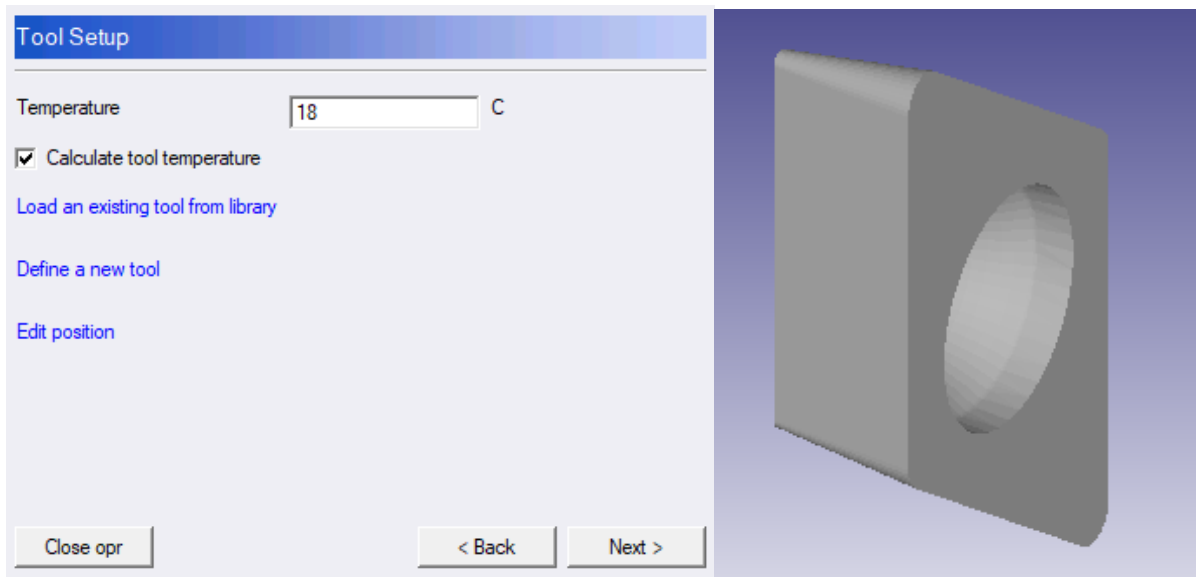


Figura 17. Configuración de la herramienta.

En la figura 18 se indica la geometría de PT, basado en un modelo simplificado, tomando en cuenta las dimensiones antes determinadas.

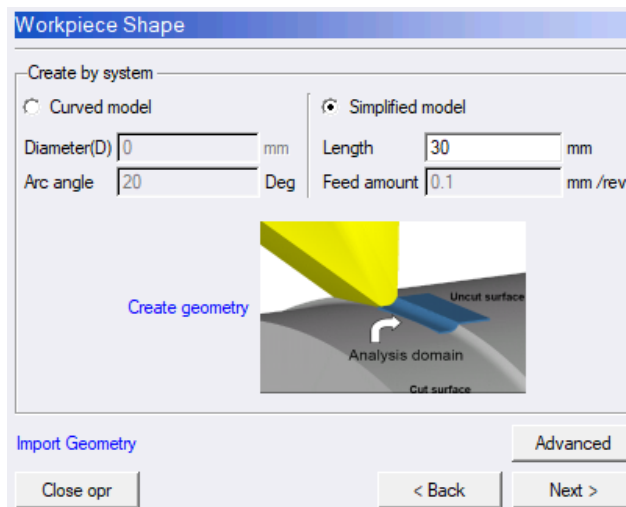
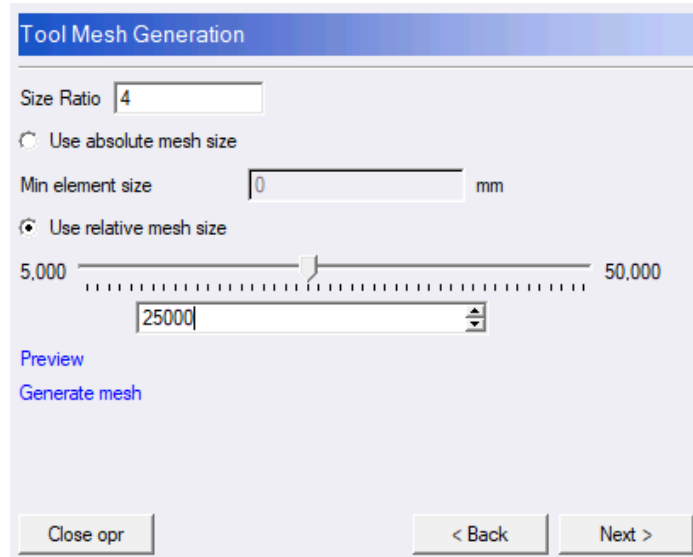


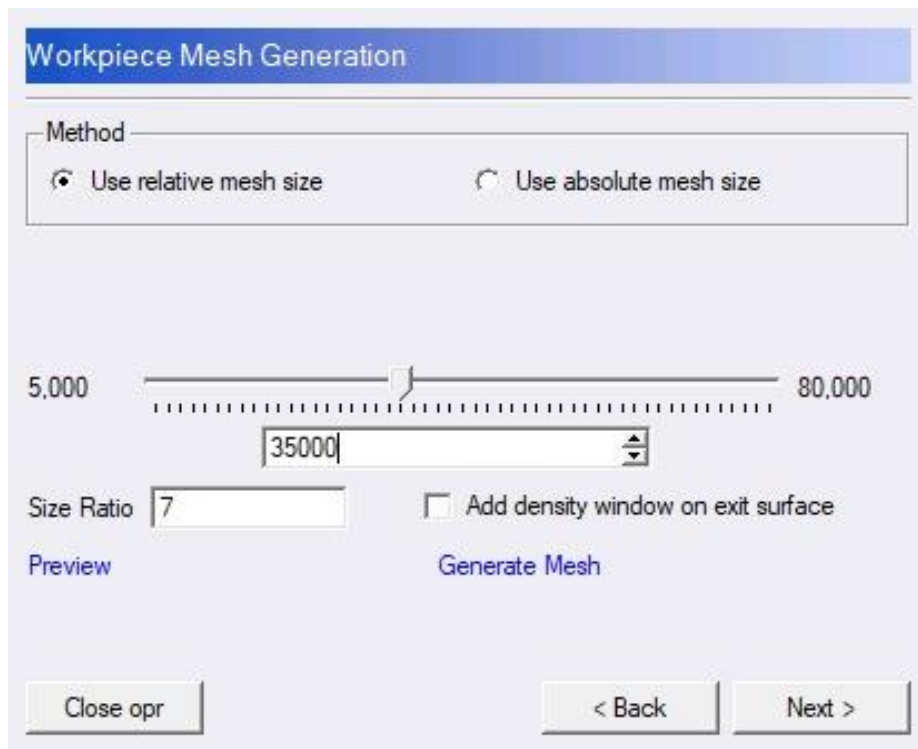
Figura 18. Geometría de la pieza de trabajo.

Dentro del proceso de simulación es de gran importancia el mallado de Hc y PT, en la figura 19 (a) se ajusta un mallado tetraédrico fino con un tamaño relativo de malla de 25000 elementos en base a la herramienta que posee cuatro esquinas, por lo que el software adopta un mallado acoplado equilátero, en la figura 19 (b) se realiza el mallado de PT con 35000 elementos, tomando en cuenta un criterio para mejorar la precisión de la simulación, este parámetro debe ser más refinado debido a que la PT está expuesta a la deformación por el mecanizado, una de las ventajas del software es que posee un refinado de malla al momento de realizar la simulación

lo que permite cuantificar la malla.



(a)



(b)

Figura 19. Configuración de malla (a) Herramienta de corte (b) Pieza de trabajo.

Se procede a verificar la calidad de la malla realizada tanto de la PT como de la Hc, según el parámetro de Cockcroft -Latham definido por el software el cual menciona que la densidad relativa de malla debe estar entre 0.6 a 1 cumpliendo en este caso la PT con el valor de 0.758 y

la Hc 0.688 como se indica en la figura 20 la malla realizada es válida mostrando las características que presenta la misma.

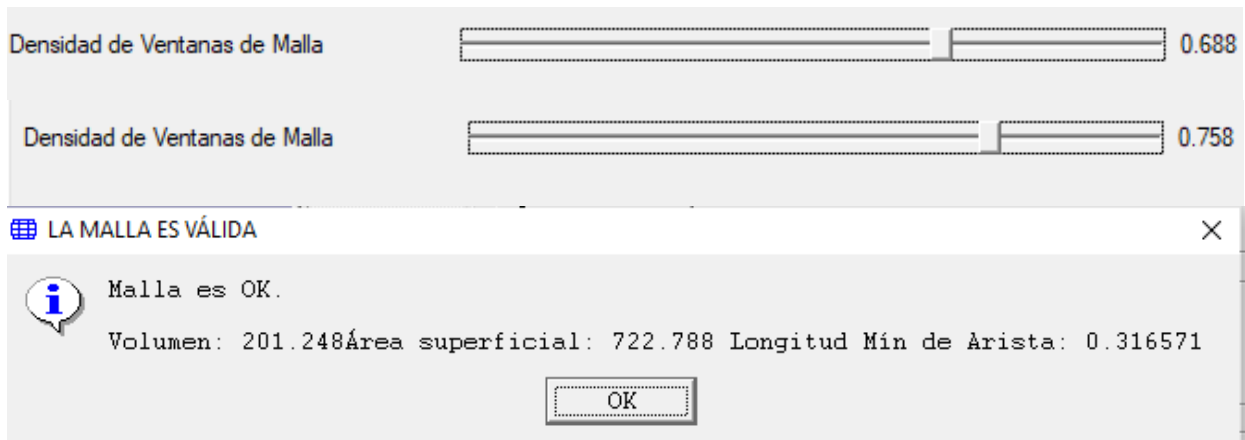


Figura 20. Calidad de malla.

2.9. Resultados obtenidos mediante simulación

Los parámetros encontrados mediante simulación por el software de elementos finitos se especifican en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros de corte obtenidos mediante simulación.

Parámetros de entrada			Parámetros obtenidos mediante simulación		
Vc (m/min)	Ap (mm)	F (mm/rev)	Fz (N)	Fy (N)	Fx (N)
140	0.5	0.1	68	427	47
	1	0.1	134	902	35
	1.5	0.1	174	1292	210
180	0.5	0.1	68	432	48
	1	0.1	144	982	143
	1.5	0.1	175	1326	211
220	0.5	0.1	68	440	49
	1	0.1	141	961	140
	1.5	0.1	205	1297	219

2.10. Resultados obtenidos mediante experimentación

Los resultados obtenidos mediante experimentación realizados en el torno de la Universidad en base al cilindrado se encuentran detallados en la tabla 12, estos datos de rugosidad únicamente fueron obtenidos experimentalmente para realizar una comparativa en base a los datos de simulación.

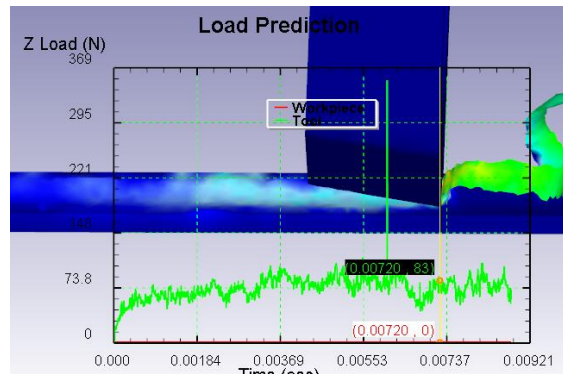
Tabla 12. Parámetros de corte obtenidos mediante experimentación.

Parámetros de entrada			Parámetros obtenidos mediante experimentación
Vc (m/min)	Ap (mm)	F (mm/rev)	Ra <i>um</i> al 3%
140	0.5	0.1	0,523
	1	0.1	0,551
	1.5	0.1	0,635
180	0.5	0.1	0,604
	1	0.1	0,643
	1.5	0.1	0,630
220	0.5	0.1	0,669
	1	0.1	0,796
	1.5	0.1	0,806

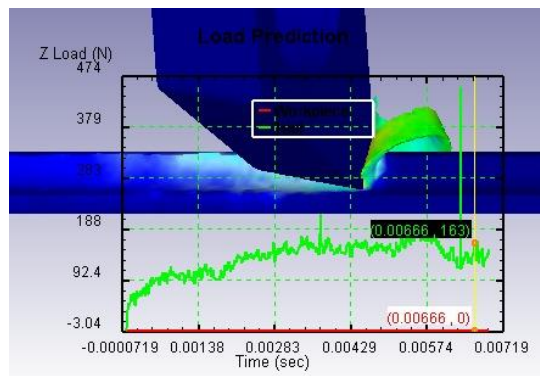
CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y RESULTADOS

3.1. Parámetros generados en la simulación

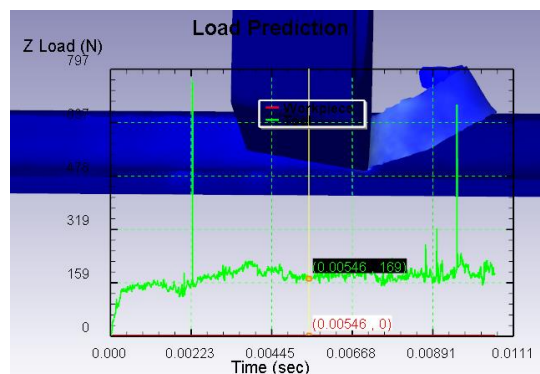
En la figura 21 se observa la representación gráfica dada por el simulador en razón de F_z , F_z aumenta gradualmente con el transcurso del tiempo de la simulación y está en una dirección ondulada por función de a_p y V_c .



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Fuerza de corte F_z (a) V_c 180 m/min con a_p 0.5 mm (b) V_c 140 m/min con a_p 1 mm (c) V_c 140 m/min con a_p 1.5 mm

La figura 22 indica un diagrama de dispersión de F_z vs a_p con los valores obtenidos mediante simulación en relación con V_c .

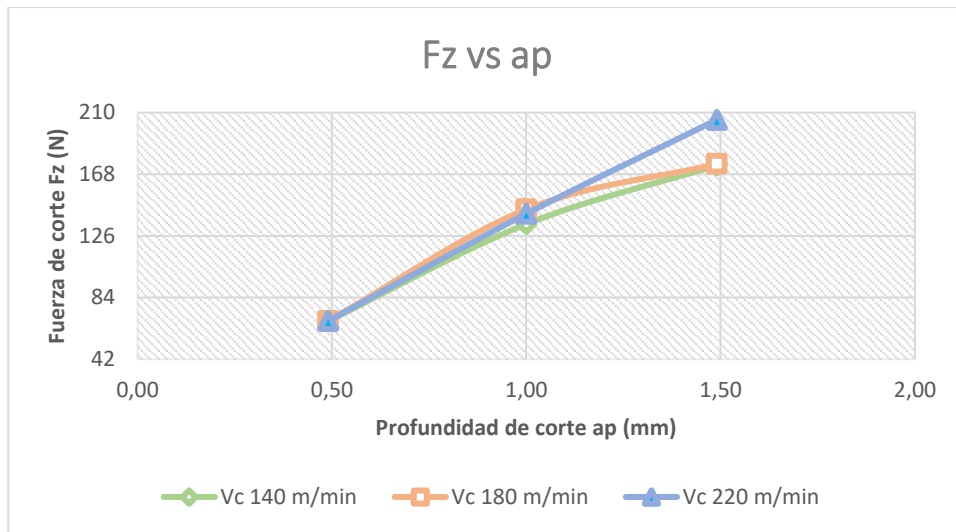


Figura 22. F_z (N) vs a_p (mm)

En la figura 22 se observa que la F_z máxima de 205 N va en relación con la profundidad de 1.5 mm con V_c de 220 m/min, mismo valor que tiene un 66% más de fuerza en comparación con V_c de 140 m/min y un a_p de 0.5 mm.

La figura 23 muestra un diagrama de dispersión de F_z vs V_c con los valores obtenidos mediante simulación en relación con a_p .

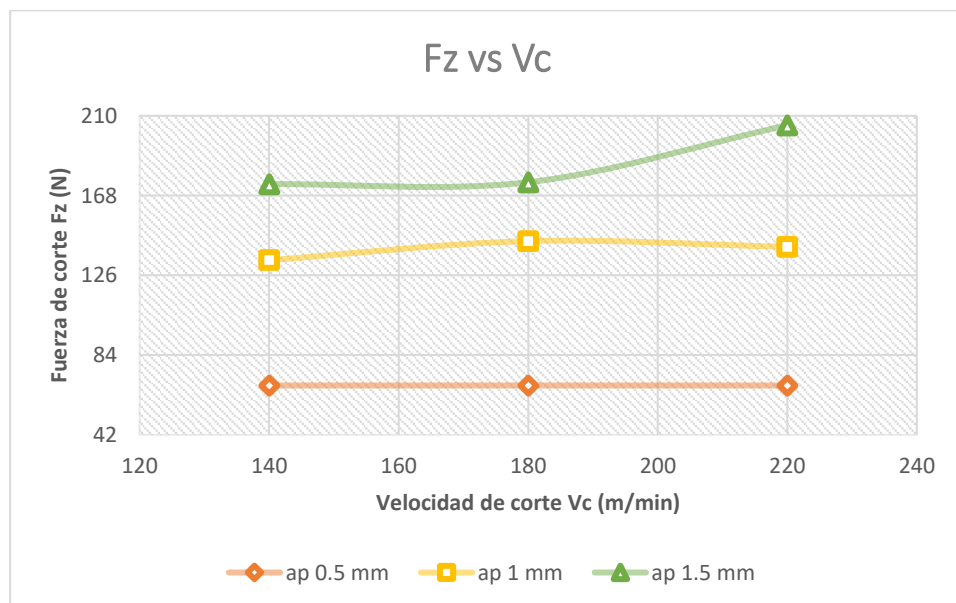


Figura 23. F_z (N) vs V_c (m/min)

Se verifica en la figura 23 que la F_z mínima tiene un valor de 68 N y es constante con relación a V_c de 140, 180 y 220 m/min con a_p de 0.5 mm, mismo valor que es el 48% menos que el promedio de fuerzas de 140 N con un a_p de 1 mm.

La figura 24 indica un diagrama de dispersión de F_z vs V_c vs R_a con los valores obtenidos mediante simulación y experimentación en relación con a_p de 0.5 mm y el 3% de refrigerante a utilizar.

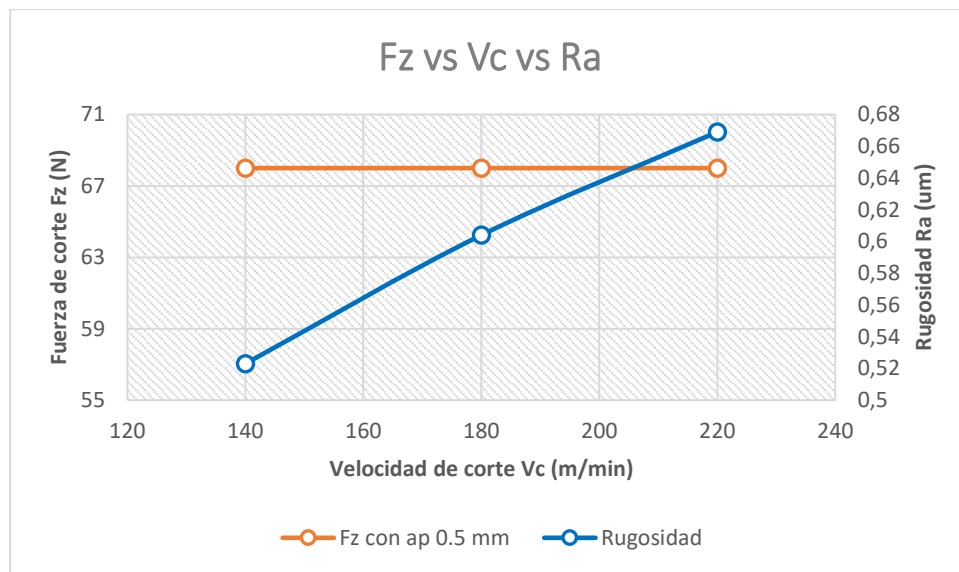


Figura 24. F_z (N) vs V_c (m/min) vs R_a (μm)

Se observa en la figura 24, la R_a mínima tiene un valor de 0.523 μm con V_c de 140 m/min considerando este valor como un buen acabado superficial, en relación con V_c 220 m/min con R_a 0.669 μm mismo que es un 22% con menor acabado superficial.

La figura 25 indica un diagrama de dispersión (F_z vs V_c vs R_a) con los valores obtenidos mediante simulación y experimentación en relación con a_p de 1 mm y el 3% de refrigerante a utilizar.

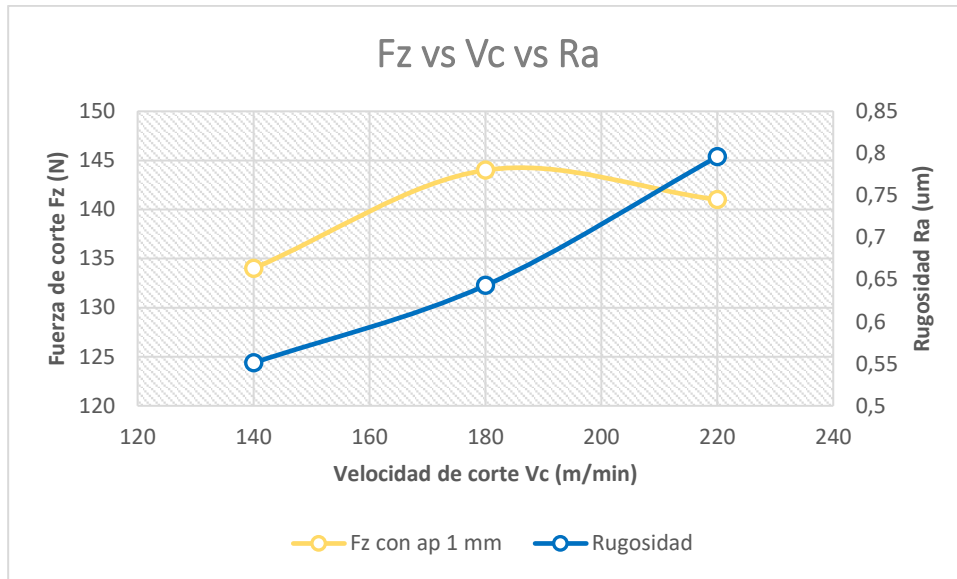


Figura 25. Fz (N) vs Vc (m/min) vs Ra (μm)

Se observa en la figura 25, la Ra mínima tiene un valor de $0.551 \mu m$ con Vc de 140 m/min y una Fz de 134 N considerando que tiene un buen acabado superficial, en relación con Vc 180 m/min con Ra $0.643 \mu m$ considerando que tiene un 16% menos de acabado superficial.

La figura 26 indica un diagrama de dispersión de Fz vs Vc vs Ra con los valores obtenidos mediante simulación y experimentación en relación con ap de 1.5 mm y el 3% de refrigerante a utilizar.

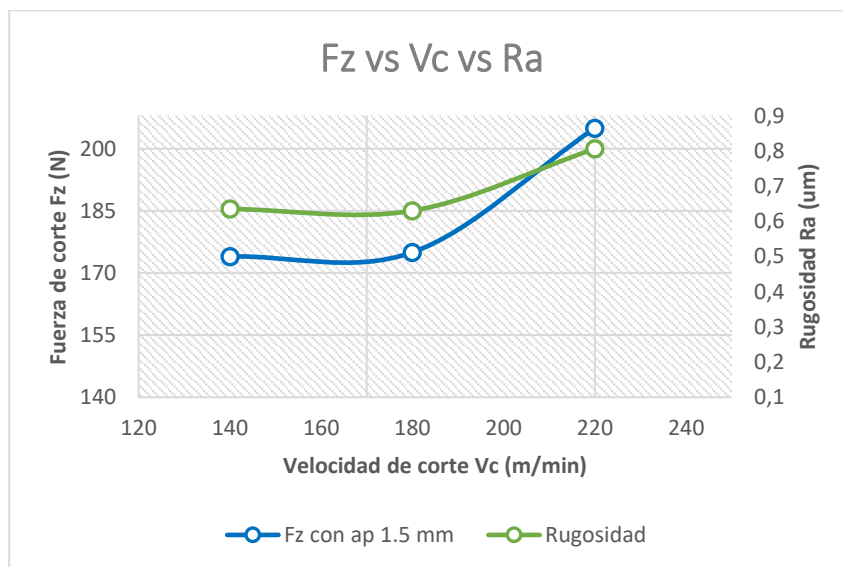
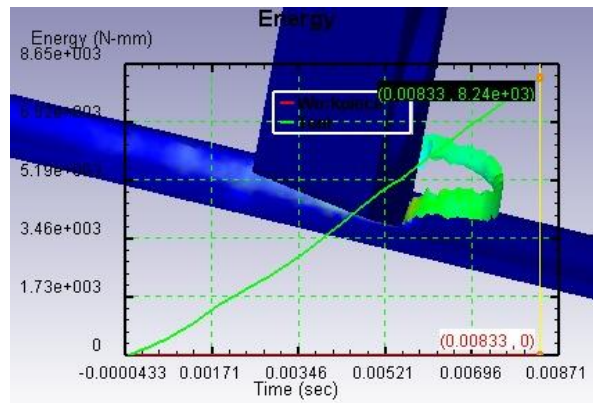


Figura 26. Fz (N) vs Vc (m/min) vs Ra (μm)

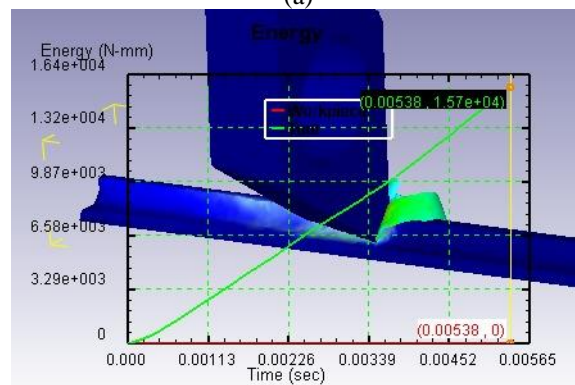
Se visualiza en la figura 26 que la Ra máxima tiene un valor de $0.806 \mu\text{m}$ con Vc de 220 m/min y una Fz de 205 N considerando que tiene un mal acabado superficial, en relación con Vc 140 m/min con Ra $0.635 \mu\text{m}$ considerando que tiene un 19% de mejor acabado superficial.

3.2. Relación de consumo de energía con el mecanizado

De acuerdo con las ecuaciones 9, 10, 11 y 12, las mismas que se detallan en el Capítulo 1, muestran como el software de simulación realiza el cálculo para generar datos del consumo de energía, van en relación con varias variables, entre las más importantes Vc, ap, F, Fz y Pc generadas. Por medio de la figura 27 se observa la representación gráfica lineal dada por el simulador con relación al consumo de energía el mismo que aumenta gradualmente con el transcurso del tiempo de la simulación y está en función de ap y Vc.



(a)



(b)

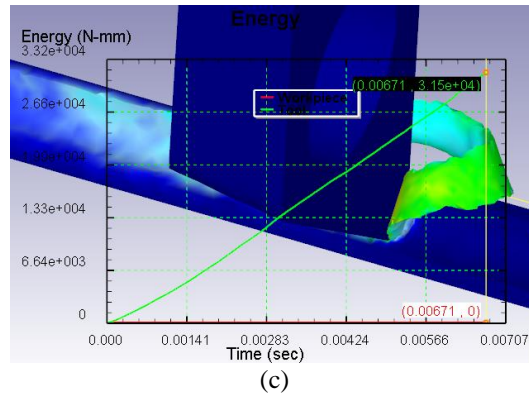


Figura 27. Consumo de energía (a) Vc 140 m/min con ap 0.5 mm (b) Vc 180 m/min con ap 1 mm (c) Vc 220 m/min con ap 1.5 mm

Para el análisis de sostenibilidad en el mecanizado se considera importante el estudio del consumo de energía por lo cual se realizó un análisis con relación a ap y Vc, los datos obtenidos mediante simulación se indican en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos de consumo de energía obtenidos mediante simulación

Parámetros de entrada		Consumo de energía obtenidos mediante simulación FEM	
Vc (m/min)	Profundidad de corte (mm)	Energía (KW)	Energía (J)
140	0.5	0.47	3.89
140	1	0.96	6.66
140	1.5	1.38	9.73
180	0.5	0.63	4.14
180	1	1.35	7.27
180	1.5	1.80	9.77
220	0.5	0.71	3.83
220	1	1.65	7.29
220	1.5	2.10	9.48

Por medio de la figura 28 se visualiza el diagrama de dispersión del consumo de energía con relación a Vc trabajada en la simulación obteniendo resultados favorables para un análisis de mecanizado sostenible.

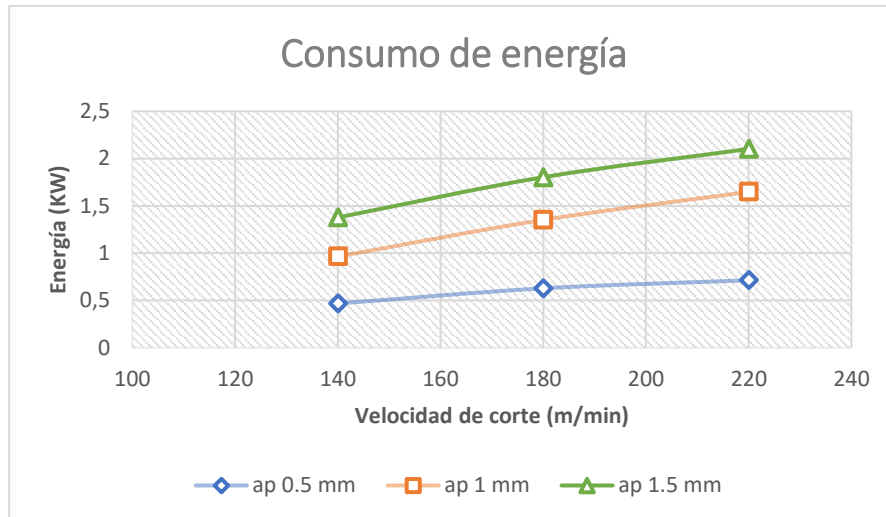


Figura 28. Consumo de energía en el proceso de cilindrado

En la figura 28 se observa que un mecanizado sostenible es decir con un menor consumo de energía se lo puede realizar con Vc y ap bajas, se visualiza que con Vc de 140 y ap 0.5 mm produce un consumo de energía de 0.4681 KW que se considera el 73% menos consumo de energía con relación a Vc de 220 y ap de 1.5mm.

3.3. Emisiones de carbono (Cee) con relación al consumo de energía

Para el análisis de emisiones de carbono en relación al consumo de energía hay que recalcar que los datos a utilizar son los obtenidos únicamente por simulación, en la ecuación 24 se indica el cálculo referencial de las emisiones liberadas de CO_2 a través de la máquina herramienta, dado que las emisiones de carbono están estrechamente relacionadas con el consumo de energía, se utiliza un factor de emisión de carbón de 0.4228 correspondiente a aceros de media aleación en la Tabla 14 se indican todos los resultados obtenidos [42].

$$C_{ee} = 3.89J \cdot 0.4228 = 1.64kg - CO_2 \quad (24)$$

Tabla 14. Datos de emisiones de carbono con relación al consumo de energía

Vc (m/min)	Profundidad de corte (mm)	Consumo de energía (J)	Emisiones de carbono (Kg- CO_2)
140	0.5	3.89	1.64
140	1	6.66	2.82
140	1.5	9.73	4.01
180	0.5	4.14	1.75
180	1	7.27	3.07
180	1.5	9.77	4.11
220	0.5	3.83	1.62
220	1	7.29	3.08
220	1.5	9.48	4.13

Por medio de los resultados de las emisiones de carbono se detalla que la máxima emisión de carbono se da con una Vc de 220 m/min y una ap de 1.5 mm generando 4.13 kg- CO_2 , este valor se puede reducir trabajando a una Vc de 140 m/min y una ap de 1.5 mm, de esta manera se reduce el impacto ambiental debido a que las emisiones de carbono están netamente relacionadas con el consumo de energía dando a conocer que a un menor consumo de energía, menor será la emisión de CO_2 .

CONCLUSIONES

1. Para un mecanizado sostenible, en el proceso de cilindrado se debe analizar correctamente ciertos parámetros adecuados para obtener un buen mecanizado por medio de la simulación y experimentación se pudo identificar que los principales parámetros sean V_c , a_p , F_z , R_a y consumo de energía.
2. Se realizó los ensayos y simulación de acuerdo con un Arreglo Ortogonal L9, mediante el Método Taguchi en el cual se utilizó tres niveles, tres factores como se observa en la Tabla 8, generando un arreglo de 9 ensayos experimentales en la simulación obteniendo parámetros de corte adecuados como F_z , R_a y consumo de energía.
3. Se analizó que a V_c de 140, 180, 220 m/min y a_p de 0.5 mm se obtiene F_z constante de 68 N debido a que la a_p tiene un valor mínimo en cuanto a desgaste en el proceso de cilindrado comparando con el valor promedio de F_z de 184 N en razón a V_c de 140, 180, 220 m/min y a_p de 1.5 mm considerando un incremento del 63%, como se puede observar en las figuras 22 y 23.
4. Por medio de la experimentación del proceso de cilindrado se evaluó la rugosidad en razón a V_c , F_z y a_p utilizando Lactuca 3000 al 3%, obteniendo resultados favorables en cuanto al acabado superficial de PT en el proceso de cilindrado, mostrando que a menor V_c presenta una buena calidad respecto al acabado de la pieza tomando como promedio de rugosidad $0.570 \mu m$ en comparación con V_c altas con un promedio de rugosidad de $0.757 \mu m$ es decir un 24% con menos calidad superficial en PT, tal como se puede visualizar en las figuras 24, 25 y 26.
5. Se logró analizar que en un mecanizado sostenible intervienen factores de mucha importancia como V_c con valores de 140, 180 y 220 m/min los mismos que influyen a una determinada a_p de 0.5, 1 y 1.5 mm logrando de esta manera evaluar que a mayor V_c y a_p se consume un promedio de energía de 1.4881 KW entre las simulaciones efectuadas considerando un mayor consumo energético a comparación con V_c y a_p menores obteniendo un promedio de 0.9366 KW, como se representa en la Tabla 13 y figura 27.
6. Se obtuvo las emisiones de carbono generadas por la maquina herramienta con el fin de lograr un mecanizado sostenible reduciendo el impacto ambiental indicando que trabajando con una misma profundidad de 1.5 mm, pero a velocidad de 140 m/min en comparación con 220 m/min se logra reducir en un 1%, se indica en la Tabla 14.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con la simulaciones y resultados obtenidos en el presente estudio, se recomienda que en futuras investigaciones:

1. Variar el porcentaje de refrigerante en el proceso de cilindrado para obtener una comparativa en razón a la lubricación del mecanizado.
2. Comparar con un dinamómetro las fuerzas obtenidas en la simulación utilizando un dinamómetro al momento de realizar el mecanizado manual.
3. Verificar que al momento de la experimentación el inserto debe cumplir con las normativas y parámetros adecuados para obtener un mecanizado optimo con relación a la rugosidad.
4. Considerar adecuadamente parámetros de corte para obtener un mecanizado sostenible y de esta manera generar mejores estudios con respecto al proceso de cilindrado.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] A. Salem, H. Hegab, and H. A. Kishawy, “An integrated approach for sustainable machining processes: Assessment, performance analysis, and optimization,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 25, pp. 450–470, 2021, doi: 10.1016/j.spc.2020.11.021.
- [2] G. Shao, D. Kibira, and K. Lyons, “A virtual machining model for sustainability analysis,” *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 3, no. PARTS A AND B, pp. 875–883, 2010, doi: 10.1115/DETC2010-28743.
- [3] K. Gok, “Development of three-dimensional finite element model to calculate the turning processing parameters in turning operations,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 75, pp. 57–68, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.07.034.
- [4] J. R. Gamage and A. K. M. De Silva, “Assessment of research needs for sustainability of unconventional machining processes,” *Procedia CIRP*, vol. 26, pp. 385–390, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.096.
- [5] M. Lotfi, M. Jahanbakhsh, and A. Akhavan Farid, “Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis,” *Tribol. Int.*, vol. 99, pp. 107–116, 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.03.008.
- [6] G. Liu, C. Huang, R. Su, T. Özel, Y. Liu, and L. Xu, “3D FEM simulation of the turning process of stainless steel 17-4PH with differently texturized cutting tools,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 155, no. March, pp. 417–429, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.016.
- [7] M. E. Korkmaz and M. Günay, “Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 9, pp. 4863–4870, 2018, doi: 10.1007/s13369-018-3204-4.
- [8] J. Weng, K. Zhuang, D. Chen, S. Guo, and H. Ding, “An analytical force prediction model for turning operation by round insert considering edge effect,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 128–129, no. April, pp. 168–180, 2017, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.04.018.
- [9] M. Vijaya Ganesa Velan, M. Subha Shree, and P. Muthuswamy, “Effect of cutting parameters and high-pressure coolant on forces, surface roughness and tool life in turning AISI 1045 steel,” *Mater. Today Proc.*, vol. 43, no. xxxx, pp. 482–489, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.020.
- [10] D. M. Kim, V. Bajpai, B. H. Kim, and H. W. Park, “Finite element modeling of hard turning process via a micro-textured tool,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 78, no. 9–12, pp. 1393–1405, 2015, doi: 10.1007/s00170-014-6747-x.
- [11] E. Ceretti, C. Lazzaroni, L. Menegardo, and T. Altan, “Turning simulations using a three-dimensional FEM code,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 98, no. 1, pp. 99–103, 2000, doi: 10.1016/S0924-0136(99)00310-6.
- [12] V. Sousa, F. J. G. Silva, J. S. Fecheira, H. M. Lopes, R. P. Martinho, and R. B. Casais, “Assessing the cutting forces in machining processes: An overview,” *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2020, pp. 787–794, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.110.
- [13] M. Nalbant, H. Go, and G. Sur, “Materials & Design Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning,” vol. 28, pp. 1379–1385, 2007, doi: 10.1016/j.matdes.2006.01.008.
- [14] J. Carlos and A. Rueda, *Prácticas de mecanizado en torno y fresadora*. .
- [15] G. V. Riestra, J. C. R. Fernández, S. M. Díaz, and E. Cuesta, “Planificación automática de operaciones de torneado de piezas de revolución,” no. December, 2002.
- [16] T. D. E. F. I. N. D. E. Grado, “Desarrollo de un modelo en 3d de corte de metales,” pp. 1–56, 2018.
- [17] J. Bueno, Diego; Gonzalez, “GUÍA DE APRENDIZAJE PARA MANEJO DE TORNO

- CNC WABECO CCD6000 E.,” pp. 1–27, 2015.
- [18] S. Yaldiz, F. Unsacar, and H. Saglam, “Comparison of experimental results obtained by designed dynamometer to fuzzy model for predicting cutting forces in turning,” *Mater. Des.*, vol. 27, no. 10, pp. 1139–1147, 2006, doi: 10.1016/j.matdes.2005.03.010.
- [19] S. K. S. R. Schmid, *ManufacturA, INGENIERÍA Y TecNOLOGÍA*. .
- [20] Universidad Carlos III de Madrid, “Conformacion Por Arranque De Viruta,” vol. 5, p. 198, 2020.
- [21] Sandvik, “Herramientas de torneado - Torneado general,” p. 529, 2012, [Online]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/Tecnologia1/SandvikTorno.pdf>.
- [22] Y. Morales Tamayo, Y. K. Zamora Hernández, P. J. Vásquez Carrera, M. P. Porras Vásquez, J. L. Bárzaga Quesada, and R. J. López Bustamante, “Network And Multiple Regression For Comparison Between Artificial Neural The Prediction of Superficial Roughness In Dry Turning,” *Ingenius*, no. 19, pp. 79–88, 2018.
- [23] S. G. López de Lacalle Marcaide, Lamikiz Menchaca, “Mecanizado de Alto Rendimiento.” p. 334, 2004.
- [24] S. Mishra and R. Dalai, “Effect of quenching and partitioning treatment on low carbon medium manganese alloyed steels-A short review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 593–596, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.107>.
- [25] U. D. E. Cantabria, “REVENIDO EN UN ACERO ALEADO (Influence of tempering temperature in alloy,” 2016.
- [26] “Ficha técnica,” no. 56 2, p. 6007.
- [27] DIPAC, “CATÁLOGO EJES,” p. 705, 2021.
- [28] H. M. Avila and M. G. Vásquez, “Aplicación de software de simulación como herramienta en el rediseño de plantas de producción en empresas del sector de alimentos,” *Prospectiva*, vol. 6, no. 2, pp. 39–45, 2008.
- [29] C. Fullana Belda and E. Urquía Grande, “Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación,” *Encuentros Multidiscip.*, vol. 11, no. 32, pp. 37–48, 2009, [Online]. Available: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3023238&info=resumen&idioma=SPA>.
- [30] R. S. Parihar, R. K. Sahu, and G. Srinivasu, “Finite Element Analysis of Cutting Forces Generated in Turning Process using Deform 3D Software,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 8432–8438, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.188.
- [31] O. İynen, A. K. Ekşi, H. K. Akyıldız, and M. Özdemir, “Real 3D turning simulation of materials with cylindrical shapes using ABAQUS/Explicit,” *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 8, 2021, doi: 10.1007/s40430-021-03075-5.
- [32] L. Juan, M. Kirschenbaum, and C. Crowe, “Máquinas y herramientas.”
- [33] C. D. S. Coromant, “Materiales de la herramienta de corte.”
- [34] R. D. E. Las and H. D. E. Corte, “Herramientas de corte,” pp. 1–14.
- [35] G. Tecnología and M. Procesos, “Materiales para herramientas de corte,” pp. 1–10.
- [36] C. D. S. Coromant, “Materiales de las piezas,” 2021. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>.
- [37] D. Curra, L. Hernández, J. de la Rosa, P. del C. Zambrano, M. Guerrero, and R. Pérez, “Estimación del consumo específico de energía en el torneado de alta velocidad del acero AISI-1045 utilizando redes neuronales Assessment of the specific energy consumption in high speed turning of AISI- 1045 steel using neural networks Métodos y Materiale,”

- vol. 23, no. 2, pp. 1–7, 2020.
- [38] C. D. S. Coromant, “DCMT11T308PM,” 2021. https://www.sandvik.coromant.com/es-es/pages/search15products.aspx?tpcleaf=INSTRNG_COR&q=DCMT11T308PM&filter=%7B%22refiners%22:%7B%22IsTailorMade%22:%5B0%5D%7D,%22tableType%22:null,%22selectedColumns%22:null%7D.
- [39] C. D. S. Coromant, “SDJCR2020K11,” 2021. <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=SDJCR2020K11>.
- [40] M. Safety and D. Sheet, “Lactuca Lt 3000 Lactuca Lt 3000,” vol. 2020, no. 1907, pp. 1–12, 2013.
- [41] C. Liu *et al.*, “Finite element analysis and wear mechanism of B4C–TiB2 ceramic tools in turning AISI 4340 workpieces,” *Ceram. Int.*, no. November, 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.090.
- [42] M. K. Gupta *et al.*, “Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 26, p. e00218, 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00218.