



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis experimental de las
fuerzas de corte en operaciones
de roscado externo en aleaciones
Al 2024, AISI 304 y Ti6Al4V**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Juan Javier Martínez Rincón

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Ignacio Cueva Güitrón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

A mis padres Juan Martínez García y Fabiola Rincón Flores, a mi hermana Dayana Michael Martínez Rincón, por brindarme siempre su apoyo incondicional y darme las fuerzas para seguir adelante.

A mis abuelos, Federico Rincón Ramírez y María Teresa Flores del Rio por ser mi motor y mi guía, por brindarme sus consejos y su cariño.

A toda mi familia por apoyarme en toda mi formación, por siempre confiar en mí y estar conmigo en todo momento.

A los amigos que han estado conmigo desde el principio de este camino Mariana, Marisol, Eduardo y los amigos que adquirí dentro de la Facultad de Ingeniería.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de concluir mis estudios universitarios.

A mi director de tesis M. I. Ignacio Cueva Güitrón por ser una guía en mi trabajo, por sus enseñanzas, sus consejos y por brindarme su amistad.

A todo el equipo de UDIATEM que participaron directa e indirectamente en la elaboración de este trabajo, especialmente a Daniel Roldan, M. en C. Edgar Isaac Ramírez Diaz, Diego Pichardo, Erick Luz, Tania Rojas, Eduardo Cuevas y Rither Rojas ya que su ayuda fue fundamental.

A mis sinodales:

Dr. Adrián Espinosa Bautista

Dr. Rafael Schouwenaars Franssens

Dr. Carlos Gabriel Figueroa Alcántara

Mtro. Osvaldo Ruiz Cervantes

Por su tiempo y dedicación, por sus observaciones y aportaciones para mejorar este trabajo.

A el Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento a la Enseñanza (PAPIME), a el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) y a la Dirección General de Asuntos de Personal Académico (DGAPA), por la aportación de recursos financieros para el instrumental de medición y herramientas utilizados en este trabajo.

Introducción

Los procesos por arranque de viruta dentro de la manufactura son muy importantes debido a que brindan beneficios tanto, la parte económica, así como la calidad de las piezas manufacturadas.

En la actualidad, los conocimientos que se han generado sobre procesos son afines a las operaciones básicas por arranque de viruta, sin embargo, las actividades con un mayor grado de dificultad como por ejemplo roscado interior, exterior, tronzado, etc. se han mantenido sin cambios debido a que las investigaciones están principalmente enfocadas en las operaciones básicas como por ejemplo el cilindrado, taladrado y refrentado.

Las investigaciones que se han realizado en los últimos 20 años en relación con el torneado de roscas se han realizado principalmente por parte de los fabricantes de herramientas de corte; de estas investigaciones, se han obtenido grandes beneficios como el desarrollo de mejores herramientas de corte, siendo los recubrimientos, grados de materiales y nuevos diseños las principales contribuciones.

La primera etapa para la creación de nuevos conocimientos sobre esta operación es comprender perfectamente como los parámetros de corte influyen en el proceso, y en la generación de protocolos que promuevan a realizar experimentos de una manera ordenada y así documentar los resultados del comportamiento de las fuerzas de corte en operaciones de roscado externo.

La importancia que tiene el análisis de fuerzas de corte en el torneado de roscas radica en que estas fuerzas influyen en el desgaste de la herramienta, en el acabado superficial de la pieza manufacturada, y en la energía consumida por la máquina herramienta (torno), lo que implica una adecuada elección de los parámetros de corte ya que serán determinantes en las fuerzas que se presentan en el maquinado y que a su vez se verán reflejadas en los costos asociados a la operación.

Los nuevos avances tecnológicos en herramientas de mecanizado han provocado que se aumenten las exigencias de calidad en productos industriales y que a su vez las operaciones de fabricación sean compatibles con el medio ambiente. El tipo de análisis que se hará en este trabajo está orientado para la generación de información detallada del proceso de roscado externo.

Existe una amplia variedad de materiales de ingeniería de uso industrial y cada vez surgen nuevas aleaciones que aún están sujetas a estudios debido a que en la literatura la información de parámetros de corte de estos materiales es carente; tal es el caso del Titanio Ti6Al4V, el Acero AISI 304 y el Aluminio 2024. Estas aleaciones cuentan con una amplia gama de aplicaciones en la industria aeronáutica, naval e incluso en ingeniería biomédica, por lo tanto; es conveniente tener parámetros de corte más precisos y enfocados a los diferentes procesos de manufactura.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado externo

Para este trabajo se definió el estudio de roscas unificadas derechas de una sola entrada para la experimentación, debido a que las características del equipo utilizado son en base al sistema inglés, por lo que lo hace más compatible en cuanto a la fabricación de roscas unificadas en comparación de roscas métricas.

Este trabajo está enfocado a la determinación de las principales fuerzas de corte, F_z , F_y , F_x (“ F_z ” fuerza de corte tangencial, “ F_y ” fuerza de avance y “ F_x ” fuerza radial) que están presentes durante las operaciones de roscado. A continuación, se describe brevemente el contenido de los cinco capítulos del cual consiste este documento.

El Capítulo 1, se muestra a grandes rasgos el estado del arte, donde se abarcan temas del contexto histórico enfocado a la evolución de las máquinas herramientas, herramientas de corte y en general de los procesos por arranque de viruta siendo el torneado el enfoque principal. También se aborda brevemente las teorías de fuerza de corte ortogonal

El Capítulo 2, se aborda temas relacionados con los elementos roscados con una breve introducción histórica, terminología, aplicaciones y métodos de fabricación, enfocándose principalmente en el torneado de roscas externas.

El Capítulo 3, describe detalladamente las características de los instrumentales, el equipo de mediciones de fuerzas con que se cuenta en la UDIATEM (Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales) y los materiales que se utilizaron para la conclusión de este trabajo, así mismo se explica la aplicación de la metodología que se utilizó para el desarrollo de los experimentos.

El Capítulo 4, se enfoca principalmente en la manipulación y generación de gráficos a partir de los datos obtenidos en las mediciones durante las operaciones de roscado, realizando un análisis comparativo de las fuerzas de corte, de la potencia unitaria y el coeficiente de fricción tomando en cuenta a los materiales y a los parámetros de corte que se utilizaron en la experimentación.

El Capítulo 5, contiene las conclusiones generales y particulares a partir del análisis de resultados, además se presentan una serie de recomendaciones para seguir enriqueciendo los procedimientos experimentales para trabajos futuros.

Contenido

Introducción.....	I
Capítulo 1. Estado del Arte	1
1.1 Evolución Histórica del Mecanizado	2
1.2 Teoría del corte de metales	3
1.3 Procesos por arranque de viruta.....	4
1.3.1 Formación de viruta	6
1.3.2 Herramienta de corte	9
1.3.3 Temperatura durante el proceso de corte.....	12
1.3.4 Fluidos de corte	14
1.4 Torno y operación de torneado	16
1.4.1 Parámetros.....	18
1.4.2 Relación empírica de parámetros para torneado	18
1.4.3 Operaciones de torneado	19
1.5 Fuerzas de corte involucradas en operaciones de torneado	20
1.5.1 Modelo de corte ortogonal	21
Capítulo 2. Fundamentos en la elaboración de roscas	25
2.1 Roscas	26
2.1.1 Elementos de la rosca.....	27
2.1.2 Clasificación de las roscas.....	28
2.1.3 Designación de las roscas.....	30
2.1.1 Clase de paso.....	31
2.1.2 Clase de tolerancia en rosca	31
2.2 Torneado de roscas	32
2.2.1 Relación empírica de parámetros para torneado de roscas.....	34
2.2.2 Métodos de penetración de corte por pasada.....	35
2.2.3 Herramientas de corte para torneado de roscas	36
Capítulo 3. Metodología Experimental	38
3.1 Equipo de medición de fuerzas de corte en torneado	39
3.1.1 Dinamómetro 9263 KISTLER y componentes.	39
3.1.2 Máquina-herramienta Torno.....	42
3.1.3 Herramental para roscas en torno.....	43
3.2 Material y características de la probeta.....	44

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado externo

3.2.1	Titanio Ti6Al4V	44
3.2.2	Acero AISI 304	45
3.2.3	Aluminio 2024.....	46
3.2.4	Probetas	47
3.3	Montaje de probetas y equipo	49
3.3.1	Montaje de equipo de medición de fuerzas de corte	49
3.4	Desarrollo de protocolo en mediciones de fuerzas de corte	52
Capítulo 4 Análisis gráfico de fuerzas de corte en operación de roscado.....		54
4.1	Análisis de las fuerzas que intervienen en el roscado.....	55
4.2	Fuerzas registradas en la experimentación	56
4.2.1	Fuerzas de corte obtenidas en Aluminio 2024.	57
4.2.2	Fuerzas de corte obtenidas en acero inoxidable AISI 304.	58
4.2.3	Fuerzas de corte obtenidas en titanio Ti6Al4V.	59
4.3	Potencia unitaria o energía específica experimental	59
4.4	Coefficiente de fricción	61
4.5	Análisis de resultados	62
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones		65
5.1	Conclusión	66
5.2	Recomendaciones y trabajos a futuro	66
Bibliografía.....		68

Capítulo 1. Estado del Arte

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

1.1 Evolución Histórica del Mecanizado

La necesidad de obtener métodos para la transformación de materiales data de hace miles de años en la historia. Inicialmente, las herramientas fueron muy rudimentarias, la mayoría como instrumentos manuales y elaboradas a base de materiales de fácil obtención, desde piedra a madera siendo las más comunes. Existen datos de la antigua cultura egipcia, donde se aprecia que ya existían, mecanismos rudimentarios donde se hacía girar ejes para realizar perforaciones.

Con el paso de los años el hombre ha evolucionado sus técnicas para la creación de herramientas, pero propiamente el mecanizado de metales surge hasta la creación de la primera máquina-herramienta, término que se le otorga aquellas herramientas donde la fuente de energía para su funcionalidad es independiente al esfuerzo humano [1].

El mecanizado o maquinado es la descripción del conjunto de técnicas que tiene como fin la remoción de material para modificar la geometría de una pieza de trabajo [2].

En la *Tabla 1.1*, se presenta los acontecimientos más importantes relacionados con investigaciones del mecanizado y la evolución de las máquinas herramientas a lo largo de la historia.

Tabla 1.1 Reseña evolutiva del mecanizado y de las máquinas herramientas [3].

Siglo IV a.C.	Dato arqueológico de la antigua cultura egipcia del primero mecanismo que se utilizaba para barrenar (perforación).
Siglo VIII d.C.	Surge la primera máquina-herramienta torno por garrocha o de pértiga
Siglo XV d.C.	Surge el primer tono accionado por manivela. Se diseña el primer torno para roscar por Leonardo da Vinci.
Año 1550 d.C.	Primera máquina cepilladora por Marx Lobsinger.
Año 1712 d.C.	Surgen las primeras máquinas rudimentarias a base de vapor.
Año 1760 d.C.	Surge el primer torno con carro porta-herramienta conocido Vaucason.
Año 1763 d.C.	James Watt crea la primera máquina de vapor industrial.
Año 1800 d.C.	Henry Maudsely crea el primer torno cortador de tornillos y capaz de cilindrar con tolerancias muy precisas, en Inglaterra.
Año 1818 d.C.	Surge la primera máquina fresadora por Whitney en Estados Unidos.
Año 1835 d.C.	Surge el primer taladro de columna por Whitworth.
Año 1836 d.C.	Surge la primera máquina limadora por Jame Nasmyth.
Año 1842 d.C.	Gracias a la máquina de vapor se crea el primer torno automático con mayor precisión, construido por Shipe.
Año 1860 d.C.	Josel realiza los primeros estudios sobre velocidades de corte y ángulos de filo para procesos de mecanizado.
Año 1861 d.C.	Surge la primera máquina- fresadora universal creada por la firma Brown y Sharpe.
Año 1871 d.C.	Se crean las primeras herramientas de aleaciones de acero.
Año 1891 d.C.	Acheson crea el primer abrasivo artificial a base de carburo de silicio.
Año 1870 d.C.	Primeros estudios sobre la generación de viruta en procesos de corte realizado por Time.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Año 1881 d.C.	Se realizan los primeros análisis sobre la formación de viruta como un proceso de deformación plástica y se estudia la influencia de los agentes lubricantes en el maquinado por Malloch.
Año 1893 d.C.	Se realizan los primeros estudios sobre análisis de fuerzas de corte y geometría de viruta por Zovrykin.
Año 1907 d.C.	Se publica el trabajo <i>On the art of cutting metales</i> , donde se habla de maquinado de aceros y el desgaste de la herramienta de corte, publicado por Taylor y Withe.
Año 1925 d.C.	Schlesinger realiza las primeras mediciones de fuerzas de corte.
Año 1926 d.C.	Se demuestra que el proceso de arranque de viruta está unida a un proceso cortante.
Año 1930 d.C.	Nace el primer torno de 3 carros de alta presión, para maquinados y operaciones más complejas.
Año 1948 d.C.	El desarrollo de los ordenadores de cómputo permite la invención de máquinas herramientas por control numérico capaces de realizar geometrías muy complejas con tolerancias muy cerradas por Jhon Parson.

La evolución de las máquinas herramientas y el estudio del mecanizado se ha adaptado de acuerdo con las necesidades del hombre y de la época. Un factor muy importante para esta evolución, han sido las guerras, ya que, de la necesidad de tener el mejor armamento, fue necesario desarrollar nuevas tecnologías.

Es evidente que en la actualidad los procesos de mecanizado y las máquinas herramientas siguen el mismo principio que en la antigüedad, pero los nuevos avances tecnológicos en el desarrollo de nuevas aleaciones, así como de software, han sido factor fundamental para lograr avances en procesos de maquinado más complejos y eficientes.

1.2 Teoría del corte de metales

En los procesos de manufactura de metales como, por ejemplo, fundición, generalmente es necesario realizar otro proceso para obtener la pieza final. Otros procesos como son laminado, forja, extrusión, troquelado etc., también aproximan a la geometría final de la pieza, en algunos casos requieren de uno o más procesos y estos son conocidos como procesos secundarios o de acabado.

Los procesos secundarios generalmente son de corte con arranque de viruta donde se realizan tareas con mayor exactitud dimensional y geométrica como barrenos profundos de diámetros pequeños (1.5 mm), superficies en ángulos agudos, secciones u orificios roscados que requieren tolerancias dimensionales específicas y cerradas, así como acabados superficiales de acuerdo a requerimientos de funcionalidad [2].

Las operaciones de corte con arranque de viruta se involucran a la herramienta de corte, la pieza de trabajo, el material desprendido y, en algunos casos, el fluido de corte que tiene influencia en el acabado superficial. Las altas velocidades, el alto grado de deformación del material generado por

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

una máquina-herramienta, la potencia para separar el material de la pieza y la temperatura asociada que se genera durante la operación de corte son algunas de las consideraciones que se deben tener en cuenta en este tipo de procesos [4].

Durante las operaciones de corte con desprendimiento de viruta se presentan grandes deformaciones en el material, las cuales se relaciona con los parámetros de corte, las variaciones de las geometrías y materiales de las herramientas de corte, las condiciones de la máquina-herramienta y en ocasiones el medio en el que se realiza la operación.

Se sabe que la geometría define la mayoría de estos parámetros, por otro lado, el material de trabajo, también influye en la elección de los parámetros del proceso, es por esto que es importante definir la propiedad de maquinabilidad que relacione el material con la operación requerida.

La maquinabilidad o capacidad de mecanizado de metales se define como la facilidad con la que puede ser desprendido el material en forma de viruta o rebaba con una herramienta. Los aspectos principales a tomar en cuenta para la maquinabilidad de un material son: fuerzas de corte, dureza de la materia prima (tomando en consideración tratamientos térmicos), ya que el proceso de obtención del material en bruto puede generar una superficie con diferentes propiedades mecánicas, así como heterogeneidades en los materiales. La maquinabilidad no tiene una definición concreta, pero se deduce como la capacidad del material de la pieza a ser mecanizado y está relacionada con el desgaste en la herramienta de corte y con la cantidad de viruta que se puede generar en el proceso. En ocasiones se maneja el término “buena maquinabilidad” que deriva de un proceso de corte que no presentó dificultades, y que la vida útil de la herramienta fue considerable [5].

Las propiedades mecánicas del material que están involucradas en la determinación de la maquinabilidad son principalmente la dureza, la tenacidad, módulo de elasticidad y calor específico. Un material con elevada dureza promueve desgaste abrasivo en la herramienta de corte, provoca que las fuerzas de corte se incrementen considerablemente dificultando la operación de mecanizado. La energía específica y la temperatura de corte influyen de manera directa en el acabado superficial [6].

1.3 Procesos por arranque de viruta

Uno de los procesos de mecanizado de metales más importantes y de mayor uso en la industria, son los que se conocen como procesos por arranque de viruta. En comparación con otros métodos, este se caracteriza por generar una gran cantidad de desperdicio de material, producto del mecanizado de una pieza.

La deformación y el esfuerzo cortante de metal es el fundamento del que parten los procesos con arranque de viruta, y dentro de la familia de estos procesos, las operaciones de maquinado convencionales son las que más destacan y son básicamente, generar una geometría a una pieza realizando cortes de metal con ayuda de una herramienta afilada de corte y una máquina-herramienta mecánica tal como se muestra en la *Figura 1.1*.

Los procesos principales por arranque de viruta son el torneado, taladrado y el fresado, se dice que, con estas tres operaciones se pueden generar casi el 90% de las geometrías existentes en una pieza. Sin embargo, existen otras operaciones que también son de remoción de material, como son el

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

cepillado, el brochado, el aserrado y el rectificado que junto con los procesos de abrasión consisten en la remoción de material a través de partículas abrasivas de gran dureza.

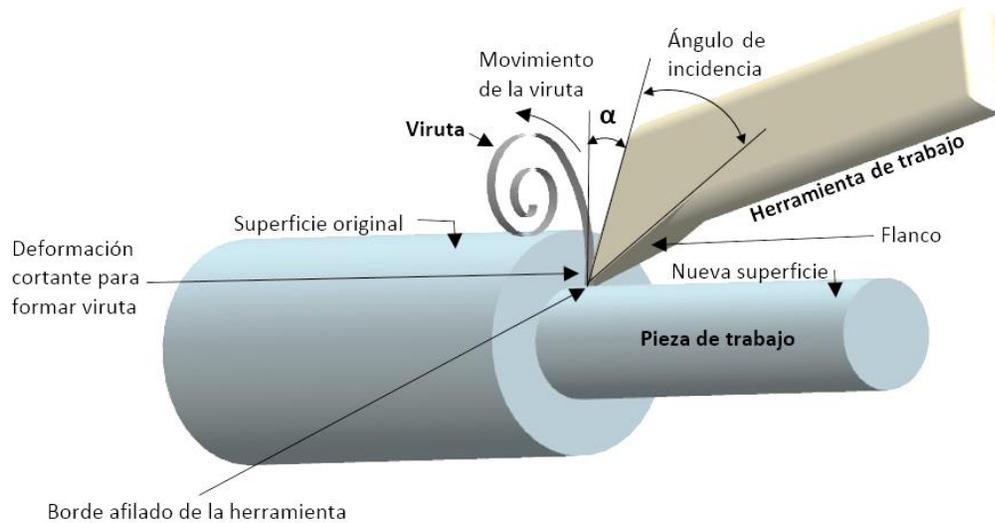


Figura 1.1 Visualización de proceso de arranque de viruta en torno.

Las principales ventajas y desventajas, así como las características de los procesos por arranque de viruta se resumen en la *Tabla 1.2*.

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas en los procesos por arranque de viruta descritas en Introducción a los Procesos de Manufactura de Mikell P. Groover [7].

Ventaja	Características
<i>Se pueden trabajar una gran variedad de materiales.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • La herramienta siempre es de mayor dureza que el material de trabajo. • Prácticamente todos los metales sólidos se pueden maquinar. • Los materiales poliméricos y compuestos se pueden maquinar por arranque de viruta, variando los parámetros de corte, respecto a los metales. • Los materiales cerámicos solo pueden utilizar este proceso con ayuda de abrasivos.
<i>Se pueden elaborar una alta variedad de formas y geometrías.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede elaborar cualquier geometría regular, entre ellas se encuentran las superficies planas, cilindros y barrenos redondos. • Se puede modificar la trayectoria en la elaboración de geometrías regulares y en combinación con la gran variedad de formas de herramientas, se pueden generar distintas geometrías irregulares. • Realizando la combinación de maquinado y con ayuda de control numérico computarizado, es posible elaborar superficies y formas de alta complejidad.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

<i>Precisión dimensional.</i>	<ul style="list-style-type: none">• Estos procesos en comparación a otros brindan mayor exactitud en sus dimensiones.• Los procesos por arranque de viruta son capaces de producir tolerancias muy cerradas.
<i>Buen acabado superficial.</i>	<ul style="list-style-type: none">• Con parámetros adecuados de maquinado, se pueden generar superficies con rugosidades muy pequeñas.• Los procesos abrasivos logran mejores acabados.
Desventajas	Características
<i>Desperdicio de material</i>	<ul style="list-style-type: none">• Como el mismo nombre lo indica, los procesos de arranque de viruta proceden remoción de material para obtener un producto final; la viruta es desperdicio visto desde el punto de vista del maquinado.• En muchas ocasiones, el material de remoción se puede reciclar, pero esto ya forma parte de un proceso externo al de arranque de viruta.
<i>Tiempo de maquinado</i>	<ul style="list-style-type: none">• Debido a la complejidad de geometrías que se pueden generar con estos procesos, en combinación con la diversa gama de materiales y con los distintos parámetros de corte; los tiempos de maquinado se pueden incrementar bastante en comparación a otros procesos de formado tales como la fundición.

1.3.1 Formación de viruta

A los primeros estudios enfocados en la formación de viruta y hasta la actualidad, se les han dado gran importancia ya que los resultados obtenidos pueden determinar la calidad y la naturaleza del proceso de maquinado, torneado, fresado, taladrado, por mencionar algunos [3].

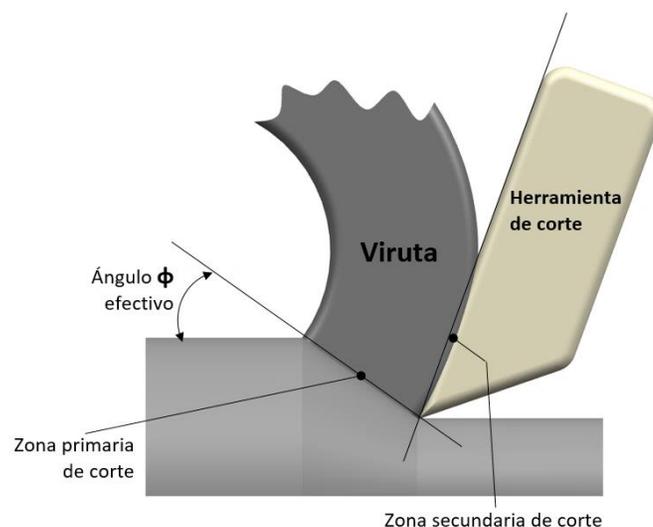


Figura 1.2 Visualización de la formación de viruta y las zonas de corte.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Las virutas son fragmentos de material de desperdicio en forma de laminillas curvas o en espiral. Para la formación de viruta existen varios factores que van desde las propiedades del material de trabajo, la velocidad de trabajo, el ángulo de incidencia de la herramienta, la velocidad de avance y profundidad de corte del maquinado al igual que un fluido de corte (*Figura 1.2*).

Debido a que hay una gran cantidad de variables que determina la forma de la viruta, estas se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Discontinua o segmentada.
- Continua con borde liso.
- Continúa con acumulación en el borde.
- Dentada o Escalonada.

Viruta Discontinua: Son segmentos removidos del material, algunas veces separados entre sí, otras ligeramente unidos; generalmente se producen cuando se mecanizan materiales frágiles o en materiales dúctiles a velocidades muy bajas. Este tipo de segmentos son producidos por la fractura del metal ante el filo cortante de la herramienta.

Este tipo de viruta muestra distintos fenómenos dependiendo del tipo de material (*Figura 1.3*).

- Para materiales frágiles, una viruta discontinua, dará un acabado relativamente terso, una disminución de potencia en el maquinado ayudará en la conservación del filo de la herramienta.

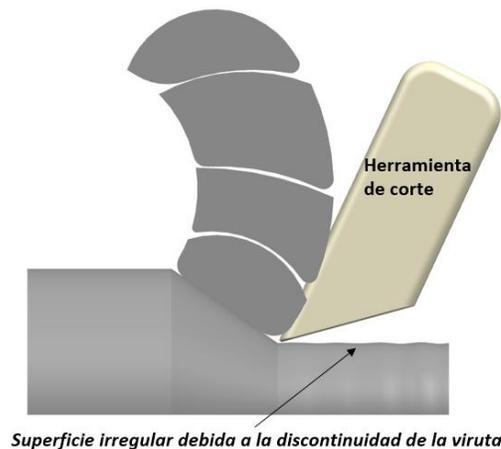


Figura 1.3 Viruta Discontinua.

Viruta Continua: Este tipo de virutas se forman generalmente cuando se maquinan materiales dúctiles, a altas velocidades de corte, o con grandes ángulos de ataque (*Figura 1.4*).

Generalmente una viruta continua es señal de un buen acabado superficial, pero por otro lado no es recomendable dejar crecer la viruta, debido a que esta se llega a enredar en la herramienta o portaherramienta e incluso en la misma pieza de trabajo [2].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Una herramienta bien afilada en óptimas condiciones de operación y sin desgaste, propician que disminuya la fricción entre la herramienta y la viruta, por lo cual las virutas generadas son continuas.

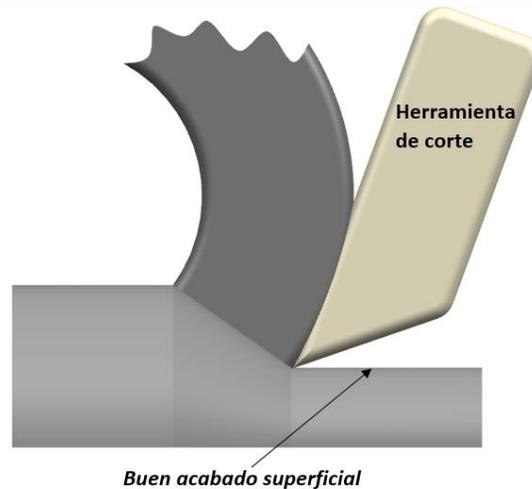


Figura 1.4 Viruta Continua.

Viruta con Borde Acumulado: Normalmente en materiales dúctiles a bajas velocidades la fricción entre herramienta y viruta genera un adherente entre el material y la herramienta [7].

El borde acumulado o BUE por sus siglas en inglés son pequeñas partículas del material de trabajo, que en su mayoría se adhieren y se acumulan en la herramienta de trabajo y otra pequeña parte se deposita al azar en la pieza de trabajo (*Figura 1.5*).

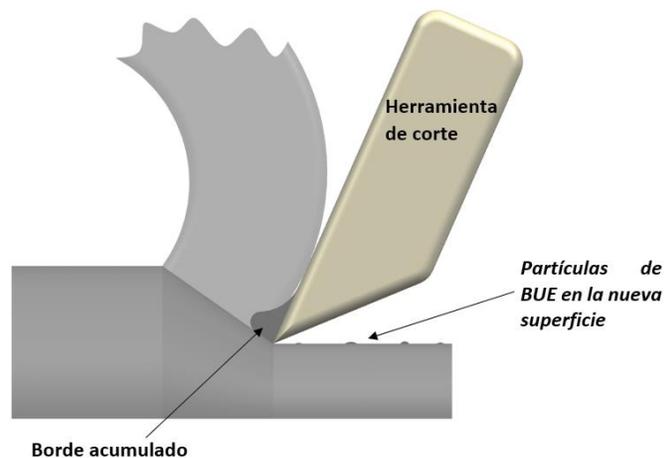


Figura 1.5 Viruta con Borde Acumulado.

Viruta Dentada o Escalonada: Se presenta en materiales de baja maquinabilidad, en algunas aleaciones de Titanio, en súper aleaciones de Níquel y en algunos aceros inoxidable austeníticos. En ocasiones este tipo de virutas también se forma cuando se maquinan metales comunes (Aceros) a altas velocidades.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Las virutas segmentadas son virutas semi-continuas con grandes zonas de deformación cortante baja y pequeñas áreas de gran esfuerzo cortante. Las virutas tienen aspecto de dientes de sierra [2], (Figura 1.6.).

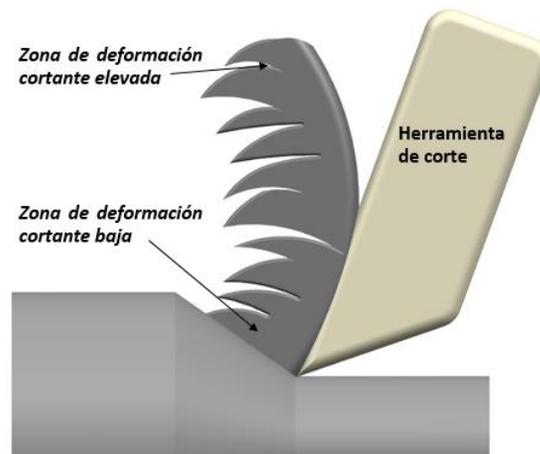


Figura 1.6 Viruta dentada o segmentada.

1.3.2 Herramienta de corte

Un elemento importante para llevar a cabo un proceso de maquinado es la herramienta de corte; estas existen de diferentes configuraciones geométricas, de una gran variedad de formas y de distintos materiales (siempre de mayor dureza que la pieza de trabajo) cada una para realizar una operación específica de maquinado.

La correcta selección del material de la herramienta de corte resulta en un maquinado correcto de la pieza de trabajo, esto se traduce a soportar altas fuerzas de corte, grandes esfuerzos y cambios constantes de temperatura, esto sin generar altas vibraciones o sufrir un desgaste considerable. A pesar de todo lo anterior la elección de los materiales para herramientas es muy compleja ya que deben de cumplir con ciertas propiedades que favorezcan en todo momento la operación [8].

La mayoría de los fabricantes de herramientas de corte, con base en investigaciones previas y continuas, ofrecen recomendaciones generales para realizar una buena elección sobre la herramienta para cada proceso. La recomendación principal se refiere a la geometría y esta la determina la operación del maquinado (pueden existir distintas configuraciones geométrías para una misma operación), [9].

Durante el siglo XX y en la actualidad, el estudio de materiales para herramientas de corte y las nuevas tecnologías han permitido la creación de materiales y aleaciones con excelentes propiedades, dejando muy por detrás a los aceros HSS. Los materiales que destacan son:

- Aleaciones de fundición de cobalto
- Carburos cementados
 - Carburo de tungsteno

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- Carburo de cromo
- Carburo de titanio
- Herramientas con recubrimientos
 - Nitruro de titanio
 - Carbonitruro de titanio
 - Oxido de aluminio
 - Multifásicos (dos o más capas de recubrimiento)
- Cerámicos base alúmina
 - Cermets
- Nitruro de boro cúbico
- Cerámicos con base en nitruro de silicio
- Diamante

Las propiedades esenciales con las que cuenta la herramienta de corte son:

- Dureza en caliente
- Tenacidad y resistencia al impacto
- Resistencia al choque térmico
- Estabilidad química

Si no se cuenta con las propiedades mencionadas o si la herramienta es de un material frágil y sufre un impacto que sobrepase sus propiedades, sufrirá una falla. Existen tres posibles fallas en una herramienta de corte.

1. Falla por fractura: Fuerza de corte excesiva en el filo de la herramienta, causando falla por fractura.
2. Falla por temperatura: La temperatura en la zona de corte sobrepasa la temperatura de fusión del material de la herramienta y se presenta ablandamiento en el filo (pérdida de filo) y deformación plástica.
3. Desgaste gradual: Deforma el filo de la herramienta a causa del desgaste.

Los mecanismos de desgaste en herramientas de corte se pueden clasificar en cuatro categorías:

- Desgaste abrasivo
- Adhesión
- Deformación plástica
- Difusión

El ingeniero Frederick Taylor [10] además de descubrir los aceros HSS, también trabajó en un modelo matemático para determinar la vida útil de las herramientas de corte la cual está relacionada con los mecanismos de desgaste y a los parámetros de corte, además existe una relación entre el desgaste y el tiempo de uso de la herramienta (*Figura 1.7*).

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

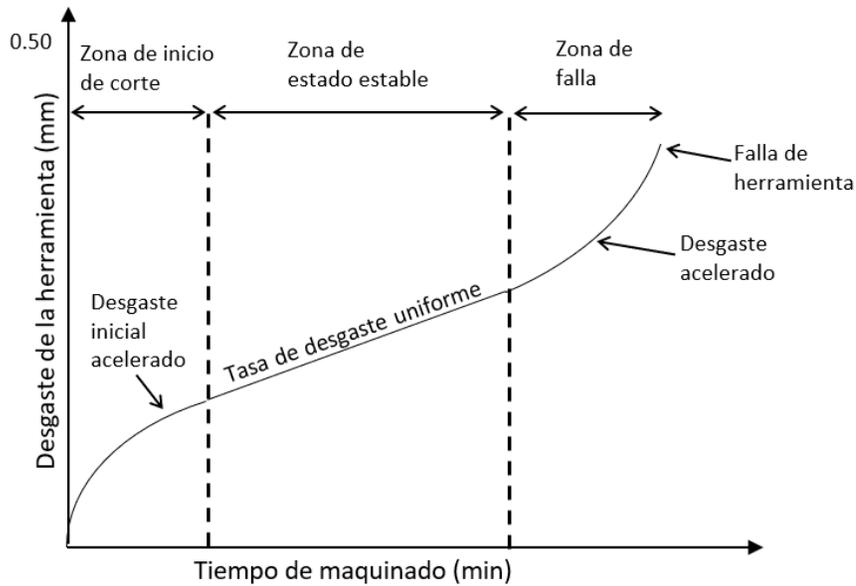


Figura 1.7 Desgaste en función del tiempo en herramientas de corte.

La vida útil de la herramienta es el tiempo que puede trabajar la herramienta sin presentar problemas o fallas considerables en el corte. Existe también lo que se conoce como desgaste de flanco de la herramienta, que es el desgaste que sufre la cara o superficie de incidencia de la herramienta, por lo general este desgaste se atribuye a las fuerzas de fricción que se presentan entre la herramienta y el material de trabajo. En la *Figura 1.8* se ejemplifican algunos valores hipotéticos para un criterio de vida de 0.50 mm donde se aprecia el desgaste de la herramienta para distintas velocidades de corte. El desgaste de la herramienta es gradual y por tanto la vida útil de la herramienta termina cuando el desgaste de la herramienta impide realizar de manera eficiente la operación del maquinado o en su defecto si existe una falla por un impacto considerable (fractura de la herramienta).

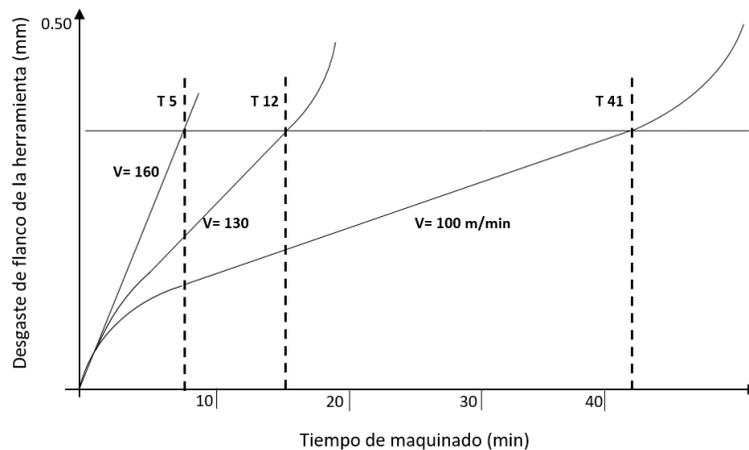


Figura 1.8 Efecto de la velocidad de corte en el desgaste de flanco de la herramienta de corte.

Taylor utilizó los valores de la gráfica del efecto de la velocidad de corte en el desgaste de flanco de la herramienta, de tal manera que trazando una curva logarítmica de la *Figura 1.8* (log-log), se puede obtener una gráfica que relacione la velocidad de corte contra vida de la herramienta.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

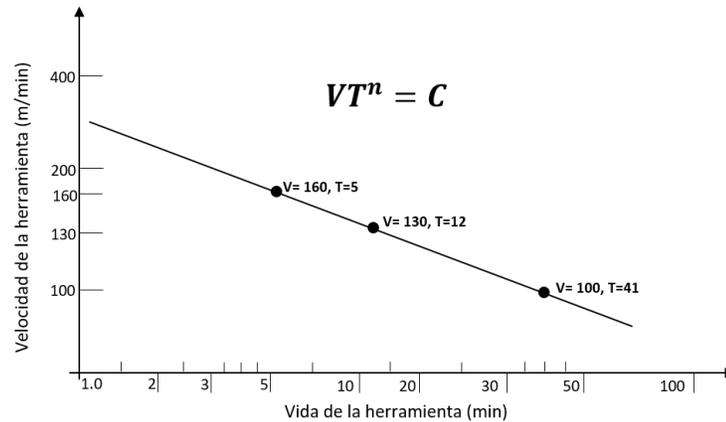


Figura 1.9 Velocidad de corte contra vida de la herramienta, en escala logarítmica.

En la gráfica de la *Figura 1.9*, se observa una relación lineal que se puede expresar en forma de ecuación, la cual es conocida con el nombre de *ecuación de Taylor para la vida de la herramienta*, (*Ecuación 1.1*).

$$VT^n = C \quad [1.1]$$

Donde V es la velocidad de corte (m/min), T es el tiempo de vida de la herramienta (min), n es un exponente que depende directamente del material de la herramienta, de la pieza de trabajo, de los parámetros de corte y de las condiciones del maquinado. Existen tablas para conocer rangos para el valor de n , los cuales dependen del material de la herramienta. C , al igual que n , son constantes que se obtienen de manera experimental, por lo tanto, para cada condición de corte estos valores son únicos.

Un punto importante de esta ecuación es que cuando se utilizan velocidades altas de corte, la vida de la herramienta será corta. Por lo tanto, también se puede decir que mientras más pequeño es el valor de n para un valor constante de C , el tiempo de vida de la herramienta será menor.

La ecuación de Taylor también se puede relacionar con los parámetros de corte, por ejemplo, para el caso de torneado el parámetro principal es la velocidad de corte, pero la velocidad de avance de corte V_f , avance " f " y la profundidad de corte " t_0 " son parámetros que también influyen en la vida de la herramienta, de tal manera y tomando esto en cuenta, la ecuación de Taylor se puede reescribir como:

$$VT^n t_0^a f^b = C \quad [1.2]$$

Esta nueva ecuación (*Ecuación 1.2*), involucra la velocidad de avance y la profundidad de corte y dos nuevos exponentes a y b , que al igual que n y C , se obtienen de manera experimental, por lo tanto, esta ecuación tiene ciertas dificultades, debido a que se deben de realizar una gran cantidad de experimentos para determinar estos valores. También es común relacionar la dureza del material de la pieza de trabajo a esta ecuación, pero se deben tomar otros aspectos en cuenta [10].

1.3.3 Temperatura durante el proceso de corte

La temperatura en la zona de corte es una limitante para los procesos de arranque de viruta debido a los efectos que provoca en el material de trabajo, en la herramienta y en las fuerzas de corte; Si

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

bien en estos procesos de mecanizado existen zonas de deformación, también existen zonas de generación de calor. Se estima que casi el 95% de la energía requerida para el proceso se convierte en calor, la cual es el causante del incremento considerable de la temperatura en la zona de corte.

El calor que se genera en el proceso se localiza en tres zonas (*Figura 1.10.*)

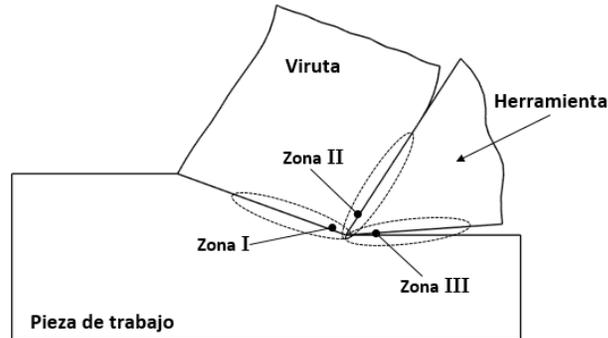


Figura 1.10 Zonas de generación de calor en la formación de viruta.

Zona I: Zona de deformación plástica primaria generada por el corte.

Zona II: Zona de deformación plástica secundaria que es generada por la fricción entre la herramienta y la viruta. En esta zona se genera un incremento gradual de la temperatura, la cual afecta directamente a la herramienta de corte. Se estima que aproximadamente el 80% de la temperatura se almacena en la viruta, mientras que el otro 20% se queda en la herramienta sin tomar en cuenta un fluido de corte refrigerante [11].

Zona III: Zona de deformación plástica secundaria generada por la fricción entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo.

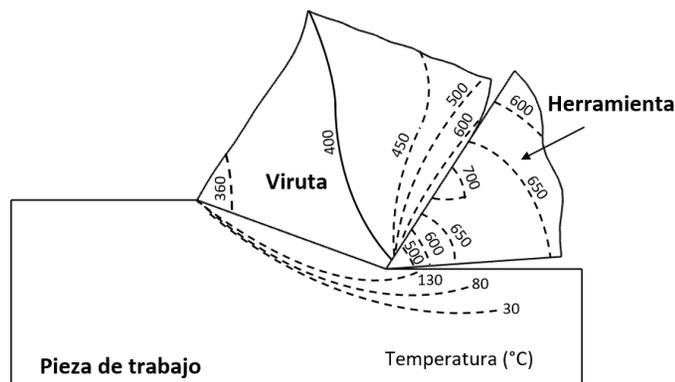


Figura 1.11 Distribución de gradientes de temperatura en zona de corte.

Los principales efectos que tiene la temperatura en el proceso de arranque de viruta son los siguientes:

- Alteración en las propiedades mecánicas del material de la herramienta de corte como son la disminución de la resistencia y la dureza, lo que provoca el desgaste acelerado en la herramienta de corte.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- Alteración en las propiedades mecánicas del material de la pieza de trabajo debido a cambios micro-estructurales por efectos térmicos.
- Imprecisión en las tolerancias dimensionales en maquinado de la pieza de trabajo, debido a la dilatación del material provocada por las altas temperaturas [12].

Existe un método fotográfico de luz infrarroja usado por Boothroyd [2] para observar la distribución de los gradientes de temperatura. En la *Figura 1.11* se observa como las máximas temperaturas se generan en la parte superior de la zona secundaria, Zona II, en la superficie de contacto entre herramienta y viruta, mientras que las temperaturas más bajas se presentan en la pieza de trabajo [13].

Uno de los métodos para la estimación de la temperatura máxima en la zona de corte, es el descrito por Coock [7], quien a partir de datos experimentales de distintos tipos de materiales de trabajo y de análisis dimensionales, desarrolló una ecuación que predice la elevación de la temperatura en la zona de trabajo (*Ecuación 1.3*).

$$\Delta T = \frac{0.4U}{\rho C} \left(\frac{Vt_0}{K} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [1.3]$$

Siendo ΔT el aumento de la temperatura, U la energía específica o potencia unitaria “Pu”, V la velocidad de corte, t_0 espesor de la viruta antes del corte, ρC el calor específico volumétrico y K la difusividad térmica del material de trabajo [7].

1.3.4 Fluidos de corte

Con el fin de mejorar la calidad del maquinado y optimizar el proceso, se utiliza un fluido que esté en contacto con el área de corte conocido como fluido de corte [14]. El fluido de corte puede ser un lubricante, un refrigerante o ambos, esto lo determina la operación de maquinado, los materiales de la herramienta de corte y el material de la pieza de trabajo, los parámetros de corte y la forma del método de aplicación.

- **Refrigeración:** Reduce la temperatura de corte y la distorsión térmica de la pieza de trabajo, ayudando a la conservación de la vida de la herramienta. La capacidad que tiene el fluido para reducir la temperatura depende directamente de sus propiedades térmicas, siendo las principales, el calor específico y la conductividad térmica; El agua cuenta con buenas propiedades térmicas y es por esto que es comúnmente utilizado como base de fluidos refrigerantes. Generalmente los fluidos del tipo refrigerante son más efectivos en maquinados de altas velocidades.
- **Lubricación:** Reduce las fuerzas de fricción que se generan en la superficie herramienta-viruta, mejorando con esto la vida de la herramienta, así como el acabado superficial de la pieza de trabajo. Estos fluidos están compuestos principalmente por aceite. Su efectividad se relaciona con maquinados a bajas velocidades debido a que a altas velocidades el fluido no entra en contacto en el espacio entre viruta y herramienta.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Otros beneficios que brindan los fluidos de corte, es que ayudan al desahogo de la viruta que interfiere el proceso (principalmente en el maquinado de roscas internas y de barrenos ciegos). El uso de los fluidos de corte también ayuda a la disminución de la potencia del proceso (consumo de energía) y finalmente, los residuos del fluido de corte sobre la superficie de la pieza de trabajo ayudan a combatir la corrosión atmosférica.

Los fluidos de corte están clasificados en cuatro tipos:

1. Aceites
 - Aceites puros: Están derivados del petróleo, de origen animal o vegetal. Son utilizados para maquinados donde la temperatura de corte no es significativa debido a que tienen buenas propiedades de lubricación, pero malas propiedades de refrigerante.
2. Emulsiones
 - Aceites solubles: Son mezclas de aceite y aditivos y una base de agua. Se utiliza para maquinados de altas velocidades, donde la temperatura de corte es considerable. La presencia de aceite ayuda a combatir la tendencia a la oxidación que genera el agua.
3. Semi-sintéticos
 - Semi-químicos: Son emulsiones químicas con poco contenido de aceite diluido en agua.
4. Sintéticos
 - Químicos: Sustancias químicas con aditivos (por ejemplo, parafinas cloradas, nitritos, fenoles, formoles etc.) diluidos en agua con limitada presencia de aceites.

Existen una gran variedad de métodos para la aplicación de un fluido de corte; El método generalmente lo determina las condiciones de trabajo, la máquina-herramienta y la operación de maquinado.

Los métodos de aplicación son:

- Inundación: Grandes volúmenes de fluido que cubren en su totalidad y en todo momento el área de corte. Generalmente este tipo de método tiene un filtro y un sistema de recirculación del fluido.
- Nebulizado o Niebla: Este método utiliza principalmente fluidos a base de agua. Se aplica el fluido en forma de niebla o brisa a alta velocidad por medio de aire presurizado de tal manera que se puede aplicar en áreas inaccesibles y facilita la visibilidad de la operación.
- Alta presión: Chorro de fluido a altas velocidades dirigidos a la zona de corte, particularmente a la cara de alivio de la herramienta. En algunas ocasiones el chorro de fluido a alta presión funciona como mecanismo de rompe-virutas.
- Manual: Se utiliza principalmente en operaciones de bajas velocidades de maquinado, su aplicación es a través de una aceitera o una brocha.
- Mecanismos de la herramienta de corte: Existen herramientas muy sofisticadas que cuentan con ductos en la misma herramienta o en el porta-herramientas los cuales suministran el fluido a alta presión sobre zonas localizadas y específicas [15].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

1.4 Torno y operación de torneado

Existen una gran variedad de máquinas-herramienta para operaciones de torneado, estas se pueden clasificar por su capacidad, su tamaño o sus complementos, así como su función; también existen los que son controlados por centro de cómputo, llamados por sus siglas torno CNC (Control Numérico Computarizado).

Actualmente gracias a los avances tecnológicos, las máquinas de CNC están en total apogeo en la industria de la manufactura, y cada vez están sustituyendo a las máquinas convencionales por su alta versatilidad. En el caso específico de un torno CNC, este es capaz de realizar operaciones más complejas con altos grados de precisión y excelentes acabados superficiales.

La mayoría de los tornos convencionales trabajan con un motor eléctrico y un sistema de bandas y poleas como transmisión de potencia. Su función es mecánica y es una maquina muy versátil y se opera de forma manual. Los principales componentes de un torno convencional se observan en la *Figura 1.12*, [16].

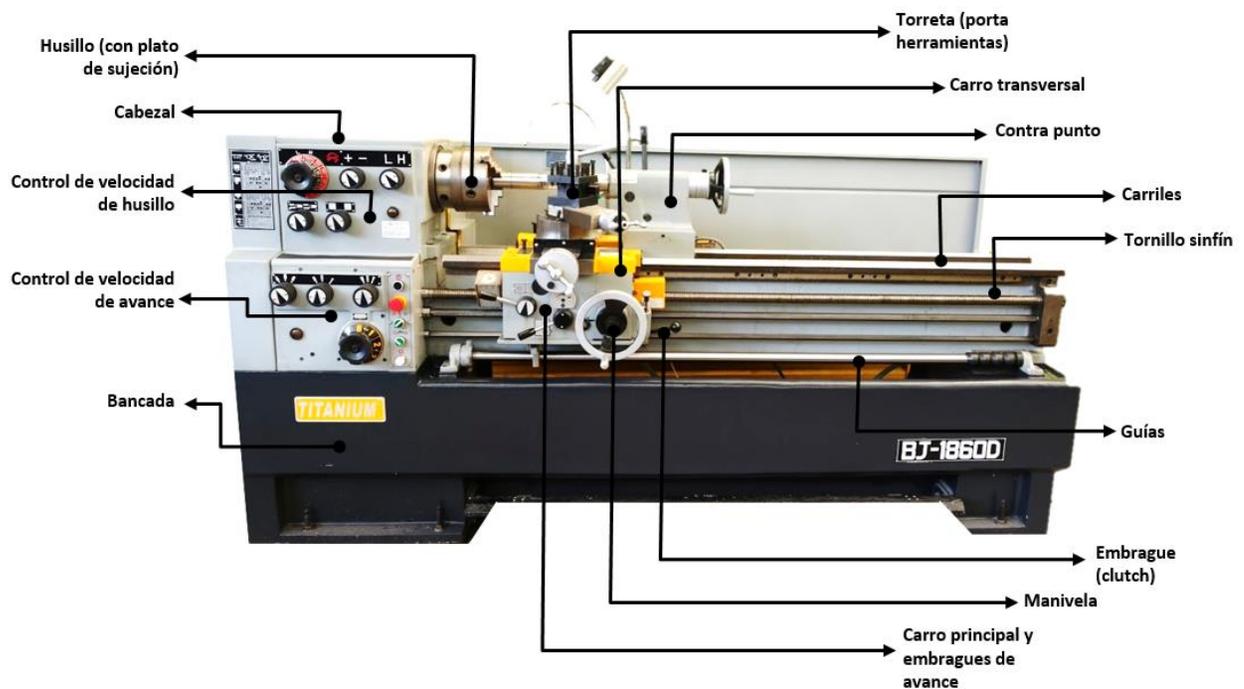


Figura 1.12 Vista general de torno convencional (TITANIUM BJ-1860D).

Bancada: es la base de la máquina, sobre ésta se encuentran casi todos los componentes del torno.

Cabezal: Se encuentra fijo a la bancada y es el componente encargado de contener el sistema de transmisión de potencia hacia el husillo.

Torreta: Sirve para montar las herramientas de corte, la torreta está fija al carro auxiliar, pero puede rotar sobre su eje, para ajustar el ángulo de corte.

Carro: Los carros se deslizan a través de los carriles o bancada y guías para garantizar la precisión del desplazamiento, el carro principal desplaza al carro transversal a lo largo de la bancada paralela

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

al eje de rotación, el carro transversal es el encargado de trasladar la torreta de manera radial al eje de rotación. Los carros se pueden desplazar de manera manual por medio de manivelas o de manera automático por medio de un tornillo sinfín el cual tiene una velocidad de giro variable que se ajusta por medio de un sistema de engranes para obtener la velocidad de avance deseado.

Contra punto: Se encuentra opuesto al cabezal y tiene la libertad de desplazarse sobre el carril o bancada longitudinal, al contra punto se le coloca una herramienta de centro el cual puede ser fijo o giratorio con el fin de sostener el extremo de la herramienta de corte.

Dispositivos de sujeción: Estos dispositivos tienen una gran importancia, ya que son los que se encargan de sujetar firmemente la pieza de trabajo. Existen varios métodos con diferentes mecanismos para realizar la sujeción:

1. Plato de sujeción: es el dispositivo más común el cual es equipado con tres o cuatro mordazas para la sujeción de las piezas.
2. Plato de sujeción hidráulica: utiliza boquillas según el diámetro del material de trabajo.
3. Entre centros: se coloca la pieza entre dos centros; uno que se encuentra en el cabezal y el otro en el contrapunto.
4. Boquillas para torno: Casquillo cónico seccionado longitudinalmente, en él se introduce la pieza de trabajo y posteriormente se comprimen las secciones de la boquilla para la sujeción [6].

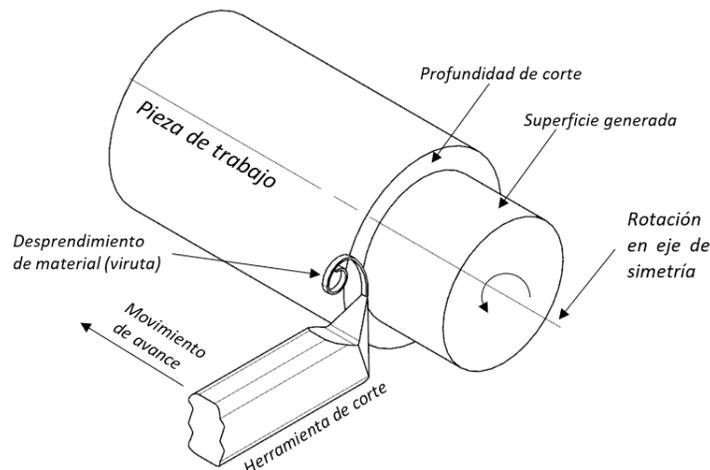


Figura 1.13 Proceso de torneado.

La operación de torneado dado al nombre de la máquina herramienta, tiene como característica principal que una herramienta de corte fija a una base que tiene un movimiento de avance, remueve material de una pieza de trabajo que se encuentra en rotación en un eje de simetría (Figura 1.13). Las geometrías que se pueden generar son esencialmente rotacionales (Discos, cilindros, conos etc.). Existen otras operaciones de torneado que dependen directamente de los parámetros de corte y la herramienta [7].

Generalmente en una operación de torneado, antes de llegar a la geometría final de la pieza de trabajo, ésta debe pasar por varias etapas de remoción de material, a estas etapas se le conoce como estado de superficie transitoria. La cantidad de etapas está relacionada con la maquinabilidad del

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

material, las condiciones del filo de la herramienta, la profundidad de penetración de la herramienta y la calidad del maquinado (desbaste o acabado).

1.4.1 Parámetros

Los parámetros de corte que se presentan en una operación de torneado son:

- *Propiedades mecánicas del material de trabajo*: Existen varias propiedades del material que influyen en una operación de torneado, estas dependen del tipo de material (metales ferrosos y no ferrosos, polímeros, materiales que se pueden someter a un proceso por arranque de viruta); las propiedades más significativas para este proceso son dureza, módulo de elasticidad y módulo al corte.
- *Geometría de la pieza de trabajo y geometría final*: Dependiendo la geometría final de la pieza es el tipo de operación que se tiene que realizar.
- l = Longitud de corte (mm) o (in).
- D_0 = Diámetro inicial de la pieza de trabajo (mm) o (in).
- D_f = Diámetro final de la pieza de trabajo (mm) o (in).
- N = Velocidad rotacional de la pieza de trabajo (RPM).
- f = Avance (mm) o (in).
- V_f = Velocidad de avance (mm/min) o (in/min): Es la velocidad lineal con la que se desplazara la herramienta de corte a lo largo de la pieza de trabajo.
- t_0 = Profundidad de corte o inserción de la herramienta en el material de trabajo (mm) o (in): Es la diferencia entre el D_0 y D_f diámetro inicial y final respectivamente de la pieza de trabajo.
- *Geometría de la herramienta*: Existen distintas geometrías en las herramientas de corte, estas dependen de la operación o del fabricante.
- *Material de herramienta de corte*: Generalmente el material siempre es de mayor dureza que la pieza de trabajo.
- *Ángulo de incidencia de la herramienta*: Es el ángulo entre el filo de la herramienta y eje de rotación.

1.4.2 Relación empírica de parámetros para torneado

Las relaciones principales que se ocupan en un proceso de torneado son:

- V_c = Velocidad superficial de la pieza de trabajo:

$$V_c = \pi dN \quad [1.4]$$

- ω = Velocidad del husillo (rad/min):

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

$$\omega = 2\pi N \quad [1.5]$$

- D_{prom} = Diámetro promedio:

$$D_{prom} = \frac{D_0 + D_f}{2} \quad [1.6]$$

- t_0 = Profundidad de corte:

$$t_0 = \frac{D_0 - D_f}{2} \quad [1.7]$$

- T_m = tiempo de maquinado [s o min]:

$$T_m = \frac{l}{fN} \quad [1.8]$$

- RMR = Removal Material Rate (Velocidad de material removido o también conocido como Tasa de remoción de material) (mm^3/min) o (in^3/min):

$$RMR = V_c t_0 f \quad [1.9]$$

- Potencia de corte (Nm/s), donde P_u es la potencia unitaria o energía específica del material en (Nm/mm^3)

$$P_c = (P_u)(RMR) \quad [1.10]$$

- Fuerza de corte (N)

$$F_c = \frac{P_c}{V_c} \quad [1.11]$$

- Torque (N – m) o (lb – pies):

$$\text{Torque} = \frac{F_c * D_{prom}}{2} \quad [1.12]$$

- Potencia = (KW) o (hp):

$$\text{Potencia} = (\text{Torque})(\omega) \quad [1.13]$$

Las unidades mostradas son las que se utilizan comúnmente.

1.4.3 Operaciones de torneado

Existen una amplia variedad de geometrías que se pueden realizar en un torno, por lo tanto, existen operaciones específicas para generar cada geometría. Generalmente es necesario realizar más de una de estas operaciones para llegar a la geometría final (*Figura 1.14*).

- a) **Torneado o cilindrado:** Produce piezas rectas cilíndricas o cónicas, se pueden generar ranuras. Con esta operación se realiza desbaste o acabado a lo largo de la pieza de trabajo.
- b) **Refrentado (Careado):** Genera una superficie plana en la cara de la pieza de trabajo. Sirve también para reducir la longitud de la pieza de trabajo.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- c) **Corte con herramienta de forma:** Para generar distintas geometrías con simetría axial para distintos usos. Para realizar esta operación se necesita una herramienta de corte especial con la forma de la geometría que se pretende.
- d) **Taladrado:** Para generar barrenos en la dirección del eje de rotación. Las brocas dependen de la medida a la que se pretende llegar. También se usa para barrenar centros guía, que ayudan a centrar la pieza con un contrapunto.
- e) **Mandrinado:** Agrandar cavidades cilíndricas después de una operación de taladrado. Se pueden generar ranuras internas circulares.
- f) **Corte o Tronzado:** Para remover partes de la pieza de trabajo. Generalmente se usa para separar la pieza en bruto (material sin maquinar) de la pieza ya maquinada.
- g) **Roscado:** Genera roscas externas e internas.
- h) **Moleteado:** Genera rugosidad en la superficie de trabajo de forma homogénea. Se ocupa generalmente para la fabricación de elementos que requieren abrasión para su manejo.

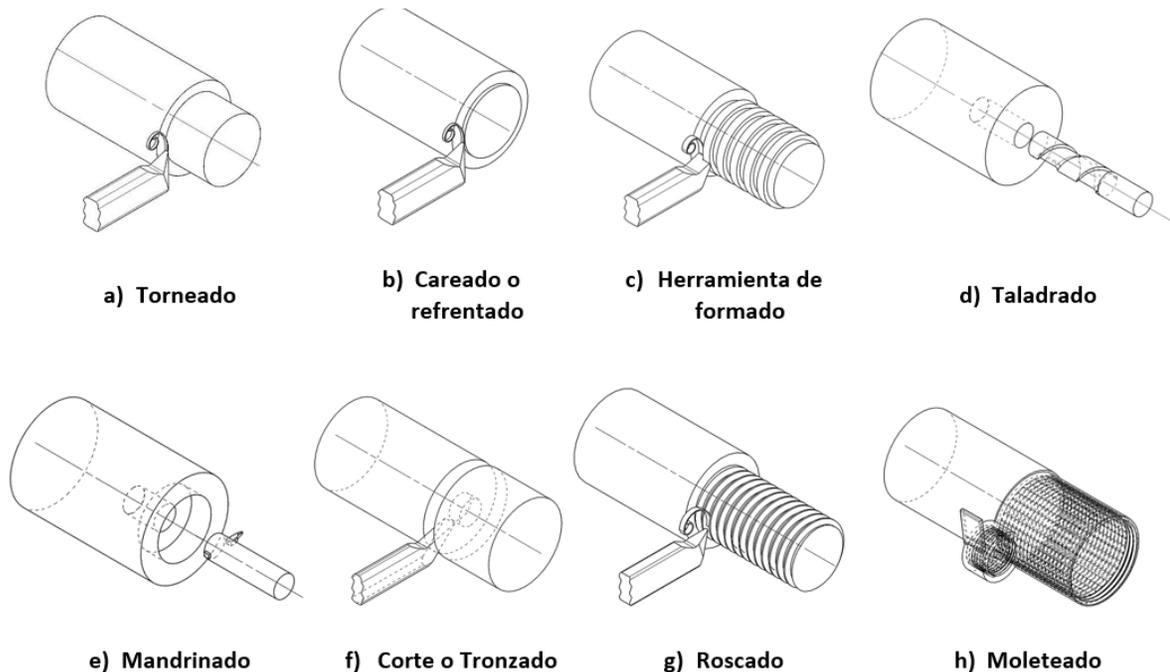


Figura 1.14 Operaciones de torneado.

1.5 Fuerzas de corte involucradas en operaciones de torneado

Durante un proceso de torneado para piezas cilíndricas la fuerza de corte que se genera, se puede descomponer en tres fuerzas (Figura 1.15).

$$\mathbf{F} = F_c + F_r + F_t \quad [1.14]$$

De acuerdo con la Ecuación 1.14 la fuerza de corte \mathbf{F} que se genera en una operación de torneado, se divide en tres fuerzas: F_c , fuerza de corte tangencial, esta fuerza generalmente es vertical; F_r , fuerza radial que se genera debido a la penetración del filo de la herramienta en la pieza de trabajo, esta fuerza depende del ángulo de penetración, del filo o desgaste de la herramienta, y del tipo de material o recubrimiento de la herramienta; F_t , fuerza de desplazamiento longitudinal o fuerza de

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

avance, esta fuerza se produce debido al movimiento de la herramienta a lo largo del material de trabajo, depende de la velocidad de avance V_t y de la dirección del movimiento [17].

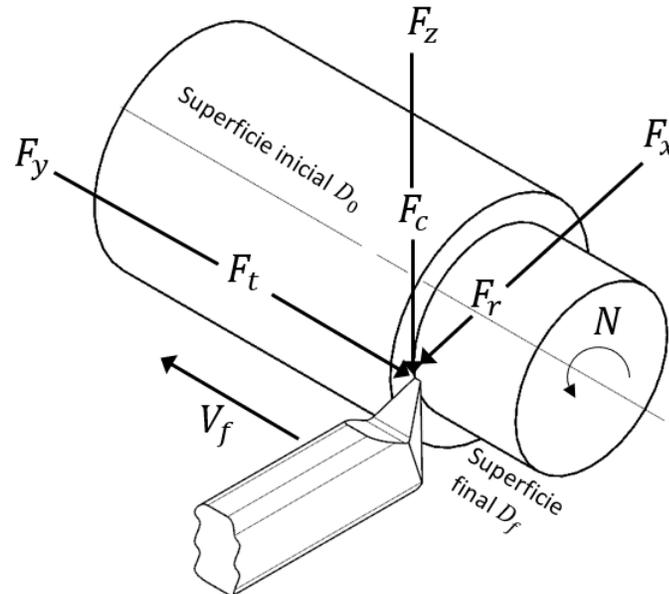


Figura 1.15 Fuerza presentes durante el torneado.

La interacción entre la herramienta, la viruta y la pieza, se traduce en una serie de presiones sobre la superficie de la herramienta. Este sistema de fuerzas y presiones se puede reducir a una fuerza resultante \mathbf{F} [3].

La fuerza resultante \mathbf{F} en la operación de torneado, actúa en un plano que es perpendicular al filo de la herramienta. Esta fuerza se determina de forma experimental a partir de la medición de las fuerzas ortogonales, usualmente se utilizan equipos de medición como dinamómetros [18].

Estas fuerzas son de suma importancia en el maquinado, ya que generan un efecto considerable en la herramienta de corte y en la pieza de trabajo sobre todo si se requiere realizar maquinados con alta precisión. Un mal control de las fuerzas es causado por una mala selección de la máquina-herramienta que no genere la potencia necesaria para realizar la operación o que la herramienta de corte sufra deflexiones, vibraciones o movimientos significativos en la operación.

1.5.1 Modelo de corte ortogonal

En un proceso de maquinado se utiliza una herramienta de corte que tiene una forma tridimensional donde se presenta un corte **oblicuo**, pero para facilitar el entendimiento de las fuerzas de corte existe un modelo bidimensional llamado corte ortogonal.

Aun cuando el modelo de corte ortogonal sigue siendo tridimensional (*Figura 1.16-a*) el modo de su estudio se basa en la vista lateral donde es posible analizar la relación del grosor de la viruta (razón de corte) o la deformación cortante haciendo uso de las características del modelo como la profundidad de corte " t_0 ", espesor de la viruta " t_c ", y el ángulo de ataque " α ", pero este modelo también se puede utilizar para analizar fuerzas de corte. Aun cuando " w ", la sección transversal de

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

corte (ancho de corte) del modelo tridimensional no es importante en el análisis de corte ortogonal, se puede calcular la fuerza de corte específica y es la razón de la fuerza de corte tangencial F_c al producto de la sección transversal “ w ”, por la profundidad del corte “ t_0 ” [2].

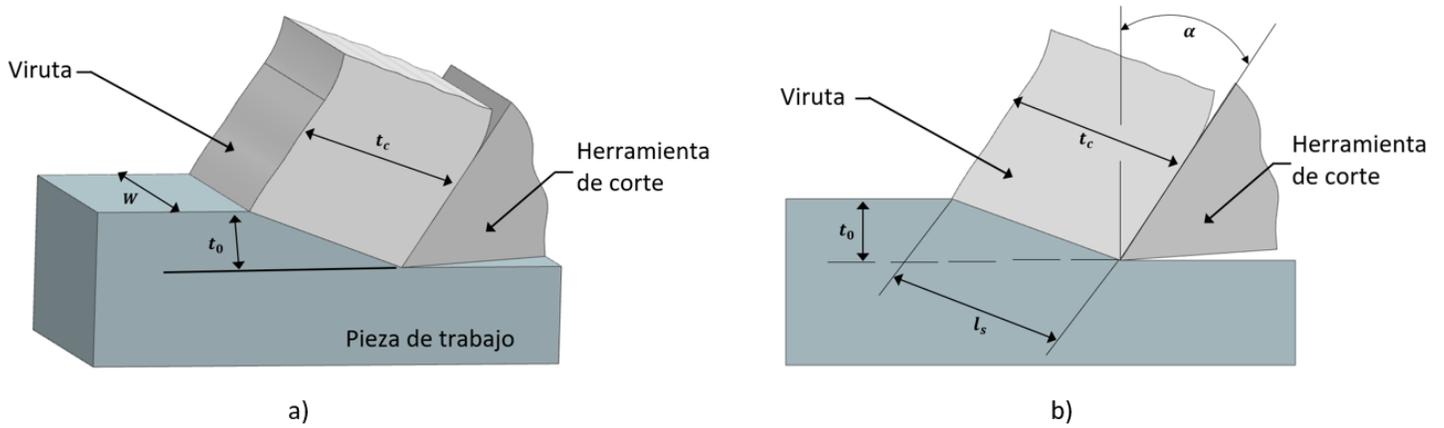


Figura 1.16 a) Modelo de corte ortogonal visto en isométrico (tridimensional); b) Vista lateral (bidimensional).

Para analizar las fuerzas de corte con el uso del modelo ortogonal, el borde del filo de la herramienta debe ser perpendicular a la dirección de la velocidad de corte y por tanto la fuerza de corte “ F_c ”, actúa en la dirección del movimiento principal.

La fuerza de avance “ F_t ”, actúa de manera normal a la fuerza de corte “ F_c ”; entre la fuerza de avance y la de empuje se obtiene la resultante R'' (Figura 1.17-b).

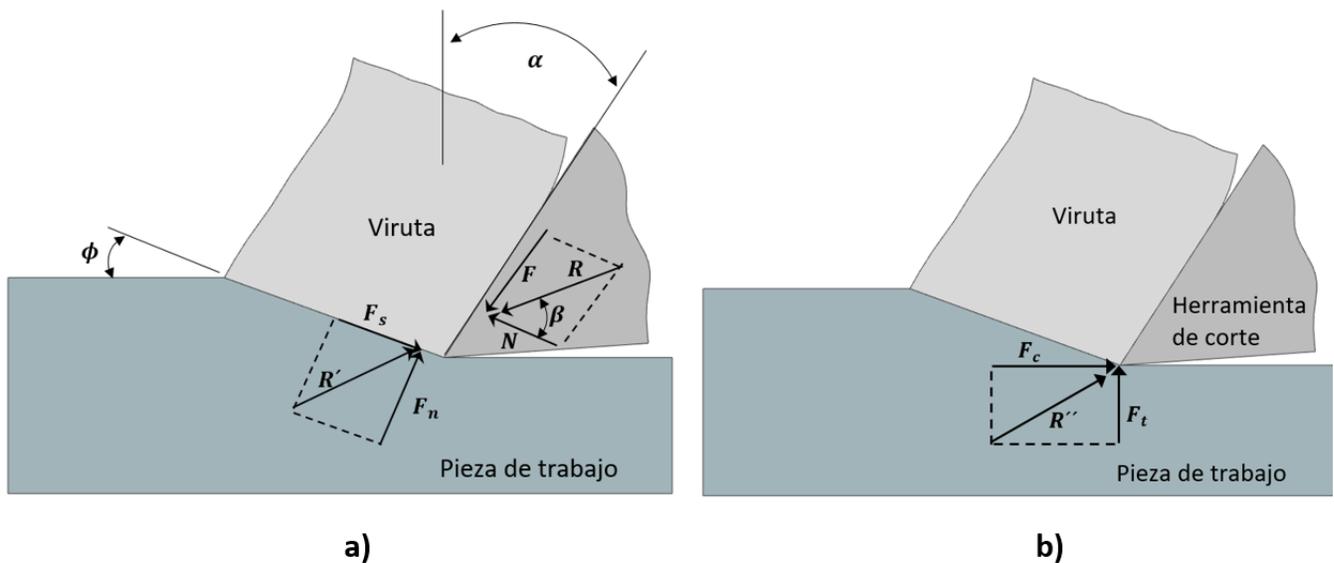


Figura 1.17 Fuerzas actuantes en la zona de corte.

Las fuerzas que genera la herramienta sobre la viruta también se pueden dividir en dos fuerzas que son mutuamente perpendiculares, que son la fuerza de fricción “ F ”, y la fuerza normal “ N ”; con estas dos fuerzas se obtiene una fuerza resultante R (Figura 1.17-a).

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Fuerza de fricción F : Se encuentra en la interfaz herramienta-viruta y es la fuerza que resiste el flujo de la viruta.

Fuerza Normal N : Fuerza que ofrece la herramienta de corte, actúa sobre la viruta, es perpendicular a la fuerza de fricción.

La fuerza de fricción “ F ” y la fuerza normal “ N ”, se pueden escribir en función del ángulo de fricción “ β ”, como:

$$F = R \operatorname{sen} \beta \quad [1.15]$$

$$N = R \operatorname{cos} \beta \quad [1.16]$$

Con estas fuerzas es posible definir el coeficiente de fricción “ μ ”, que es el que se encuentra presente entre la herramienta y la viruta, relacionado con el ángulo de fricción “ β ”, donde la magnitud del coeficiente de fricción se determina como:

$$\mu = \frac{F}{N}; \text{ o de forma vectorial } \mu = \frac{R \operatorname{sen} \beta}{R \operatorname{cos} \beta} = \tan \beta \quad [1.17]$$

Es importante notar que la fuerza resultante “ R' ”, está en equilibrio con otra resultante “ R ”; estas dos fuerzas tienen la misma magnitud, pero opuestas por el plano cortante ($R'=R$). La fuerza resultante “ R ”, es la que ejerce la pieza sobre la viruta y se puede descomponer en dos fuerzas; fuerza cortante “ F_s ” y fuerza normal al cortante “ F_n ” (Figura 1.17-a).

Fuerza cortante F_s : Es la fuerza que se presenta por la resistencia a la deformación que se presenta sobre el plano de corte entre la viruta y la pieza de trabajo.

Fuerza normal al cortante F_n : Es perpendicular a la fuerza cortante y se traduce como la resistencia que presenta la pieza de trabajo sobre la herramienta de corte y la viruta.

Con las fuerzas “ F_s ” y “ F_n ”, se puede obtener el esfuerzo cortante “ τ ”, el cual se presenta en el plano cortante. El esfuerzo cortante se define como el nivel de esfuerzo requerido para llevar a cabo las operaciones del maquinado.

$$\tau = \frac{F_c \operatorname{cos} \phi - F_s \operatorname{sin} \phi}{\frac{t_0 W}{\operatorname{sin} \phi}} \quad [1.18]$$

Estas fuerzas “ F ”, “ N ”, “ F_s ”, “ F_n ”; no pueden ser medidas directamente, debido a las variaciones de los ángulos de las herramientas y a los constantes cambios en las condiciones de corte; Por otro lado se puede instrumentar un dinamómetro que pueda medir la fuerza de corte “ F_c ” y la fuerza de avance “ F_t ”, y con eso relacionar las fuerzas que no se pueden medir para obtener sus magnitudes teóricas. Las relaciones entre las fuerzas son:

$$F = F_c \operatorname{sin} \alpha + F_t \operatorname{cos} \alpha \quad [1.19]$$

$$N = F_c \operatorname{cos} \alpha - F_t \operatorname{sin} \alpha \quad [1.20]$$

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad [1.21]$$

$$F_n = F_c \sin \phi - F_t \cos \phi \quad [1.22]$$

Existe un caso especial para el modelo de corte ortogonal y es cuando $\alpha = 0$, entonces las fuerzas se pueden escribir como $F = F_t$ y $N = F_c$ de tal manera que se pueden medir con la ayuda de un dinamómetro [12].

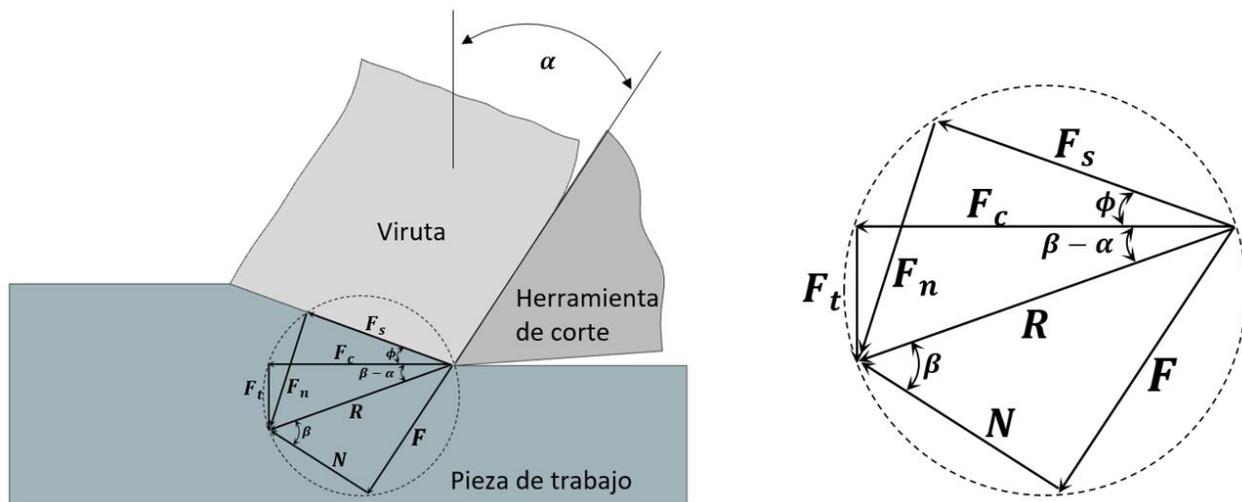


Figura 1.18 Círculo de fuerzas para determinar las distintas fuerzas que actúan en la zona de corte.

El ingeniero Eugene Merchant se dedicó al estudio del modelo del corte ortogonal y propuso un círculo de fuerzas (Figura 1.18) para deducir a partir de este modelo y del esfuerzo cortante, lo que se conoce como la **Ecuación de Merchant**, que es la relación matemática, entre el ángulo de ataque de la herramienta “ α ”, el ángulo de plano de corte “ ϕ ” y el ángulo de fricción “ β ” [19].

$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\beta}{2} \quad [1.23]$$

Esta ecuación se basa en muchas suposiciones, la principal es que la resistencia al corte de la pieza de trabajo es constante, traducido a que no tiene afectación por factores como la temperatura o la velocidad de corte ya que son constantes; por tanto, la ecuación de Merchant es solo una relación aproximada y no un modelo exacto, pero es útil para fines prácticos [11].

Capítulo 2. Fundamentos en la elaboración de roscas

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

2.1 Roscas

A través de la historia, la necesidad de realizar uniones entre elementos mecánicos ha sido uno de los problemas más comunes en las tareas cotidianas dentro y fuera de la ingeniería; esencialmente estas uniones deben cumplir con tareas específicas que brinden la seguridad de que la unión sea inmóvil. Existen elementos que requieren que la unión sea capaz de ensamblar y desensamblar sin que los elementos sufran daño alguno y es a partir de la creación de los elementos roscados y las máquinas herramientas capaces de generarlas, que estos elementos comienzan a tener un gran papel dentro de la ingeniería, ya que son de fácil manejo, se pueden generar una gran variedad de geometrías dependiendo del uso y existen diferentes técnicas para su elaboración.

Un elemento roscado se refiere a un componente cilíndrico o cónico generalmente metálico con relieve helicoidal y de acuerdo con la Real Academia de Ingeniería rosca es definida como, Configuración, de forma helicoidal, elaborada en un cuerpo que presenta una superficie de revolución, generalmente cilíndrica o cónica [20]. Mientras que en el libro *Manufactura, Ingeniería y Tecnología de Serope Kalpakjian y Steven R. Schmid* un elemento roscado o rosca se define como; protuberancia de sección transversal uniforme que sigue una trayectoria helicoidal o espiral en el exterior o interior de una superficie cilíndrica (rosca recta) o con un ahusamiento (rosca cónica) [2].

El objeto mecánico más representativo de los elementos roscados es el tornillo y se define como, Pieza cilíndrica o cónica, por lo general metálica, con resalte en hélice y cabeza apropiada para enroscarla [21].

Durante el siglo XVIII el tornillo fue evolucionando, y cada vez tuvo más aplicaciones, pero en la antigüedad no era común los sistemas estandarizados y las máquinas-herramientas aún no eran la base para su elaboración, esto provocó que gran cantidad de tornillos y tuercas existentes en ese momento eran cada uno distinto de otro, por lo que se puede decir que cada tornillo que se realizaba, era único y sin repuesto.

En 1946 se formó un comité de la Organización Internacional para la Estandarización (ISO, International Organization for Standardization) para establecer un solo sistema internacional de roscas de tornillo métricas [22].

Como bien se ha mencionado, los elementos roscados son muy importantes y tienen aplicación en muchos de los sistemas que requieran sujeción, es por esto que existe una gran cantidad de tipos de roscas y constantemente siguen surgiendo nuevos para distintas necesidades. Las roscas principales y más comunes actualmente son la rosca métrica que es la utilizada en el Sistema Internacional y, por otro lado, la rosca unificada estándar que es la que se utiliza comúnmente en Estados Unidos en el Sistema Inglés.

Actualmente cada rosca cuenta con cierta especificación que son las que define su tipo, estas especificaciones son muy importantes, ya que son esenciales para su fabricación, así como para el uso que se les puede dar, además de que conocer las especificaciones ayuda a que el tiempo de fabricación se acelere y se reduzcan costos. La estandarización de roscas facilitó la producción masiva de elementos roscados (tornillos y tuercas) [23].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

2.1.1 Elementos de la rosca

Los elementos generales que distinguen a la rosca se pueden observar en la *Figura 2.1*.

Filete o cuerda: Superficie prismática en forma de hélice.

Paso: Distancia ente dos crestas consecutivas, puede ser en milímetros (mm), para una rosca milimétrica o en hilos por pulgada (#h.p.p.), para roscas estándar.

Ángulo de rosca: Es el ángulo que se forma entre los flancos de la rosca. Principalmente las roscas triangulares son las que se definen de acuerdo con el ángulo.

Flanco: Superficie lateral del filete de la rosca que conecta la raíz con la cresta.

Raíz: También conocida como valle o base y es la superficie inferior de la rosca que une a los flancos adyacentes.

Cresta: Superficie superior de la cuerda que conecta los flancos.

Diámetro mayor: Diámetro máximo de la rosca, también conocido como diámetro de cresta; dependiendo del perfil, el paso y del ajuste de la rosca, existen fórmulas que determinan el valor de este diámetro.

Diámetro menor: Diámetro mínimo de la rosca también conocido como diámetro de raíz.

Diámetro de paso: Diámetro de flancos, se encuentra aproximadamente en el punto medio del diámetro mayor y el menor [25].

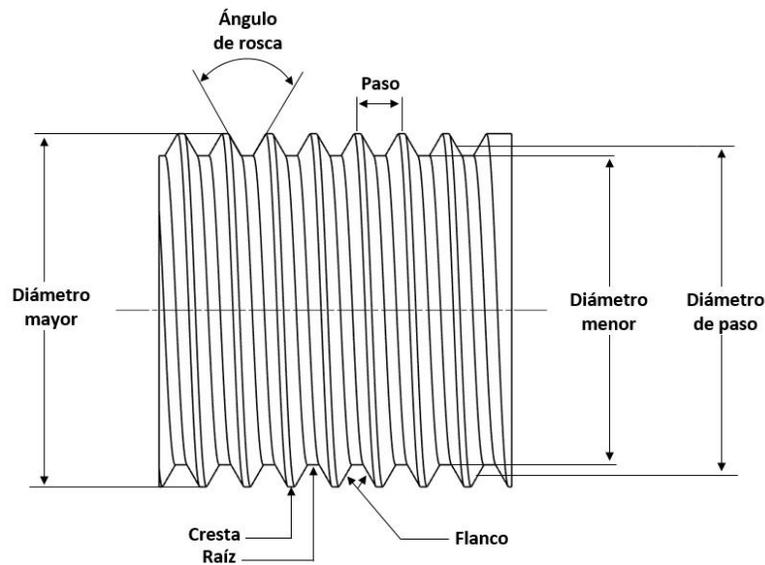


Figura 2.1 Definición de elementos de una rosca.

La nomenclatura que se utiliza para definir una rosca se puede observar en la *Figura 2.2* y se describe en la *Tabla 2.1*.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Tabla 2.1 Nomenclatura de las dimensiones de una rosca [14]

P	Paso
α	Ángulo de perfil del filete
d_2	Diámetro de paso del tornillo
d	Diámetro mayor de la rosca del tornillo
d_1	Diámetro menor de la rosca del tornillo
D_2	Diámetro de paso de la tuerca
D	Diámetro mayor de la rosca de la tuerca
D_1	Diámetro menor de la rosca de la tuerca
H	Altura del perfil teórico en la punta
H_3	Profundidad de la rosca
H_1	Profundidad portante
$H/6$	Corte de raíz
$H/4$	Corte de cresta
$H/2$	Addendum (parte superior) y dedendum (parte inferior)
R	Radio de trincaduras

Las letras que simbolizan la nomenclatura de los elementos roscados pueden variar de acuerdo con la bibliografía consultada.

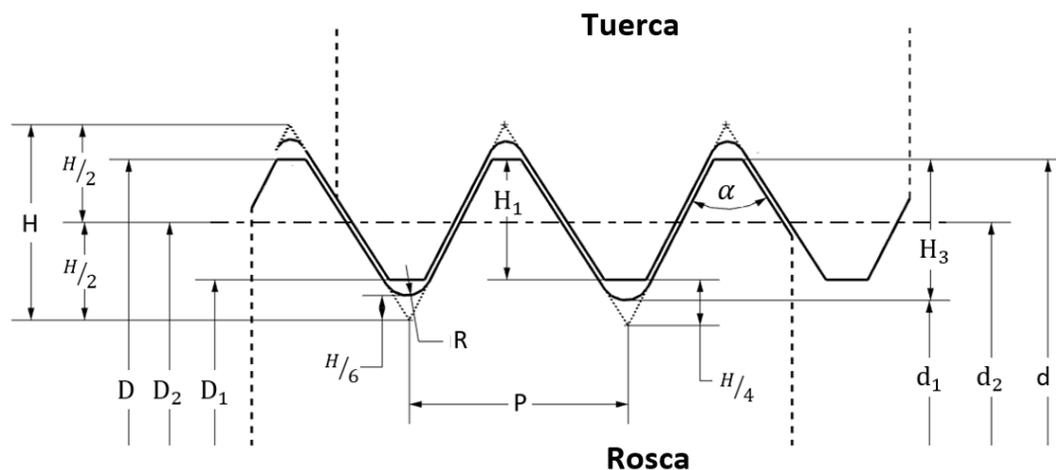


Figura 2.2 Nomenclatura de una rosca “perfiles de rosca interna y externa ISO métrica”.

2.1.2 Clasificación de las roscas

Las roscas se pueden clasificar de acuerdo con su posición, forma, tipo, número de entradas y sentido de giro.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

1. Según la posición de la rosca (*Figura 2.3*).

Rosca externa: Se genera la rosca sobre un cilindro exterior, el elemento más común de una rosca externa es el tornillo.

Rosca interna: Se genera la rosca sobre un cilindro interior, el elemento más común de una rosca interna es la tuerca.

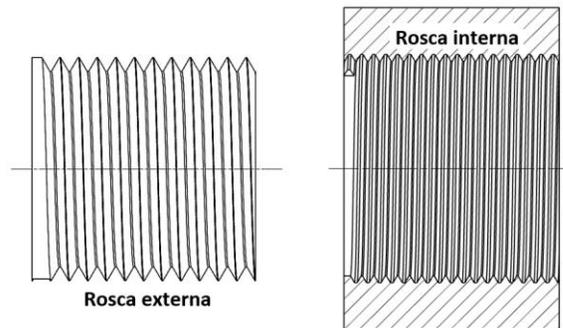


Figura 2.3 Clasificación de las roscas según su posición.

2. Según la forma del filete.

La clasificación de la rosca según la forma depende de la geometría de esta. Existen formas triangulares, cuadradas, trapeciales y circulares.

3. Según el sentido de la hélice.

Rosca derecha: La rosca derecha es la más común, y cuando es roscada gira a favor de las manecillas del reloj (*Figura 2.4*). Una rosca derecha se puede identificar cuando la rosca vista desde una posición horizontal, los filetes se observan inclinados hacia la izquierda. Las roscas derechas normalmente no se especifican, debido a que son las que se ocupan con más frecuencia.

Rosca izquierda: La rosca izquierda gira en contra de las manecillas del reloj y vista desde una posición horizontal, los filetes se inclinan hacia la derecha. Una rosca izquierda forzosamente se debe especificar en la designación de la rosca [24].

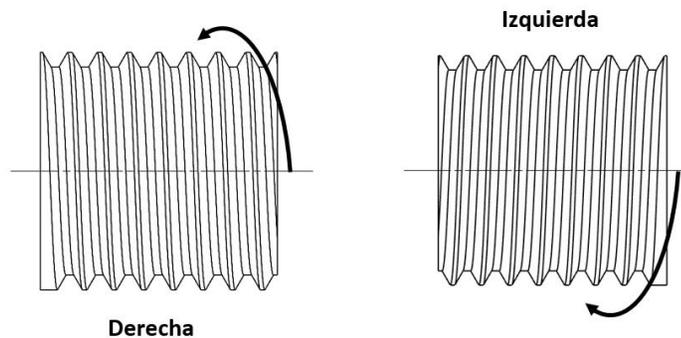


Figura 2.4 Clasificación de las roscas según el sentido de giro.

4. Según el número de filetes.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Generalmente cuando se desea mayor facilidad y velocidad en el roscado de una cuerda, se utiliza roscas de más de una entrada, esto quiere decir que se tiene uno o más filetes en la rosca según el número de entradas con lo que se obtienen avances mayores.

$$\text{avance} = \text{numero de entradas} \times \text{paso} \quad [2.1]$$

Para una rosca de una entrada, el avance es igual al paso; Para el avance de dos entradas el avance es igual al doble del paso, y así sucesivamente.

2.1.3 Designación de las roscas

Actualmente las roscas utilizan ciertas normas internacionales que aseguren que el ensamble mecánico entre dos roscas (tornillo y tuerca), sea el adecuado. Las normas internacionales se establecen según el perfil y el tipo de rosca y generalmente los datos que se incluyen para la designación son los siguientes elementos:

- La abreviatura del tipo de rosca, usando una letra representativa de esta, por ejemplo, M para roscas métricas, UN para roscas unificadas, G para roscas Whitworth para gas, etc.
- Diámetro nominal (d_{nom}), es una dimensión que cuenta con un valor cerrado; la dimensión del diámetro nominal se encuentra por encima del valor de la dimensión de diámetro mayor de la rosca, pero la diferencia es unas apenas unas milésimas de pulgada ya que es el valor cerrado que más se le aproxima, y solo sirve para facilitar la identificación de la rosca en la designación, ya que el valor de la dimensión del diámetro mayor es el real para la rosca.
- Paso del perfil.
- Tipo de paso (Burdo, fino, extra fino)
- Sentido de la cuerda. Generalmente las roscas son derechas, por tanto, no es necesario especificarlo en la designación de la rosca sin embargo se ocupa la abreviatura RH. Para las roscas izquierdas, se coloca LH en la designación.
- En ocasiones específicas se incluye la tolerancia y el número de entrada.

Según el sistema de unidades y las normas internacionales, las roscas tienen diferentes designaciones. En este trabajo se explican solo las roscas métricas y las unificadas debido a que son las que se ocupan comúnmente.

Sistema métrico: Se basa en el sistema ISO y se rige por el Sistema Internacional de Unidades (SI) por lo que utiliza el milímetro (mm) como unidad base, por tanto, el paso se indica por el avance en milímetros por cada vuelta.

Sistema unificado: Se basa en el sistema ANSI (American National Standards Institute), y el sistema inglés por lo que la pulgada (in), es la unidad base y el paso se indica por el número de filetes dentro de la longitud de una pulgada (hilos por pulgada “h.p.p”).

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

2.1.1 Clase de paso

Una manera más detallada de clasificar las roscas es de acuerdo al tipo de paso de la rosca, el cual puede ser burdo, fino o extrafino.

Paso burdo: También conocido como paso grueso es el paso más común en roscas; Un paso burdo o basto quiere decir que la distancia entre cada cresta es amplia, por lo tanto, la unión entre la rosca interna y la rosca externa es más rápida, pero esta no presenta mucha precisión por lo que se utiliza para uniones sencillas.

Paso fino: Se utiliza cuando se desea firmeza en la unión, generalmente se utiliza para elementos mecánicos.

Paso extrafino: Se utiliza para tener una gran precisión, se utiliza principalmente en elementos que están expuestos a altas vibraciones.

Para el caso de roscas unificadas se clasifican según el número de hilos de pulgada que hay en la rosca. Para un cierto diámetro el número máximo de filetes corresponde a una rosca extrafina y, por el contrario, para el número mínimo de filetes para el mismo diámetro, corresponde a una rosca burda.

En la designación para roscas unificadas (UN) se establecen los tres tipos de roscas fundamentales.

- UNC: (Unified National Coarse) Rosca Nacional Unificada burda, tosca, basta.
- UNF: (Unified National Fine) Rosca Nacional Unificada Fina.
- UNEF: (Unified National Extrafine) Rosca Nacional Unificada Extrafina.

Para el caso de roscas métricas solo existe el paso burdo y el paso fino, sin embargo, el tipo de paso en una rosca burda normalmente no se especifica en la denominación, pero el paso fino si es forzoso especificarlo. El paso fino es fácil de identificar en una rosca métrica ya que es el paso de menor valor e indica la menor distancia entre dos crestas consecutivas de la rosca.

Existe una relación entre el paso en hilos por pulgadas (#h.p.p.) y el paso milimétrico y este corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{25.4 \text{ mm}}{\#h. p. p} = \text{Paso (mm)} \quad [2.2]$$

2.1.2 Clase de tolerancia en rosca

La tolerancia en una rosca es qué tanto de espacio habrá entre una rosca interna y la externa (rosca hembra y macho). Las tolerancias son un complemento de la designación de la rosca y estas se indican por calidad y la posición de la tolerancia en la unión de las cuerdas [26].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Para cada designación de rosca y de acuerdo con la norma que la rige es como se indica la tolerancia. En este trabajo se explican solo las roscas métricas y las unificadas debido a que son las que se ocupan comúnmente.

Las tolerancias en las roscas deben establecerse de forma que se respeten las siguientes condiciones:

- La intercambiabilidad debe garantizarse.
- La solidez del conjunto no debe modificarse.
- Los flancos del filete deben apoyarse lo más posible sobre toda su superficie y en toda la longitud roscada [27].

Clase de tolerancia para rosca métrica:

Para el caso de la rosca métrica la tolerancia se expresa mediante un número que representa la calidad y una letra que representa la posición. Los grados de tolerancia se establecen de acuerdo con el paso diametral; y la cresta diametral y la posición se establece según los límites de material máximo de los diámetros de paso y cresta, tanto en roscas internas como en roscas externas.

Roscas internas:

- Posición de tolerancia G: Juego pequeño (poca permisibilidad).
- Posición de tolerancia H: Sin juego (sin permisibilidad).

Roscas externas:

- Posición de tolerancia e: Juego grande (alta permisibilidad).
- Posición de tolerancia g: Juego pequeño (poca permisibilidad).
- Posición de tolerancia h: Sin juego (sin permisibilidad).

Clase de tolerancia para rosca unificada:

Para especificar la clase de tolerancia para roscas del sistema unificado, se tiene que determinar la cantidad de la tolerancia y del juego. El sistema unificado cuenta con un mecanismo simple para establecer las clases de la tolerancia. Se utiliza un valor de tolerancia de entre “1”, “2” o “3” y se usan la letra “A” para distinguir a las roscas internas y la letra “B” para roscas externas.

- Tolerancia 1A (rosca interna) y 1B (rosca externa): Mayor juego en el ensamble, presentan mayor holgura que ayuda a un fácil montaje.
- Tolerancia 2A (rosca interna) y 2B (rosca externa): Representa un juego moderado o medio, se ocupa para roscas comerciales de calidad y de uso en general.
- Tolerancia 3A (rosca interna) y 3B (rosca externa): No presentan juego ya que es una tolerancia estrecha generalmente utilizada en herramientas de alta precisión. Sus costos son muy elevados debido a la dificultad de su elaboración [29].

2.2 Torneado de roscas

Una rosca puede ser manufacturada mediante diferentes procesos, esto depende de la cantidad piezas de fabricación, del tipo de rosca, la calidad de la tolerancia y tiempo de fabricación. Una rosca se

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

puede manufacturar con la ayuda de herramientas y utilizando máquinas-herramientas. Los principales métodos de fabricación de roscas son:

- Machuelo (roscas internas): Tallado manual de rosca internas a partir de barreno interno, utilizando herramienta de corte macho (machuelo).
- Tarraja (roscas externas): Tallado manual de rosca externa en cilindro, con el uso de herramienta de corte hembra (tarraja).
- Torneado de roscas.
- Fresado de roscas.
- Rectificado de roscas.
- Laminado de roscas.
- Moldeado.

El torneado de rosca es el método más habitual, es uno de los métodos de fabricación más productivos, es un método versátil, ya que se pueden fabricar la mayoría de los perfiles de roscas, el torneado de roscas, es de fácil manejo y sencilla manipulación además de que es un método que ofrece buenos acabados superficiales y cerradas tolerancias.

La herramienta de corte es el elemento esencial para llevar a cabo la operación, ya que la geometría dependerá del perfil de la rosca. La herramienta tiene un movimiento axial de corte a lo largo de la pieza de trabajo y este movimiento es sincronizado con el movimiento de rotación del husillo (rotación del material de trabajo). La dirección del movimiento de rotación y el movimiento de corte de la pieza de trabajo determina si la rosca es derecha o izquierda.

El movimiento del husillo es constante y generalmente es de bajas revoluciones. El paso de la herramienta se define a partir del desplazamiento axial por cada revolución del material de trabajo; esto quiere decir que, para una velocidad constante del husillo y desplazamiento lento de la herramienta, la rosca será más fina y por el contrario para un desplazamiento de herramienta rápido, la rosca será burda [2].

Los parámetros de corte en el torneado de rosca, los define el material de trabajo y el tipo de rosca, a partir de estos se definen otros parámetros como la herramienta de corte, el método de penetración, la velocidad del husillo, el fluido de corte etc., (*Figura 2.5*).

Las principales consideraciones para el torneado de roscas son:

- Las roscas deben permitir la terminación antes de que se obstaculice, esto quiere decir que se debe tener un espacio libre que permita la salida de la herramienta al finalizar el recorrido de corte de la rosca, por ejemplo, un espacio entre la cabeza del tornillo y la rosca en el caso de roscas externas o un espacio sin roscar en el final de un barreno ciego para el caso de roscas internas.
- Especificar chaflanes en los extremos de las secciones roscadas para minimizar rebabas en los filetes de la entrada de la rosca.
- Las secciones destinadas para ser roscadas no deben tener interrupciones de ranuras, perforaciones etc.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- Tienen preferencia el uso de herramientas e insertos estandarizados para elaboración de roscas [2].

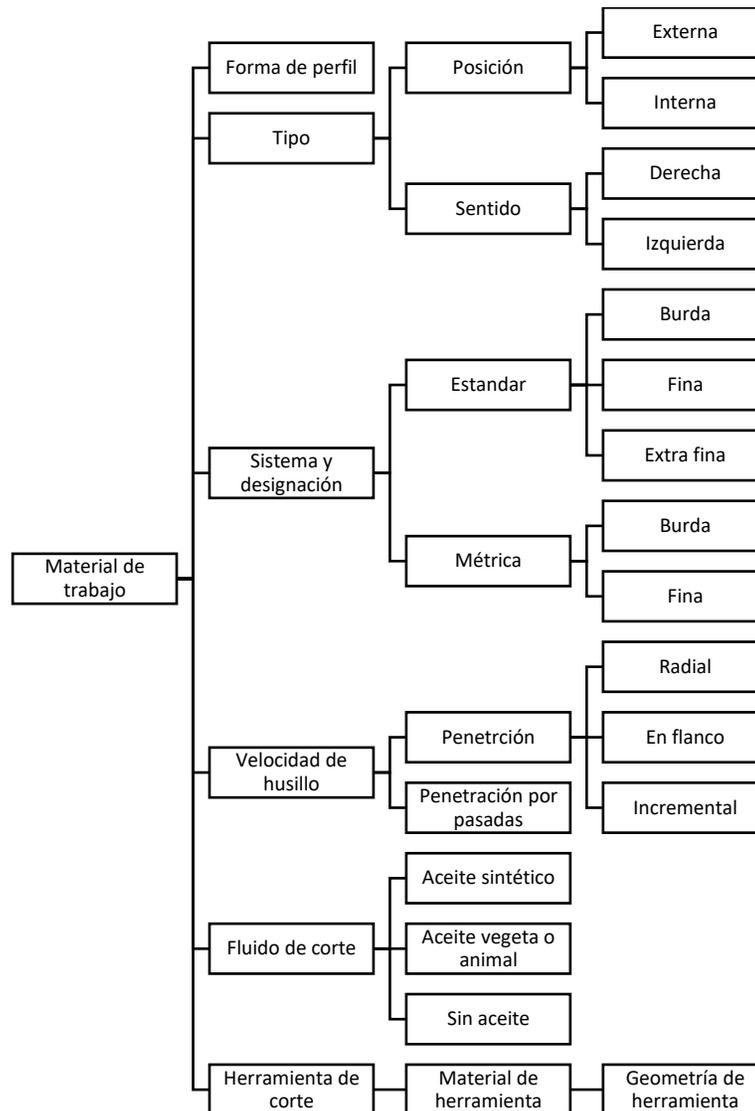


Figura 2.5 Representación esquemática de parámetros en el torneado de roscas.

2.2.1 Relación empírica de parámetros para torneado de roscas

Para poder definir las relaciones de torneado de roscas es necesario recurrir a las relaciones empíricas de parámetros de torneado.

Si se sabe que las ecuaciones para obtener la velocidad de corte “ V_c ”, el avance “ f ” y la profundidad de corte “ t_0 ” para una operación de roscado son:

- Velocidad de corte: $V_c \left(\frac{m}{\text{min}} \right) = \frac{\pi d N}{1000}$ o $V_c \left(\frac{mm}{s} \right) = \frac{\pi d N}{60}$
- Avance: $f \text{ (mm)} = \frac{25.4}{\#h.p.p.}$

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- Profundidad de corte: $t_0(\text{mm}) = \frac{(d_0-d)}{2}$
- Tasa de remoción de material en roscado: $RMR = V_c t_0 f$

$$RMR \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{seg}} \right) = \frac{25.4(\text{mm})}{60(\text{s})} \frac{\pi d N t_0}{\text{\#h. p. p.}}$$

- Potencia de corte: $P_c \left(\frac{\text{Nm}}{\text{seg}} \right) = P_u * RMR$
- Fuerza teórica de corte para roscado: $F_c(\text{N}) = \frac{P_c}{V_c}$

$$F_c(\text{N}) = \frac{P_u \left(\frac{25.4}{60} \frac{\pi d N t_0}{\text{\#h. p. p.}} \right)}{\left(\frac{\pi d N}{1000 * 60} \right)} = 1000 * P_u \left(\frac{25.4}{\text{\#h. p. p.}} \right) t_0$$

La ecuación simplificada para obtener la fuerza de corte teórica en un proceso de torneado de roscas queda de la siguiente manera:

$$F_c(\text{N}) = 1000 * P_u f t_0 \quad [2.3]$$

2.2.2 Métodos de penetración de corte por pasada

Existen tres métodos de penetración de la herramienta sobre el material de trabajo para definir el perfil de la rosca; El método de penetración dependerá del perfil de la rosca y geometría de la herramienta de corte (*Figura 2.6*).

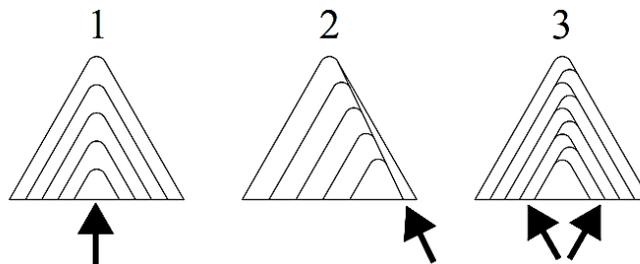


Figura 2.6 Métodos de penetración de herramienta en torneado de roscas [30].

Los métodos de penetración son:

1. Penetración radial: Es el método más común, la viruta que se genera es muy rígida y en ocasiones deforme; En pasos burdos es difícil el control de la viruta y existe el riesgo de presentar mucha vibración, por lo que generalmente solo se recomienda para roscas de paso fino. Debido a la basta área de contacto entre la herramienta de corte y el material de trabajo, se genera una elevada cantidad de temperatura en la zona de corte.
2. Penetración en flanco: Es recomendado para cualquier perfil, debido a la ligera inclinación de la herramienta existe mayor control en la viruta ya que el corte solo se genera en un solo

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

lado de la herramienta, además de que ayuda a reducir las vibraciones; Se requieren menos pasadas de corte que en la penetración radial para definir el perfil de la rosca.

3. Penetración incremental: Este método solo se utiliza para pasos muy grandes de rosca, el desgaste de la herramienta es más homogéneo por lo que ayuda a alargar la vida de la herramienta. Comúnmente este método solo es utilizado en CNC [26].

Generalmente en el torneado de roscas, la geometría de la rosca se define a partir de varias profundidades de corte por pasadas a diferencia de otros métodos que con solo un proceso se obtiene la geometría final de la rosca en un solo paso.

Existen dos formas para establecer la profundidad de penetración por pasadas la primera es de profundidades decrecientes y la segunda es con profundidades constantes.

- **Profundidad constante por pasada:** Aunque esta forma de mecanizado de rosca por torneado es típica por su sencillez debido a que solo se divide la profundidad total de la rosca entre el número de pasadas, este método no es recomendable debido a que la herramienta sufre mayor exigencia debido a que la tasa de remoción de material y las fuerzas de corte se incrementan por cada pasada por lo que lo convierte en un método menos productivo. Por ejemplo, para el caso de una rosca con ángulo de 60° con profundidad de corte constante, para la segunda pasada se remueve casi tres veces más material que en la primera pasada [31].
- **Profundidad decreciente por pasada:** El método consiste en que la primera pasada es la de mayor profundidad y las siguientes van disminuyendo proporcionalmente, siendo la última pasada la de menor profundidad. Es el método más habitual ya que equilibra la tasa de remoción de material y las fuerzas de corte presentan un incremento gradual.

Existen tablas elaboradas por fabricantes de herramientas para generación de roscas, donde ofrecen recomendaciones para determinar el número de pasadas y las profundidades por pasada; estas recomendaciones se establecen según el tipo de rosca.

2.2.3 Herramientas de corte para torneado de roscas

La elección de la herramienta de corte es fundamental para el proceso de roscado, debido que una buena elección de esta conlleva a mejorar la calidad de la rosca. Las herramientas de torneado de roscas se pueden dividir en dos clases; para roscas internas y para roscado externo. Los factores principales que se deben tomar en cuenta para la elección de la herramienta de corte son:

- Paso de la rosca.
- Perfil de la rosca.
- Material de trabajo.
- Cantidad de elementos a roscar.
- Porta-herramientas.

Las herramientas de corte para torneado de roscas pueden ser desde un buril, el cual es el menos recomendado, hasta plaquitas o insertos intercambiables que cuentan con preformas que garantizan

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

una geometría de gran exactitud. Las herramientas para roscar estandarizadas tienen un sistema de codificación para su identificación, en los que involucran las características de la rosca, las operaciones que pueden realizar y en qué condiciones de trabajo pueden ser utilizadas.

Las características que se expresan en los códigos de estas herramientas son:

- Referencia de herramienta: Tipo de rosca.
- Tipo de herramienta: Para roscas internas o externas.
- Sentido de la herramienta: Derecho o izquierdo.
- Tamaño de la herramienta: Tamaño geométrico de la plaquita o inserto.
- Paso: Intervalo de paso de rosca en el que puede ser utilizado.
- Condición de corte recomendada según el material de la pieza de trabajo.
- Grados de aplicación: Con o sin rompe-viruta [32].

Existe una clasificación en herramientas de corte para roscado que consiste en la forma del perfil de la plaquita, este puede ser de perfil parcial o perfil completo (*Figura 2.7*).

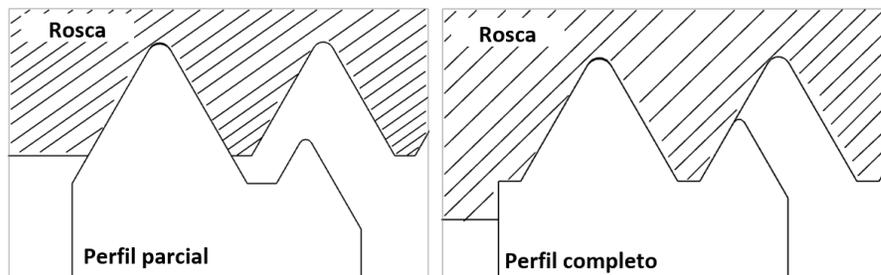


Figura 2.7 Perfil de herramienta para roscar.

Perfil parcial: Este tipo de herramienta es para un uso general, tiene la ventaja de que puede generar un amplio rango de pasos con el mismo filo, pero como consecuencia de esto la herramienta no puede dar forma a la cresta (parte superior) de la rosca. La punta de este tipo de herramienta corresponde al paso más pequeño por lo que la fuerza de corte se concentra principalmente en este punto, debido a esto la herramienta sufre un mayor desgaste y en pasos mayores, es necesario aumentar la profundidad de la rosca para obtener un mejor resultado [26].

Perfil completo: Esta herramienta genera perfiles normalizados. La geometría final de la rosca es muy precisa, debido a que la herramienta tiene una preforma de la cuerda deseada lo que ayuda hasta en un 80% a la reducción en las pasadas, también ayuda a disminuir los residuos de rebabas y aumenta considerablemente la vida de la herramienta debido a que el corte se distribuye en todo el filo del perfil de la herramienta. Las desventajas de este tipo de herramientas, es que solo se pueden generar un solo tipo de rosca por inserto, también debido a que existe una gran área de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, las fuerzas de corte son muy altas por lo que no se recomienda para piezas de pared delgada y por último la pieza maquinada debe de contar con un espacio suficiente de salida para que el filo completo del perfil de la herramienta pueda terminar el corte [33].

En el maquinado de roscas es importante identificar los problemas que se mencionan anteriormente para evitar defectos en el elemento final [32].

Capítulo 3. Metodología Experimental

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3.1 Equipo de medición de fuerzas de corte en torneado

Es de suma importancia identificar las fuerzas de corte que se producen en el herramental y en la pieza maquinada, ya que con esto se puede hacer una adecuada selección de los parámetros de corte y también puede ser un indicador para efectuar cambio de máquina-herramienta o en su defecto de la herramienta.

Las fuerzas de corte que se presentan en una operación de torneado dependen de los parámetros asociados a los procesos por arranque de viruta y por lo tanto para cuantificar un valor aproximado de las magnitudes de las fuerzas de corte en una operación de torneado, es necesario utilizar métodos y herramientas de medición que brinden una gran exactitud.

Existen distintos métodos para las mediciones de fuerzas en torneado, que permiten conocer la variación de las fuerzas de corte respecto al cambio en el ángulo del herramental; se requiere de un instrumento de medición, conocido con dinamómetro [18].

Los dinamómetros son utilizados para:

- Análisis del proceso de mecanizado [35].
- Optimización del proceso de mecanizado.
- Comparación y optimización de estrategias de mecanizado.
- Cuantificación de la energía implementada en procesos plástico-mecánicos.
- Determinación de características de materiales y maquinabilidad.
- Análisis de los mecanismos de desgaste de las herramientas.
- Dimensionamiento de la máquina (Estructuras / componentes).
- Optimización de herramientas.
- Verificación de los resultados de la simulación y de modelos de proceso [34].

3.1.1 Dinamómetro 9263 KISTLER y componentes.

En este trabajo se utilizó un Dinamómetro modelo 9263 de la marca KISTLER, estacionario de estructura modular, montable y adaptable a la torreta de torno convencional y con compartimiento para porta herramientas (*Figura 3.1*).



Figura 3.1 Dinamómetro KISTLER Tipo: 9263 SN: 65180, de Facultad de Ingeniería, UNAM.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Este tipo de dinamómetro tiene un sistema de medición de fuerza piezoeléctrica; las fuerzas actuantes en la operación se transmiten a un cristal de cuarzo en la celda de carga dentro del dinamómetro, convirtiendo las fuerzas en señales eléctricas, proporcionales a las fuerzas ejercidas.

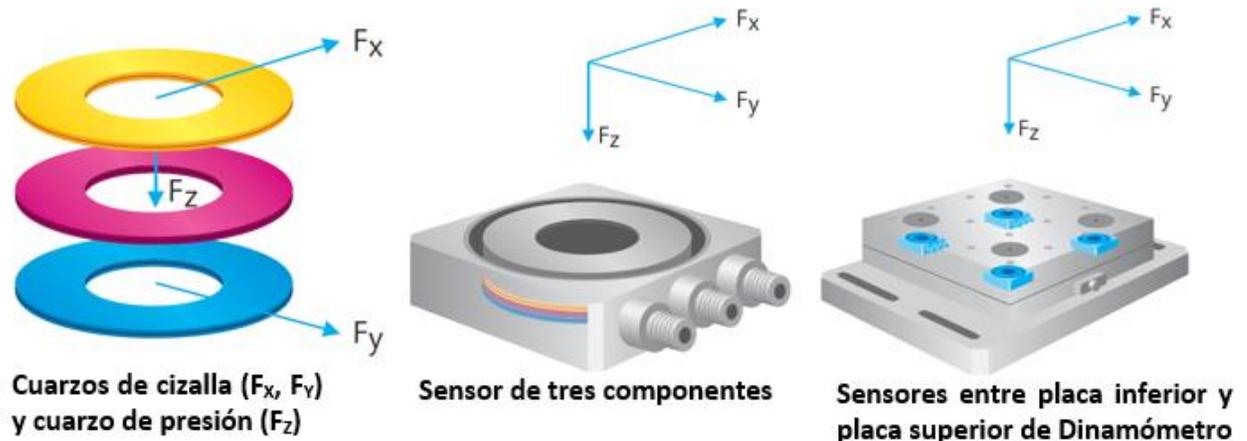


Figura 3.2 Construcción de un dinamómetro de tres componentes (F_x , F_y , F_z) de KISTLER [35].

En la *Figura 3.2*, se muestra un dinamómetro de tres componentes como el del tipo KISTLER 9263, se observa que para el fenómeno de cizalla se ocupan dos cuarcos que se direccionan en F_x y F_y ; por otro lado, se ocupa un cuarzo direccionado en F_z para medir la presión; estos tres componentes integran un sensor.



Figura 3.3 Amplificador KISTLER 5070 [36].

Las cargas que reciben los sensores son transmitidas por cable de alta aislación a un amplificador (*Figura 3.3*) que realiza una conversión proporcional en voltajes. Los cables son aislados de tal manera que garantizan que no habrá alteración en la transmisión ya que están protegidos con funda metálica sellada y una segunda de plástico adecuado para un entorno de maquinado, los extremos del cable tienen conectores robustos que aseguran la sujeción al dinamómetro y al amplificador.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Datos técnicos de Amplificador KISTLER 5070A

Tabla 3.1 Datos técnicos de amplificador KISTLER 5070 [36].

Datos técnicos			
Rangos de medición FS	pC	Opcional	± 200 ... 200 000 ± 600 ... 600 000
Ajuste del rango de medición			Continua
Rango de frecuencia (-3 dB)	KHz		≈ 0 ... 45
Señal de salida	V		± 10
Suministro de voltaje	VAC		100 ... 240
Señal de entrada	Tipo/conector		piezoeléctrico, opcional con BNC negativo Fischer 9- polo negativo
Interface	Opcional		RS-232C RS-232C AND IEE-488
Estuche	Opcional		19" casete para rack Unidad de soporte conjunto de montaje en panel
Otras características			Monitor de valores pico Monitor de medidas mecánicas

Para el análisis de los datos obtenidos es importante introducir parámetros de maquinados conocidos, la función de la tarjeta de adquisición de datos es mantener una interfaz entre una paquetería de datos software DynoWare que procese las señales adquiridas en el amplificador, y representarlas en forma gráfica a través de un computador [36].



Figura 3.4 Tarjeta de Adquisición de Datos KISTLER 5697 y software DynoWare [35].

Datos técnicos de Tarjeta de Adquisición de Datos KISTLER 5697

Todas las especificaciones del equipo KISTLER se pueden encontrar en la su página oficial o en sus catálogos [37].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Tabla 3.2 Datos técnicos de tarjeta de adquisición de datos KISTLER 5697 [36].

Especificaciones Tipo 5697		
Número de canales de medición		32
Resolución	Bit	16
Tasa de muestreo máximo	Ajustable continuamente en DynoWare	
• 1 canal	KS/s	1000
• 8 canales	KS/s	125
• 16 canales	KS/s	62.5
Interfaz con PC	USB 2.0 tipo B, hembra	
Dimensiones	mm	208X70X250
Peso	kg	2.5

3.1.2 Máquina-herramienta Torno

Torno TITANIUM BJ-1640D

Para la elaboración de este trabajo, se utilizó un Torno de la marca TITANIUM del tipo BJ-1640D, que se localiza en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería (F.I.) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), como parte de un proyecto desarrollado en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM).

El torno TITANIUM es adaptable y ajustable a las necesidades de este proyecto; la base de la torreta de este tipo de torno se puede adaptar a las dimensiones del Dinamómetro KISTLER-9263 (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Especificaciones técnicas de torno TITANIUM BJ-1640D [38].

Especificación	Unidad de medida	Valor
Volteo sobre la bancada	mm	410
Volteo sobre el carro	mm	240
Volteo sobre el escote	mm	595
Distancia entre puntos	mm	1000
Paso de barra	mm	52
Rango de velocidades	rpm	80-2000
Viaje del carro transversal	mm	230
Viaje del carro auxiliar	mm	120
Paso de roscas Whitworth	#h.p.p.	02-56
Paso de roscas métricas	mm	0.4-14
Paso de roscas diametral pitch	dp	0.4-7
Paso de rosca modulares	mod	04-56
Motor principal	hp	5.5
Peso	kg	1700

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3.1.3 Herramental para roscas en torno

Inserto de Carburo TNMC-NV Grado C2

El inserto de carburo para roscas del tipo TNMC-NV es ideal para la elaboración de roscas externas elaboradas en torno a velocidades medias, es adecuado para metales endurecidos, metales no ferrosos y algunos plásticos; el ángulo de inserción es de 60° para cuerdas en “V”.

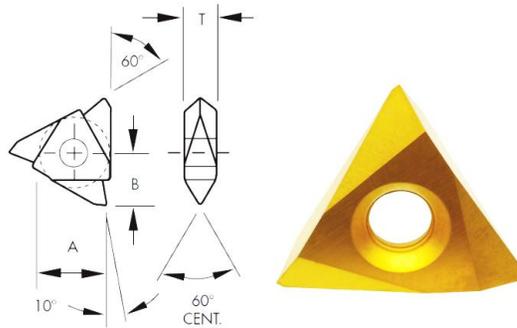


Figura 3.5 Inserto TNMC-NV de Travers Tool [38].

Datos técnicos de inserto TNMC-NV

Tabla 3.4 Datos técnicos de inserto tipo TNMC de carburo [39].

No. De Inserto	TNMC-32NV
C.I A	0.3752"
Ancho T	.125"
Filo de corte B	.306"
Agujero	.150"
Grado	C2
Desalajo	Negativo
Rectificado	De Precisión

Porta-Insertos MTVO

Este tipo de porta-insertos es adecuado para hacer cuerdas externas y ranuras de corte derecho y ángulo neutro, compatible con insertos para cuerdas del tipo TNMC-NV, TNMC-N, TPMC-NV.



Figura 3.6 Porta-insertos MTVO de Travers Tool [39].

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Datos técnicos de porta-insertos MTVO

Tabla 3.5 Datos técnicos de porta insertos MTVO [46].

Zanco cuadrado	1"
Largo total	6"
C.I	3/8"
Ancho T	1/8"

3.2 Material y características de la probeta

3.2.1 Titanio Ti6Al4V

Ti6Al4V es la aleación de titanio más utilizada debido a su alta maquinabilidad y sus excelentes propiedades mecánicas.

La aleación de titanio Ti6Al4V se distingue por su alta resistencia, baja densidad y la excelente resistencia a la corrosión son características que han llevado a esta aleación a una gran cantidad de aplicaciones de alta demanda de calidad dentro de la ingeniería en las industrias de la aeronáutica, naval, automotriz, petrolera, medicina, así como en la biomecánica por su biocompatibilidad.[41].

La composición química de la aleación Ti6Al4V se muestra en la *Tabla 3.6*.

Tabla 3.6 Porcentaje de peso de elementos químicos en aleación Ti6Al4V [41].

Elemento	Peso %
Aluminio (Al)	6
Hierro (Fe)	Max. 0.25
Oxígeno (O)	Max. 0.20
Titanio (Ti)	90
Vanadio (V)	4

La aleación también contiene Carbono, Hidrógeno y Nitrógeno, aunque en muy bajo porcentaje.

Los valores de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación Ti6Al4V que se muestran en la *Tabla 3.7* varían según el fabricante y el método de obtención del material; sin embargo, estos valores sirven como un referente.

Tabla 3.7 Propiedades físicas y químicas de aleación Ti6Al4V [41].

Densidad	4430 kg/m ³
Resistencia a la tracción	0.95 GPa
Dureza	33 HRC
Módulo de elasticidad	120 GPa
Relación de Poisson	0.342
Módulo de rigidez a corte	44 GPa

Para un buen mecanizado de la aleación Ti6Al4V recomiendan:

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- Bajas velocidades de corte.
- Alta velocidad de avance.
- Uso de fluido de corte.
- Herramientas de carburo.

3.2.2 Acero AISI 304

Los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 304 es un acero inoxidable austenítico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse por deformación. Su bajo contenido en carbono con respecto a la aleación 302 otorga una mayor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas [42].

Sus principales aplicaciones son:

- Equipo quirúrgico hospitalario
- Refacciones de sistemas de aviación.
- Equipos de procesamiento alimenticio
- Equipos marinos

La composición química de la aleación AISI 304 se muestra en la *Tabla 3.8*.

Tabla 3.8 Porcentaje de peso de elementos químicos en aleación AISI 304 [42].

Elemento	Peso (%)
Carbono	Max. 0.08
Manganeso	Max. 2
Silicio	Max. 1
Fosforo	Max. 0.045
Azufre	Max. 0.03
Cromo	18-20
Níquel	8-10

Los valores de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación AISI 304 que se muestran en la *Tabla 3.9* varían según el fabricante y el método de obtención del material; sin embargo, estos valores sirven como un referente.

Tabla 3.9 Propiedades físicas y químicas de aleación AISI 304 [42].

Densidad	8000 Kg/m ³
Resistencia a la tracción	0.505 GPa
Dureza	85 HRB
Módulo de elasticidad	193- 200 GPa
Relación de Poisson	0.29
Módulo de rigidez a corte	86 GPa

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3.2.3 Aluminio 2024

El aluminio 2024 pertenece al grupo de los “Duraluminos”, en este caso el cobre es el principal elemento de la aleación. Se trata de una aleación que presenta una elevada resistencia mecánica.

Sus aplicaciones, están basadas en la relación Fuerza/Peso y a su gran resistencia a la fatiga, presenta buenas características de maquinabilidad con buenos acabados superficiales. Como inconveniente presenta baja resistencia a la corrosión [43].

Debido a la rigidez y a la buena resistencia a la fatiga, esta aleación tiene como principales aplicaciones en la industria aeroespacial, automotriz, y militar. Algunos ejemplos son:

- Partes roscadas (Tornillería)
- Pernos
- Remaches
- Bisagras
- Estructuras de las alas y fuselajes de aviones.
- Accesorios de aeronaves.
- Rines de camiones.

La composición química del Aluminio 2024 se muestra en la *Tabla 3.10*.

Tabla 3.10 Porcentaje de peso de elementos químicos en aleación Aluminio 2024 [43].

Elemento	Mínimo (%)	Máximo (%)
Silicio	-	0.5
Hierro	-	0.5
Cobre	3.8	4.9
Manganeso	0.3	0.9
Magnesio	1.2	1.8
Cromo	-	0.1
Zinc	-	0.25
Titanio	0	0.15

Los valores de las propiedades físicas y mecánicas de la aleación AISI 304 que se muestran en la *Tabla 3.11* varían según el fabricante y el método de obtención del material; sin embargo, estos valores sirven como un referente.

Tabla 3.11 Propiedades físicas y químicas de aleación Aluminio 2024 [44].

Densidad	2770 kg/m ³
Resistencia a la tracción	0.469 GPa
Dureza	75 HRB
Módulo de elasticidad	73 GPa
Relación de Poisson	0.333
Módulo de rigidez a corte	28 GPa

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3.2.4 Probetas

Para llevar a cabo este trabajo fue necesario el diseño y la fabricación de las probetas por cada material, aluminio 2024, acero inoxidable AISI 304 y Titanio Ti6Al4V.

Para la fabricación de las probetas se realizó un cilindrado previo en los materiales para lograr obtener los valores dimensionales y geométricos requeridos el cual se describe detalladamente más adelante.

Cada probeta se diseñó con cuatro secciones las cuales están destinadas para el maquinado de las roscas. Las secciones se encuentran previamente cilindradas a un mismo diámetro con una tolerancia de ± 0.0005 de pulgada. Los diámetros elegidos para llevar a cabo los experimentos fueron seleccionados con base en las dimensiones y la robustez del equipo de medición de fuerzas KISTLER, por lo que se optó por trabajar con diámetros para roscar de 1 in, 1 1/8 in y 1-1/4in, para evitar deflexiones considerables en las probetas y alteraciones en los resultados.

La configuración de las probetas según la cantidad, el diámetro de las secciones y el diámetro de las ranuras se observa en la *Tabla 3.12*.

Tabla 3.12 Configuración de probetas según la cantidad y los diámetros de secciones y de ranuras.

Material	Cantidad de probetas	Diámetro nominal " d_{nom} " de secciones	Diámetro de ranura
Acero inoxidable AISI 304	2	1 - 1/4 in	1 in
	2	1 - 1/8 in	7/8 in
Aluminio 2024	2	1 - 1/4 in	1 in
	2	1 - 1/8 in	7/8 in
Titanio Ti6Al4V	1	1 in	3/4 in
	1	1 in	3/4 in

Las secciones tienen una longitud de una pulgada y se encuentran separadas por ranuras entre cada sección las cuales tienen una longitud de un cuarto de pulgada y cuentan con un diámetro de un cuarto de pulgada menor al diámetro de las secciones (*Figura 3.7*)

El diseño de las ranuras cuenta con un chaflán de 110° de entrada y uno de 250° de salida de acuerdo con la horizontal, los cuales ayudaran a disminuir las rebabas o imperfecciones en el inicio y la salida de la rosca, además de que permiten una buena entrada y la salida de la herramienta de corte en cada pasada.

Para la prevención de accidentes y para la protección del equipo, las probetas cuentan con una sección de tres pulgadas de longitud de material previamente cilindrado, esta sección está destinado para la sujeción de las probetas en las mordazas universales del torno y también como una medida de seguridad que previene un impacto entre las mordazas universales y el dinamómetro (*Figura 3.7*).

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

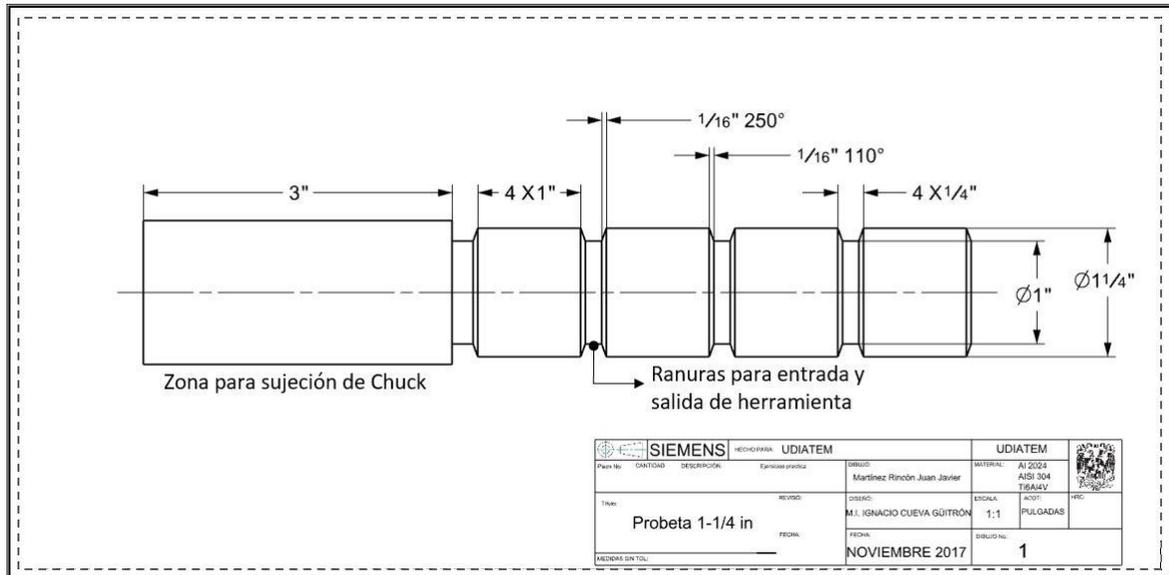


Figura 3.7 Dibujo técnico de probeta de 1-1/4 in.

Con el fin de variar la mayoría de los parámetros del proceso, la experimentación se realizó utilizando dos velocidades de husillo “N” (rpm), la primera de 32 rpm y 55 rpm ya que son las velocidades más bajas con las que se puede trabajar en torno TITANIUM.

En la *Tabla 3.13*, se observa la distribución de las roscas y la configuración de las probetas según la velocidad de husillo.

Tabla 3.13 Configuración de probetas según los pasos de cada rosca.

Material	Cantidad de probetas	Diámetro nominal	Paso (h.h.p) y fluido de corte				Velocidad de husillo (RPM)
			Rosca 1	Rosca 2	Rosca 3	Rosca 4	
Acero inoxidable AISI 304	1	1 - 1/4 in	7	7	18	18	32
	1		Manteca	Aceite	Manteca	Aceite	55
	1	1 - 1/8 in	7	7	18	18	32
	1		Manteca	Aceite	Manteca	Aceite	55
Aluminio 2024	1	1 - 1/4 in	7	7	18	18	32
	1		Manteca	Aceite	Manteca	Aceite	55
	1	1 - 1/8 in	7	7	18	18	32
	1		Manteca	Aceite	Manteca	Aceite	55
Titanio Ti6Al4V	1	1 in	14	14	20	20	32
	1		Manteca	Aceite	Manteca	Aceite	55

Otro parámetro que se analizó en este trabajo fue el fluido de corte, por lo que para fines de este trabajo se realizó una comparación entre un aceite de corte comercial y uno poco convencional como es la manteca, ya que es bien sabido que por sus propiedades de disipación de calor y lubricación en algunos casos se ha llegado a utilizar como fluido de corte. En la *Tabla 3.13* se puede observar

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

la distribución del fluido de corte por cada probeta, de tal manera que por cada rosca maquinada con manteca se hizo otra con los mismos parámetros y mismas condiciones, pero con aceite de corte comercial.

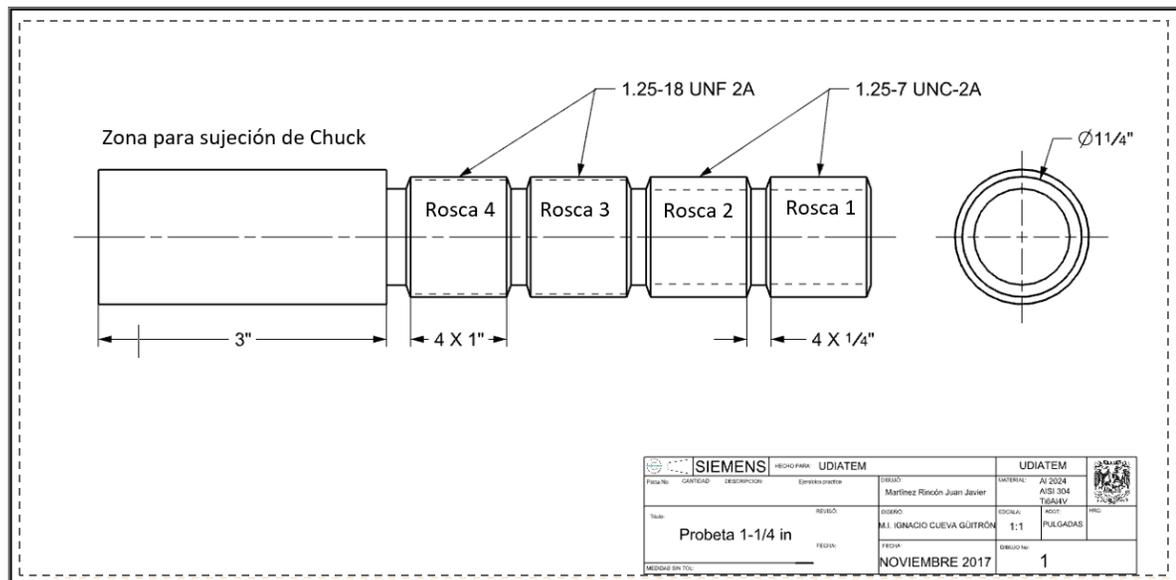


Figura 3.8 Dibujo técnico de probeta de 1-1/4 in con distribución de roscas unificadas.

En este trabajo se realizó varias pruebas con el fin de comprobar la repetibilidad y reproducibilidad de los experimentos además de identificar los errores o fallas que pueden surgir en el proceso.

3.3 Montaje de probetas y equipo

3.3.1 Montaje de equipo de medición de fuerzas de corte

El protocolo que se diseñó para llevar a cabo la experimentación se divide en varias etapas, las cuales se describen detalladamente a continuación:

Etapa 1: Preparación de probetas

1. Seccionar las piezas y aproximarlas a la longitud requerida debido a que esto ayuda a mejorar el manejo de las piezas.
Para la preparación de las probetas es recomendable obtener las piezas de trabajo con dimensiones muy aproximadas a las requeridas.
2. Realizar un proceso de careado o refrenado sobre una de las caras de la pieza de trabajo, además de generar un barreno cónico en el centro (sobre el eje de giro) con el uso de una broca de centros.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3. La pieza de trabajo se debe sujetar entre las mordazas universales y un punto giratorio (el barreno cónico previamente realizado se monta sobre el cono del punto giratorio ejerciendo presión) para evitar oscilaciones no deseadas. Posteriormente se debe realizar un proceso de cilindrado por toda la pieza de trabajo para garantizar que esta sea cilíndrica con una tolerancia cerrada ($\pm 0.0005''$) en toda su longitud y también para llegar al valor del diámetro nominal " d_{nom} " que le corresponda.
4. Maquinar las ranuras para la entrada y salida de la herramienta, tomando en cuenta las dimensiones, descritas la *Figura 3.7*; verificar que las ranuras no dejen rebabas sobre las secciones para el roscado (*Figura 3.9*).



Figura 3.9 Probeta con secciones y ranuras.

5. Verificar que los elementos que sujetan a la probeta (mordazas universales y punto embalado) no presenten ningún movimiento relativo, esto para evitar cabeceo u oscilaciones no deseadas.

Es importante resaltar que la probeta no deberá moverse o desmontarse, debido a que esto podría provocar un desajuste en cuanto a la concentricidad de la probeta con el eje de giro, lo cual traería como consecuencia un ligero cabeceo que podría repercutir en que, durante el maquinado de la rosca, la herramienta corte más material de un lado que en otro, dejando una rosca asimétrica y alterando gravemente los resultados de las mediciones.

Para realizar el cilindrado es necesario conocer el valor de diámetro exterior " d " que le corresponde según el diámetro nominal y el paso.

El diámetro exterior " d " depende del paso de la rosca y sigue una pequeña regla la cual se traduce en que, para un paso fino, el diámetro exterior será más cercano al diámetro nominal, por otro lado, mientras más burdo sea el paso, el diámetro exterior se aleja más del valor del diámetro.

Es posible encontrar la longitud truncada que es la diferencia entre el diámetro nominal " d_{nom} " y el diámetro exterior " d ", por lo que si se resta la longitud de truncado " T_f " al diámetro nominal se puede obtener el diámetro exterior de la rosca según el paso.

$$d = T_f - d_{nom} = \frac{h}{16} - d_{nom} = \frac{H}{8} - d_{nom} \quad [3.1]$$

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Una vez que se realizó el cilindrado en la probeta para llegar al valor del diámetro exterior " d ", de la rosca según el paso, lo siguiente es montar el dinamómetro y la herramienta de corte.

Etapa 3: Montaje de Dinamómetro KIAG SWISS KISTLER y herramental de corte.

1. Montar el inserto de Carburo TNMC-NV en el porta-insertos, verificando que este bien asegurado.
2. Montar el porta-insertos en el base del dinamómetro KIAG SWISS, tomando en cuenta que la presión de apriete debe ser homogénea en cada tornillo.
3. Montar el dinamómetro sobre una base (la base fue previamente fabricada para su adaptación la cual se ajusta en el carro transversal del torno TITANIUM), de tal manera que en conjunto el dinamómetro sustituya la torreta.
Verificar con ayuda de un patrón para cuerdas de 60° , que la dirección de la herramienta de corte sea perfectamente perpendicular al eje de giro del torno.
5. Verificar que los cables de señal no tengan obstáculos durante el recorrido del carro longitudinal del torno.
6. Encontrar el cero de la pieza de trabajo tocando ligeramente con la punta de la herramienta de corte la superficie cilíndrica de la sección de la probeta y ajustar el cero en la escala de la manivela que controla el movimiento del carro transversal.

Etapa 4: Vinculación de equipo de medición de fuerzas de corte con centro de cómputo.

Para llevar a cabo la vinculación del equipo de medición de fuerzas KISTLER con el centro de cómputo se requiere de los siguientes elementos:

- Tarjeta de adquisición de datos Kistler (DAQ for DynoWare Type 5697)
- Amplificador de carga Multicanal Kistler.
- Dinamómetro KIAG SWISS
- Cables de transferencia de datos RSCA, USB.
- Centro de cómputo (laptop).

El protocolo establecido por los fabricantes del equipo de medición de fuerzas en cuanto a la conexión y vinculación se describe en las siguientes instrucciones.

1. Conectar el cable de alimentación de corriente a la tarjeta de adquisición de datos Kistler (DAQ for DynoWare Type 5697).
2. Enlazar por medio de cable USB la tarjeta de adquisición de datos Kistler y el centro de cómputo (laptop).
3. Conectar el cable de alimentación de corriente al Amplificador de Carga Multicanal Kistler.
4. Conectar el Amplificador de Carga Multicanal Kistler a la tarjeta de adquisición de datos.
5. Conectar los cables de señal al Amplificador de carga Multicanal Kistler en los canales 1, 2 y 3 y en el otro extremo de los cables al Dinamómetro KIAG SWISS.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

3.4 Desarrollo de protocolo en mediciones de fuerzas de corte

1. El primer paso es registrar dentro del software DynoWare, los valores de las precargas y especificaciones de calibración, así como de sensibilidad del dinamómetro, para que este tenga un punto de referencia en cuanto a las mediciones. Los datos técnicos del dinamómetro KISTLER KIAG SWISS, ya están establecidas por el fabricante y se pueden observar en la *Tabla 3.14*.

Tabla 3.14 Datos técnicos de dinamómetro KISTLER KIAG SWISS [46].

Rango de calibración	Sensibilidad	Linealidad	Interferencia de señal	
KN	pC/N	$\leq \pm \%FSO$	%	
Fx 0 ... 10	-3.749	0.08	Fx→ Fy -0.6	Fx→ Fz -0.1
Fy 0 ... 10	-3.771	0.14	Fy→ Fx 0.1	Fy→ Fz -1.1
Fz 0 ... 20	-3.987	0.95	Fz→ Fx 0.0	Fz→ Fy 2.5

2. Para cada experimentación es necesario registrar los parámetros de corte según el tipo de rosca y las condiciones de los experimentos. Los parámetros son el paso, la velocidad del husillo (rpm), la velocidad de corte “ V_c ” (m/min), avance “ f ” (mm/rev), velocidad de avance “ V_f ” (mm/min), diámetro exterior “ d ” (mm), revoluciones por minuto “ N ” (rpm) y el número de hilos por pulgada (#h.p.p).

Para realizar la conversión de unidades de los parámetros que requiere el software DynoWare es necesario ocupar las siguientes expresiones:

$$V_c(\text{m/min}) = \frac{\pi d N}{1000} \quad [3.2]$$

$$f(\text{mm/rev}) = \frac{25.4}{\#h.p.p} \quad [3.3]$$

$$V_f(\text{m/min}) = f N \quad [3.4]$$

Para los valores de la profundidad de corte t_0 , y el número de pasadas, se tomarán de acuerdo con tablas de recomendaciones de penetración por pasada, para roscas exteriores ISO unificadas por cada número de hilos por pulgada (#h.p.p.) de Sandvik Coromant. En este trabajo se utilizarán roscas de 7, 14, 18 y 20 h.p.p., por lo que las recomendaciones según Sandvik para el número de pasadas y las profundidades de corte [47].

3. Asignar el rango de tiempo que durará la medición y la frecuencia con que se hará el registro de los datos, en este caso y para registrar el mayor número de datos la frecuencia será de 200 Hz.

Para conocer el rango de tiempo de la medición, es necesario conocer el tiempo de maquinado de cada rosca por pasada, el cual se puede conocer haciendo uso de la *Ecuación 3.5*, donde “ T_M ” (s) es el tiempo de maquinado y “ l ” (mm) es la longitud por roscar.

$$T_M(s) = \frac{l}{fN} 60 \quad [3.5]$$

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Para la configuración del tiempo de medición en el software DynoWare, se tomará en cuenta el tiempo de maquinado y un tiempo extra que equivale al tiempo del recorrido de entrada y salida de la herramienta en el proceso, además que ayuda a garantizar que la medición se realizará durante toda la operación de roscado.

4. Verificar que las gráficas sean congruentes con la medición.

En la *Figura 3.10 a*, se presenta un ejemplo de una gráfica deseada en la cual se puede observar la evolución de las fuerzas de corte en el proceso de torneado de roscas. En la gráfica se muestran las fuerzas en una escala de kilo-Newton vs el tiempo. En este ejemplo se muestran tendencias congruentes en las fuerzas de corte y no existen alteraciones ni discontinuidad en las mediciones.

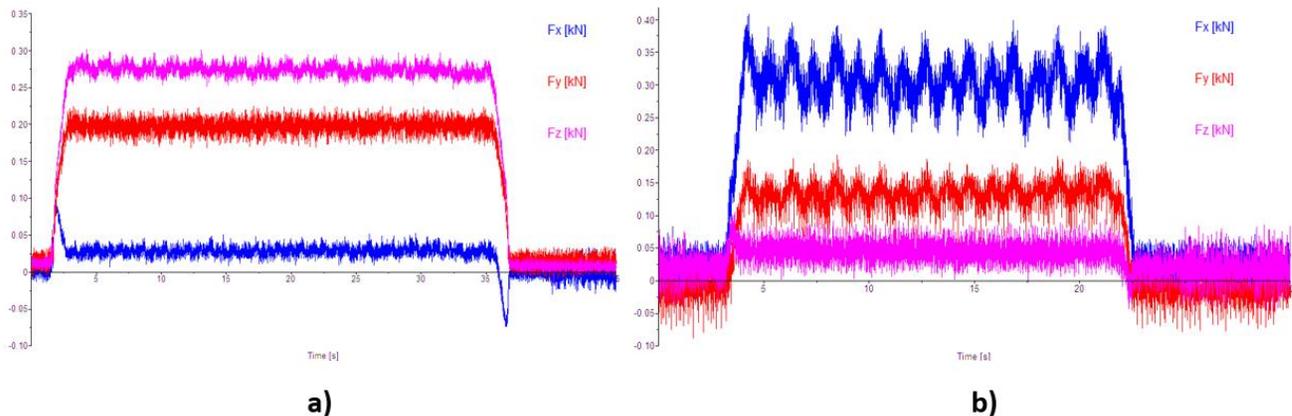


Figura 3.10 a) Gráfica deseada; b) gráfica no deseada. Gráficas obtenidas en DynoWare en operaciones de torneado de roscas.

En la *Figura 3.10 b*, se puede observar un ejemplo de una gráfica no deseada, ya que se puede observar como el valor de las fuerzas no son congruentes; se observa que valores obtenidos para la fuerza “ F_x ” son mayores que los de la fuerza “ F_z ”, lo cual indica un error, en este caso se debe a una mala conexión en el equipo. También en el ejemplo de esta gráfica es posible notar oscilaciones de magnitud considerable entre los valores de las fuerzas y esto se debe a un error de excentricidad procedente de un mal montaje de la probeta en la máquina-herramienta.

Capítulo 4 Análisis gráfico de fuerzas de corte en operación de roscado

4.1 Análisis de las fuerzas que intervienen en el roscado

Para llevar a cabo el análisis de los datos obtenidos en las mediciones, es necesario entender el comportamiento de las fuerzas que se representan de forma gráfica. Como se puede observar en la *Figura 4.1*, las tres fuerzas que están presentes en la operación de torneado de roscas se definen de la siguiente manera: “ F_x ” es la fuerza equivalente a la fuerza radial “ F_r ” y está representada de color azul. “ F_y ” es la fuerza equivalente a la fuerza de avance “ F_t ” y está representada de color rojo. Finalmente, la fuerza “ F_z ” es la fuerza equivalente a la fuerza de corte o fuerza tangencial “ F_c ” y está representado por el color magenta.

La gráfica que se observa en la *Figura 4.1* representa el comportamiento general de las fuerzas de corte durante la operación de roscado, este comportamiento está ligado directamente con los parámetros específicos de la medición, por lo que cada gráfica presenta algunas variaciones. Sin embargo, es importante identificar las diferentes zonas en la gráfica.

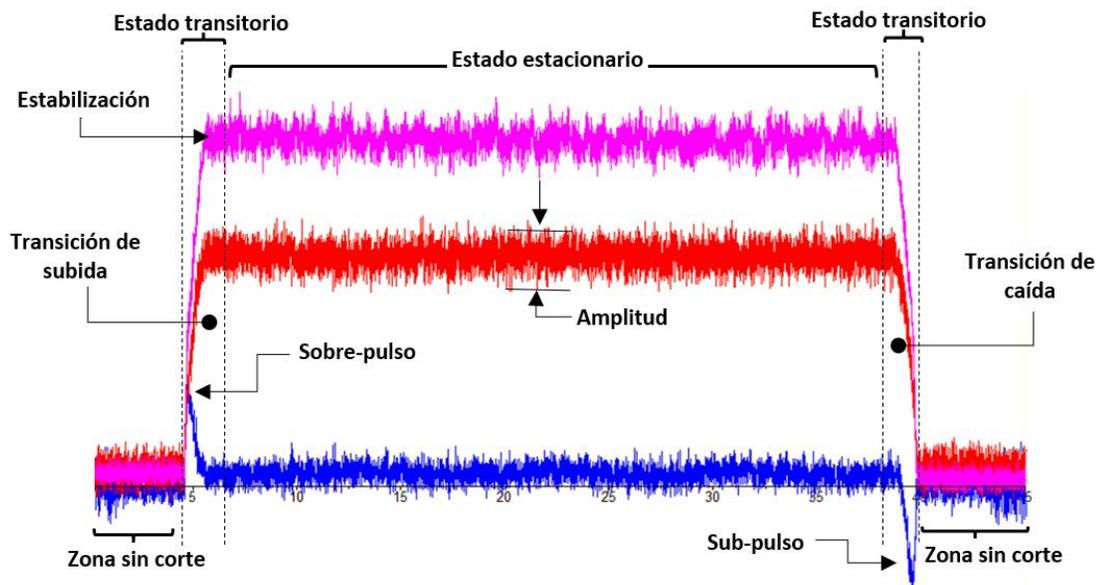


Figura 4.1 Comportamiento de las fuerzas en un proceso de torneado de roscas

La primera zona que se puede observar es la zona sin corte que se aprecia al inicio y al final de la gráfica, en esta zona existe un error de desfase en la medición de aproximadamente 15 N por lo cual se debe corregir restando en cada caso el desfase de los valores obtenidos en la zona de medición con corte.

Otra característica es el desplazamiento de las fuerzas durante la transición de subida, ya que las fuerzas tienen un comportamiento logarítmico y está relacionado con el chafán de entrada y de salida de las secciones para roscar de las probetas.

En las gráficas se puede observar un sobre-pulso y un sub-pulso, los cuales se pueden notar mejor en la fuerza “ F_x ” respecto a las fuerzas F_y y F_z . Para el caso de las fuerzas “ F_y ” y “ F_z ”, no es tan notorio el sobre-pulso y el sub-pulso, ya que el valor de las fuerzas es muy alto en comparación del valor de los pulsos.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

El sobre-pulso se debe a que los piezoeléctricos del dinamómetro se encuentran relativamente en estado estático antes del corte y al inicio del corte se genera un impacto es su estado por lo que se emite este sobre-pulso que es una carga eléctrica intensa que a su vez traduce a una fuerza de magnitud considerable que, sin embargo, es despreciable ya que se encuentra dentro de un estado transitorio y posteriormente los piezoeléctricos se estabilizan y emiten las señales o cargas correctas. El sub-pulso sucede al finalizar el corte, los piezoeléctricos pierden la carga a la que estaban sometidos de una manera súbita por lo que sufren una recuperación y se emite una caída de carga eléctrica abrupta conocido como sub-pulso y finalmente se estabilizan de nuevo.

Todas las gráficas mostraron un comportamiento de estado transitorio y un estado estacionario, el estado estacionario es relativo ya que por definición es un estado invariante en el tiempo y en las gráficas obtenidas es evidente que existe muchas variaciones; Existen varios motivos para que existan estas variaciones, la primera razón es la más sencilla y es que los sensores y los cables de transmisión son muy sensibles por lo que cualquier perturbación por más pequeñas que ésta sea, altera la medición, además al realizar la experimentación en una máquina-herramienta mecánica, es común que existan vibraciones durante el proceso que provocan estas alteraciones. Otra razón para que existan alteraciones es que los materiales generalmente tienen ciertos defectos estructurales y superficiales, derivados de procesos de maquinados previos como el cilindrado para la fabricación de las probetas o por métodos de obtención de la materia prima.

Las variaciones que se generaron en las mediciones no afectan el resultado de este estudio ya que se filtraron los datos obtenidos. El software utilizado DynoWare tiene la capacidad de generar una media aritmética de la sección de estado estacionario que permite obtener un valor más aproximado de las fuerzas reales derivadas de la operación.

Para el análisis se realizará por cada material gráficas donde se observe la evolución de las fuerzas de corte en relación con los parámetros de corte, la tendencia de la potencia unitaria o energía específica experimental y el comportamiento coeficiente de fricción, todo esto relacionado en cada pasada de corte.

4.2 Fuerzas registradas en la experimentación

En cada gráfica mostrada a continuación se observan los resultados de dos experimentos, uno realizado con manteca y otro con aceite como lubricante. Los resultados obtenidos de la manteca se ilustran con líneas gruesas y círculos, los resultados del aceite de corte con líneas delgadas y con rectángulos.



Los colores que distinguen las fuerzas son el magenta para las fuerzas de corte tangenciales " F_z " el rojo para las fuerzas de avance " F_y " y azul marino para las fuerzas radiales " F_x ".

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

4.2.1 Fuerzas de corte obtenidas en Aluminio 2024.

Resultado de probetas de aluminio 2024 de diámetro de una y un cuarto pulgadas (1.25 in).

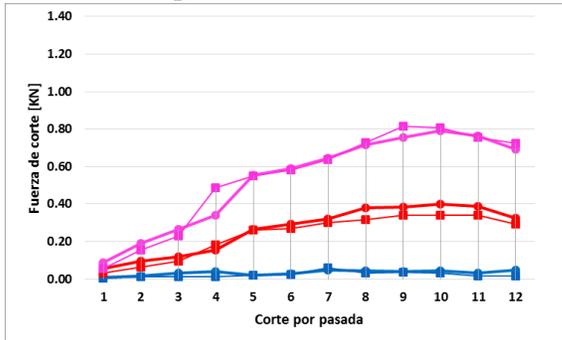


Figura 4.2 Al 2024 de roscas de 1.25 -7 UN a 32 rpm.

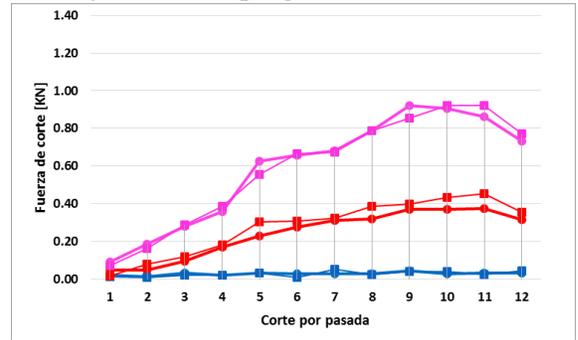


Figura 4.3 Al 2024 de roscas de 1.25 -7 UN a 55 rpm.

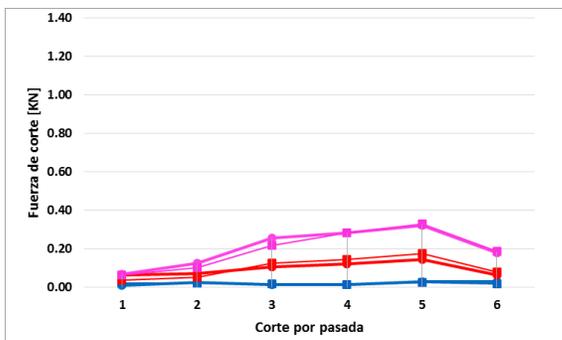


Figura 4.4 Al 2024 de roscas de 1.25 -18 UNF a 32 rpm

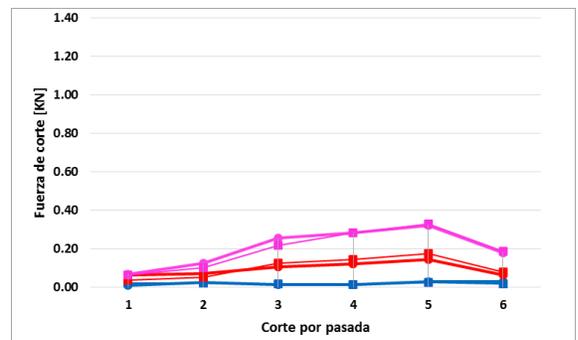


Figura 4.5 Al 2024 de roscas de 1.25 -18 UNF a 55 rpm.

Resultados de probetas de aluminio 2024 de diámetro de una y un octavo pulgadas (1.128 in).

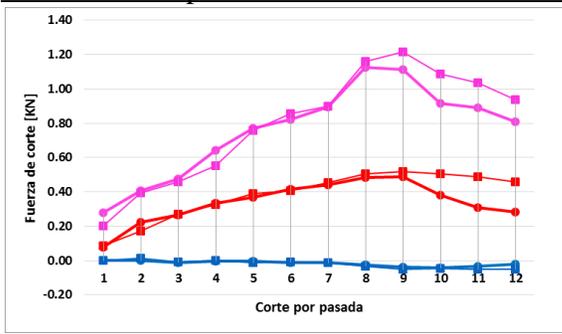


Figura 4.6 Al 2024 de roscas de 1.125 -7 UN a 32 rpm.

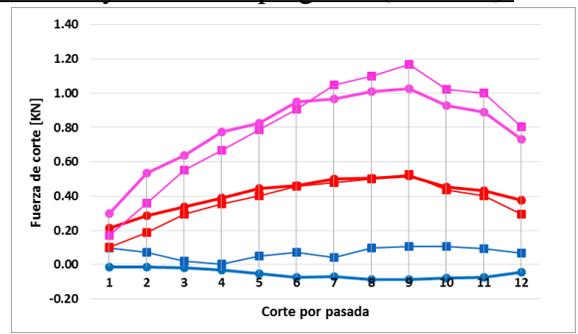


Figura 4.7 Al 2024 de roscas de 1.125 -7 UN a 55 rpm.

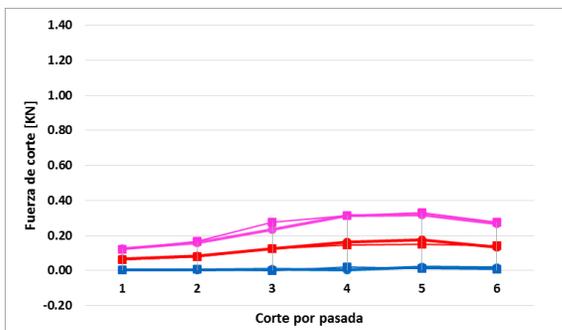


Figura 4.8 Al 2024 de roscas de 1.125 -18 UNF a 32 rpm.

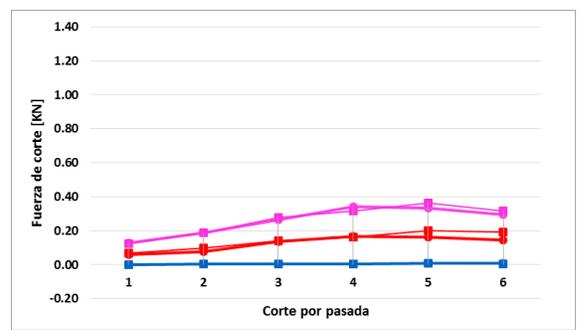


Figura 4.9 Al 2024 de roscas de 1.125 -18 UNF a 55 rpm.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

4.2.2 Fuerzas de corte obtenidas en acero inoxidable AISI 304.

Resultados de probetas de AISI 304 de diámetro de una y un cuarto pulgadas (1.25 in).

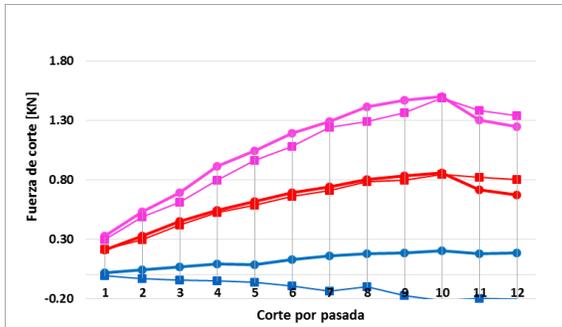


Figura 4.10 AISI 304 de roscas de 1.25 -7 UN a 32 rpm.

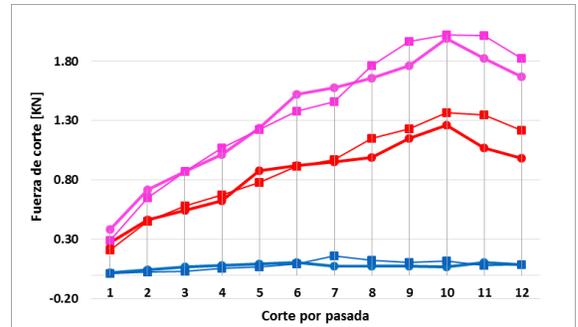


Figura 4.11 AISI 304 de roscas de 1.25 -7 UN a 55 rpm.

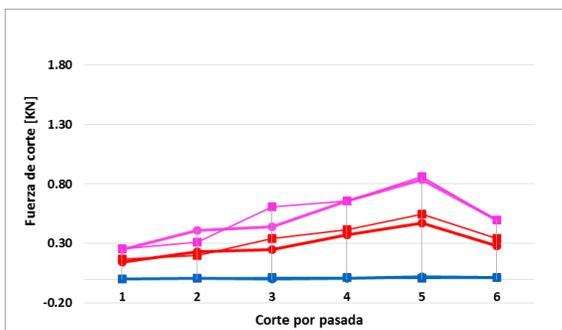


Figura 4.12 AISI 304 de roscas de 1.25 -18 UNF a 32 rpm.

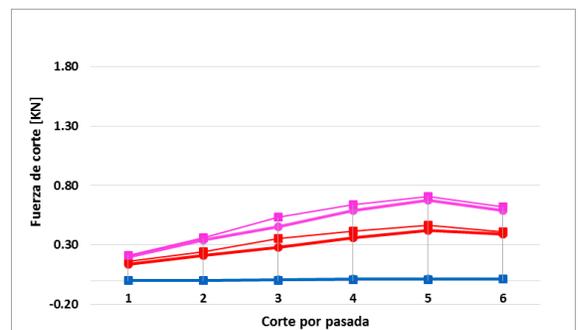


Figura 4.13 AISI 304 de roscas de 1.25 -18 UNF a 55 rpm.

Resultados de probetas de AISI 304 de diámetro de una y un octavo pulgadas (1.125 in).

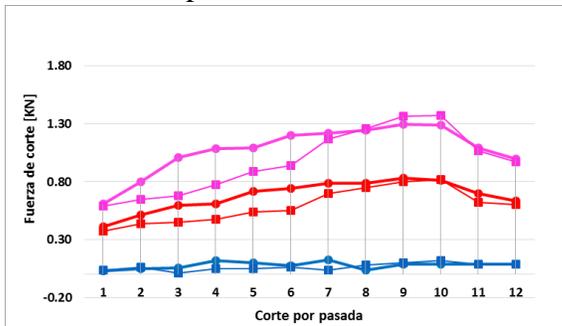


Figura 4.14 AISI 304 de roscas de 1.125 -7 UN a 32 rpm.

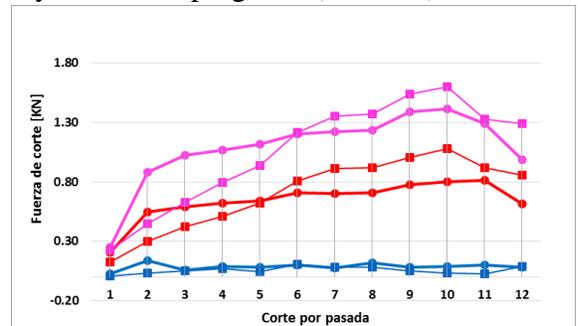


Figura 4.15 AISI 304 de roscas de 1.125 -7 UN a 55 rpm.

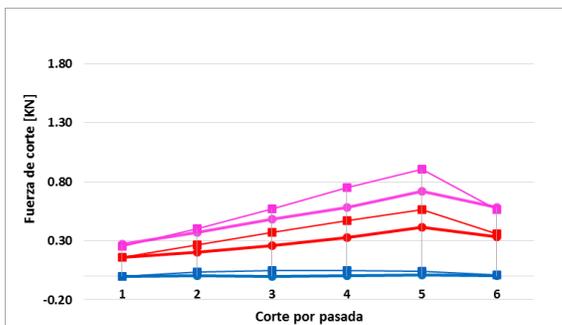


Figura 4.16 AISI 304 de roscas de 1.125 -18 UNF a 32 rpm.

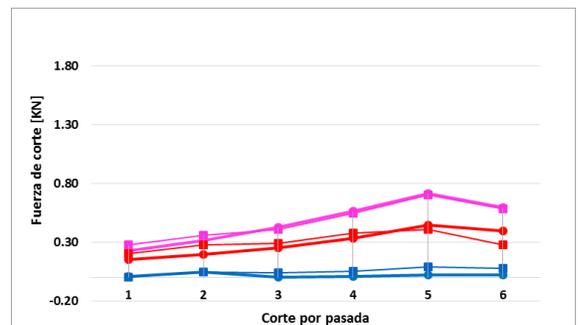


Figura 4.17 AISI 304 de roscas de 1.125 -18 UNF a 55 rpm.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

4.2.3 Fuerzas de corte obtenidas en titanio Ti6Al4V.

Resultados de probetas de Ti6Al4V de diámetro de una pulgada (1 in).

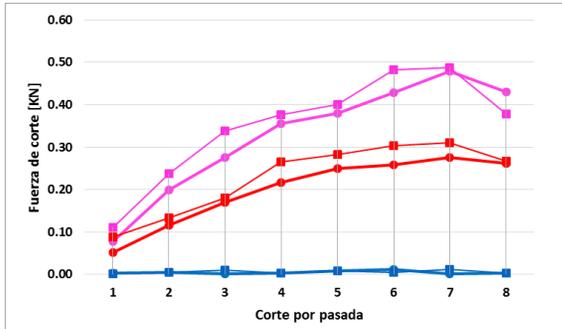


Figura 4.18 Ti6Al4V de roscas de 1 -14 UNF a 32 rpm.

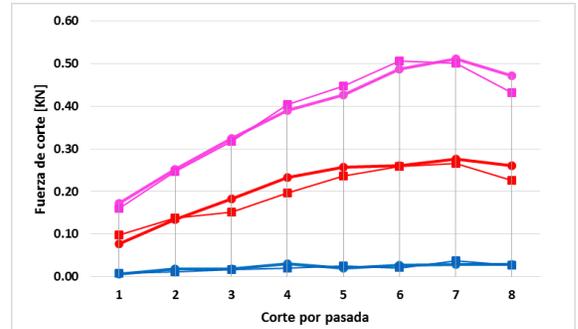


Figura 4.19 Ti6Al4V de roscas de 1 -14 UNF a 55 rpm.

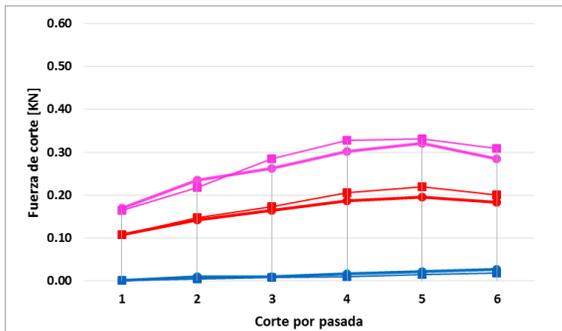


Figura 4.20 Ti6Al4V de roscas de 1 -20 UNEF a 32 rpm.

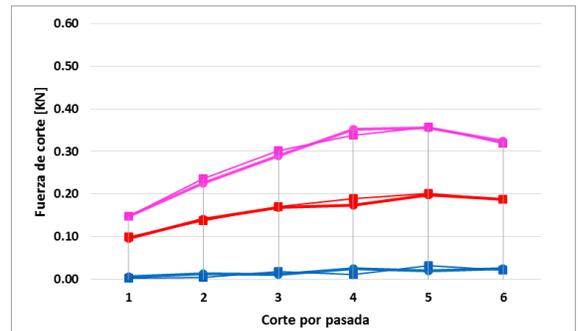


Figura 4.21 Ti6Al4V de roscas de 1 -20 UNEF a 55 rpm.

4.3 Potencia unitaria o energía específica experimental

En cada gráfica mostrada a continuación se observan los valores de la potencia unitaria de cada material, según el tipo de rosca, la velocidad del husillo (32 rpm y 55 rpm) y el diámetro de la rosca (1.25 in y 1.125 in). Los resultados obtenidos de las roscas burdas se ilustran con líneas delgadas y círculos, los resultados de las roscas finas con líneas gruesas y con rectángulos.



Los colores que distinguen los resultados del fluido de corte son el azul claro para la manteca y el amarillo para el aceite.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Potencia unitaria de Aluminio 2024

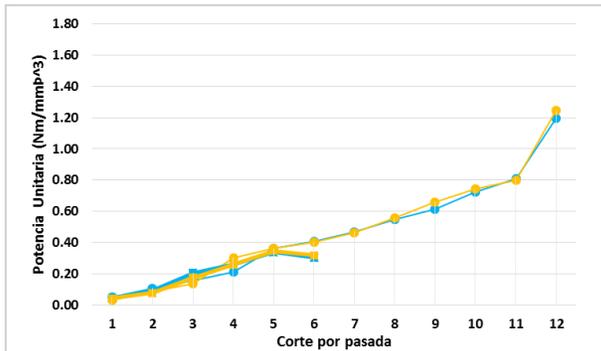


Figura 4.22 Al 2024 de 1.25 in a 32 rpm.

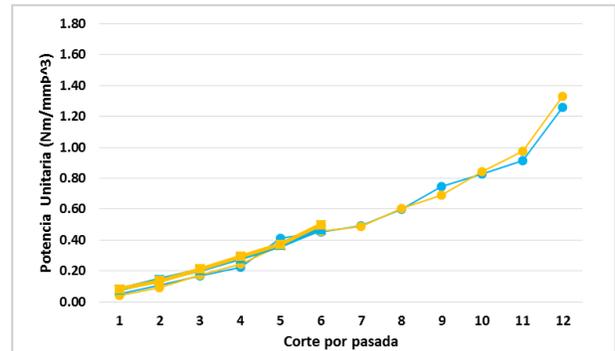


Figura 4.23 Al 2024 de 1.25 in a 55 rpm.

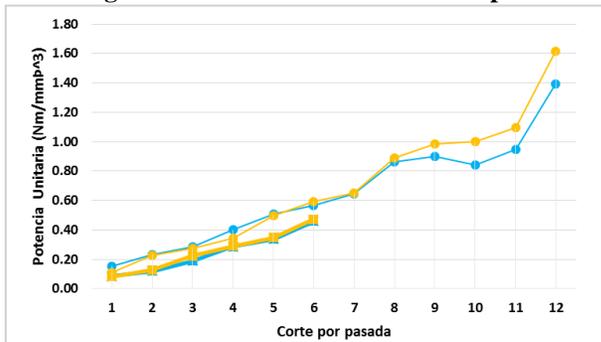


Figura 4.24 Al 2024 de 1.125 in a 32 rpm.

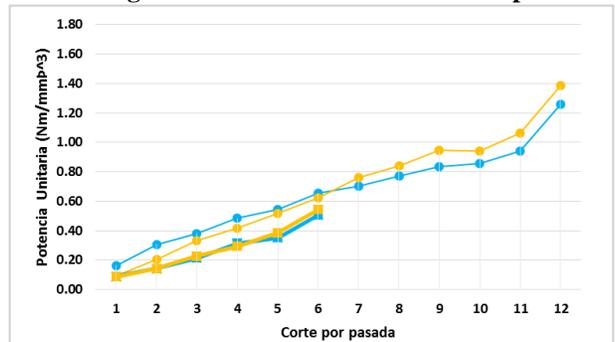


Figura 4.25 Al 2024 de 1.125 in a 55 rpm.

Potencia unitaria de acero inoxidable AISI 304

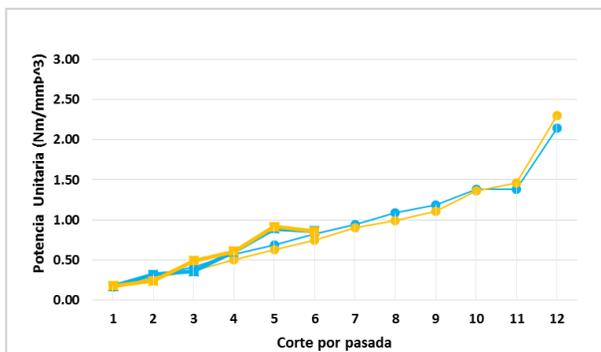


Figura 4.26 AISI 304 de 1.25 in a 32 rpm.

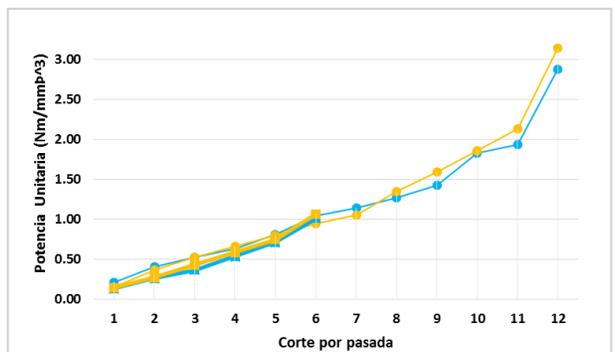


Figura 4.27 AISI 304 de 1.25 in a 55 rpm.

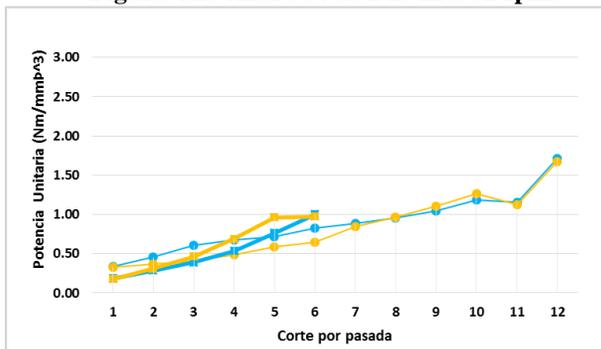


Figura 4.28 AISI 304 de 1.125 in a 32 rpm.

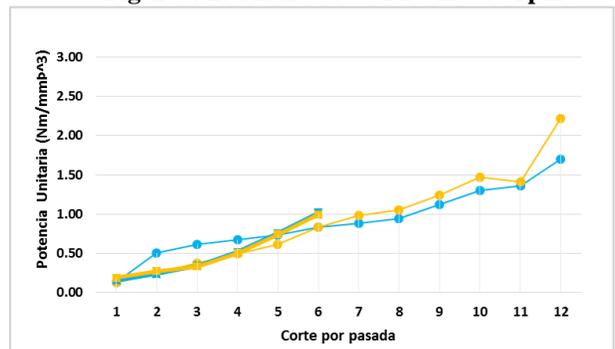


Figura 4.29 AISI 304 de 1.125 in a 55 rpm.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Potencia unitaria de acero Titanio Ti6Al4V

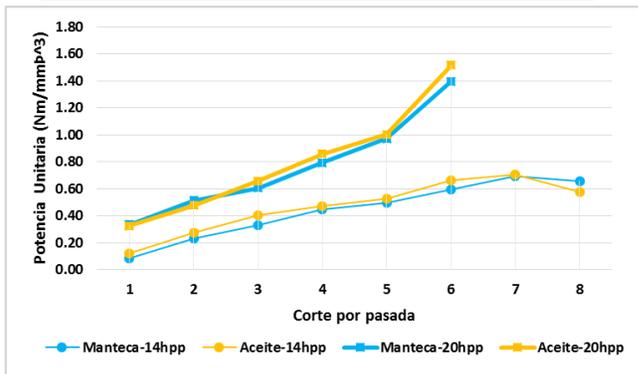


Figura 4.30 Ti6Al4V de 1 in a 32 rpm.

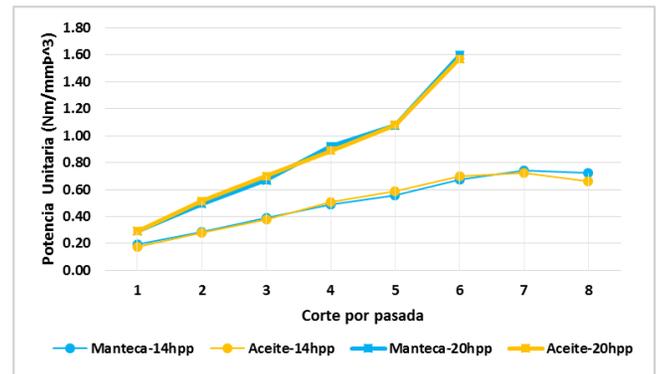
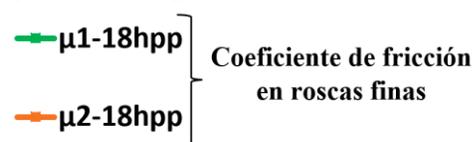
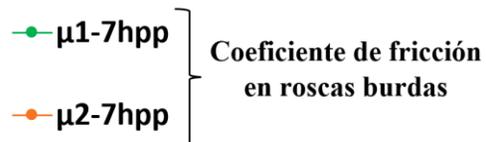


Figura 4.31 Ti6Al4V de 1 in a 55 rpm.

4.4 Coeficiente de fricción

En cada gráfica mostrada a continuación se observan los valores del coeficiente de fricción de cada material. Los resultados obtenidos de las roscas burdas se ilustran con líneas delgadas y círculos, los resultados de las roscas finas con líneas gruesas y con rectángulos.



Los colores que distinguen los resultados del fluido de corte son el verde para la manteca y el anaranjado para el aceite.

Coeficiente de fricción de Aluminio 2024

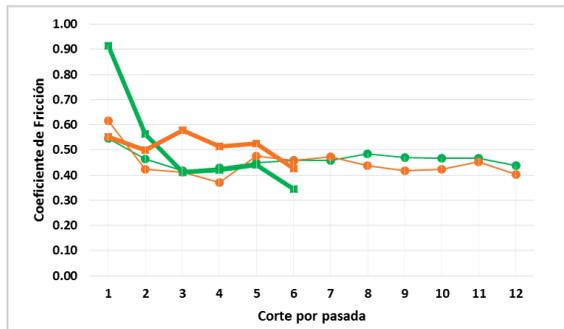


Figura 4.32 Al 2024 de 1.25 in a 32 rpm.

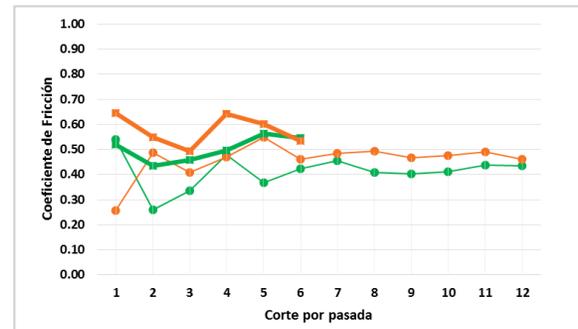


Figura 4.33 Al 2024 de 1.25 in a 55 rpm.

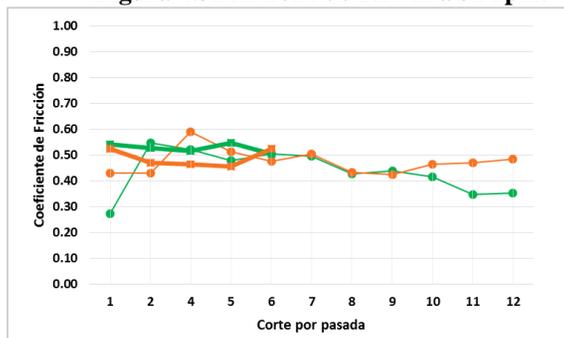


Figura 4.34 Al 2024 de 1.125 in a 32 rpm.

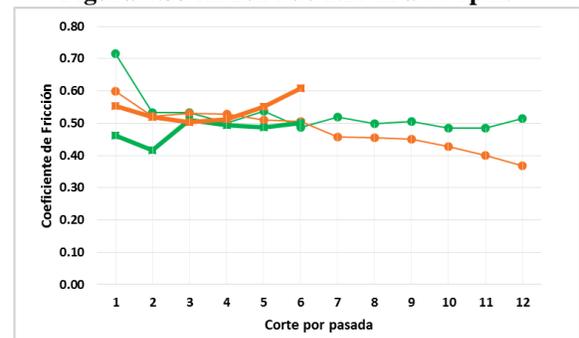


Figura 4.35 Al 2024 de 1.125 in a 55 rpm.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Coeficiente de fricción de acero inoxidable AISI 304

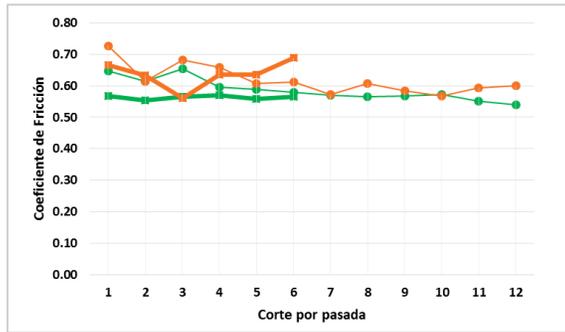


Figura 4.36 AISI 304 de 1.25 in a 32 rpm.

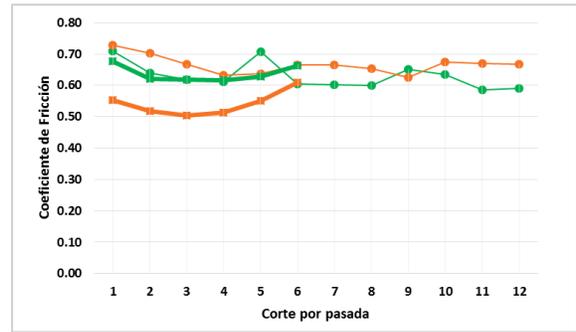


Figura 4.37 AISI 304 de 1.25 in a 55 rpm.

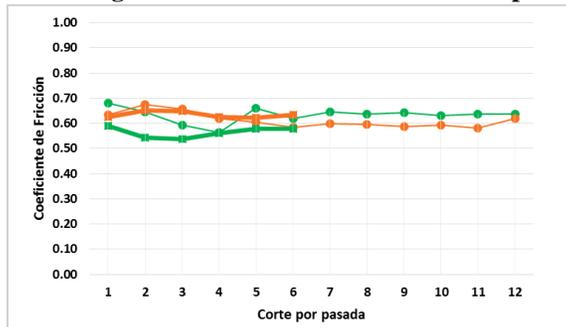


Figura 4.38 AISI 304 de 1.125 in a 32 rpm.

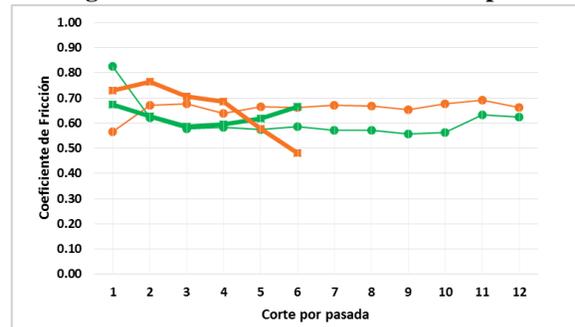


Figura 4.39 AISI 304 de 1.125 in a 55 rpm.

Coeficiente de fricción de titanio Ti6Al4V

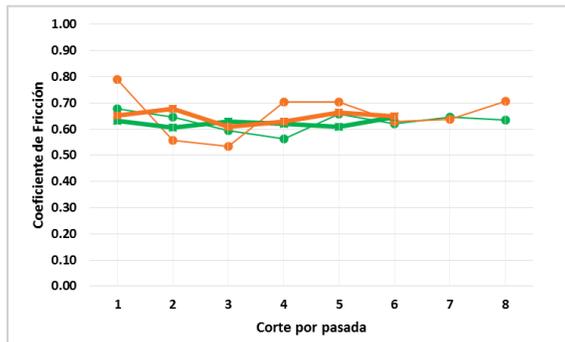


Figura 4.40 Ti6Al4V de 1 in a 32 rpm.

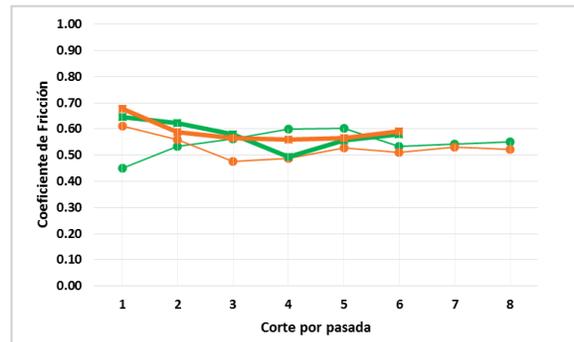


Figura 4.41 Ti6Al4V de 1 in a 55 rpm.

4.5 Análisis de resultados

Para llevar a cabo el análisis de resultados se realizó un estudio individual y uno comparativo por material, tomando en cuenta los parámetros de corte para determinar la influencia del fluido de corte, la velocidad de husillo, el diámetro mayor y el paso de la rosca en las fuerzas de corte. Por otra parte, se realizó un análisis cualitativo del acabado superficial y geométrico de las roscas y del tipo de viruta generada, donde se hace una inspección visual a partir del fluido de corte utilizado durante los experimentos.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Para el análisis cualitativo de las roscas se realizó una inspección visual donde se tomó en cuenta la cantidad de residuos de viruta en las crestas, así como la uniformidad de la superficie de los filetes de la rosca. Para este análisis se utilizó un patrón para cuerdas externas unificadas, para comprobar si el perfil geométrico se generó correctamente (*Figura 4.42*).



Figura 4.42 Inspección visual con ayuda de patrón para cuerdas externas unificadas.

Análisis de fuerzas de corte:

En general el comportamiento de las fuerzas de corte fue incremental en cada pasada y decreciente en la las ultimas pasadas. Para el caso de las roscas de paso burdo las fuerzas máximas se obtuvieron alrededor de la novena y décima pasada de doce pasadas realizadas, y para el caso de las roscas de paso fino y extrafino se obtuvieron en la penúltima pasada de seis pasadas que se realizaron para las roscas de 18 y 20 h.p.p., y de ocho pasadas para las roscas de 14 h.p.p. El comportamiento general de las fuerzas de avance “ F_y ”, sigue la misma tendencia que para las fuerzas “ F_z ”, solo que con valores de 30 o 40% menores. Para el caso de las fuerzas “ F_x ” en general se obtuvieron valores muy cercanos a cero, a excepción para las roscas de acero inoxidable AISI 304 que obtuvieron valores de hasta 150 N en las roscas burdas, pero en general los valores de la fuerza “ F_x ” en los otros materiales oscilaban entre 5 y 60 N.

En cuanto a las fuerzas obtenidas con el fluido de corte es posible observar que en la mayoría los casos los valores de las fuerzas de corte son más altas con el uso de aceite como fluido de corte que con manteca, aunque cabe destacar que en todos los casos la diferencia de fuerzas es muy pequeña, sin embargo, este resultado se puede relacionar con el análisis de acabado superficial y geométrico y en análisis del tipo de viruta.

Para el caso de las roscas de aluminio 2024 y las de acero inoxidable AISI 304, el acabado superficial a simple vista es mejor con el uso de manteca en comparación del aceite; para las roscas de titanio Ti6Al4V, en ambos casos, con aceite y con manteca, se obtuvieron buenos acabados superficiales y geométricos. En cuanto a las virutas generadas con las roscas de aluminio 2024 y las de acero inoxidable 304 con el uso de aceite son dentadas y presentan grandes deformaciones mientras que las virutas obtenidas con mantecas son continuas. Para las virutas obtenidas de la operación de roscado en titanio Ti6Al4V, en ambos casos fueron virutas continuas donde no se aprecia deformaciones significativas.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

El paso o el número de hilos por pulgadas fue un parámetro muy importante en cuanto a las fuerzas de corte, ya que en los resultados de las roscas en aluminio 2024 y de acero inoxidable AISI 304 se puede observar que para una rosca burda el valor de su fuerza máxima es aproximadamente de un 200 hasta un 400% más grande que en una rosca fina utilizando los mismos parámetros. Para las roscas en titanio Ti6Al4V, también se confirma que las fuerzas máximas se presentan para un paso mayor pero solo se corroboró con un paso fino y un paso extra-fino (14 h.p.p y 20 h.p.p.).

En cuanto a los parámetros de la velocidad de husillo y diámetro mayor de la rosca se obtuvo como resultado que las fuerzas de corte son muy parecidas tanto para una velocidad de husillo de 32 rpm y 55 rpm, así como para un diámetro mayor de 1.25 y 1.125 pulgadas, teniendo diferencias de fuerzas mínimas de no más de 100 N por lo que complica dictaminar un resultado comparativo donde se determine la influencia del diámetro y la velocidad del husillo en las fuerzas de corte.

En el análisis de las fuerzas obtenidas por material, se aprecia que la aleación de titanio Ti6Al4V y la de aluminio 2024, presentaron valores similares mientras que el acero inoxidable AISI 304 obtuvo valores mayores de hasta un 200%.

Análisis de potencia unitaria experimental

El comportamiento de la potencia unitaria experimental muestra una pendiente ascendente en cada pasada durante el proceso de generación de la rosca, lo cual es un resultado esperado, debido a que en cada pasada se remueve más material que la pasada anterior y por tanto se necesita más potencia para llevar a efecto el corte.

En las *Gráficas 4.24 a 4.31*, se observa que para la aleación de aluminio 2024 y la aleación de acero inoxidable AISI 304 en todos los experimentos el comportamiento de la potencia unitaria fue uniforme tanto para roscas burdas, fluido de corte, diámetro de la rosca y velocidad de husillo. Para la aleación de Ti6Al4V se observa que hay una notable diferencia en la pendiente generada entre las roscas burdas y las finas, donde en las finas se presentan una pendiente mayor.

Análisis del coeficiente de fricción

En las *Gráficas 4.32 a 4.41* se observa que el comportamiento del coeficiente de fricción donde se aprecia que en las primeras pasadas existen muchas variaciones, pero tiende a estabilizarse y a mostrar un comportamiento de valor constante.

Para la aleación de aluminio el coeficiente de fricción promedio es de 0.46, para el acero inoxidable AISI 304 es de 0.61 y del titanio Ti6Al4V de 0.6, los cuales son valores muy aceptables y congruentes, pero cabe destacar que estos valores son un poco altos para tratarse de procesos donde se utilizaron agentes lubricantes.

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El objetivo general de este trabajo se cumplió exitosamente; se obtuvieron datos muy favorables que nos ayudaron a mejorar el entendimiento sobre el proceso de torneado de roscas, además fue posible encontrar una relación concreta entre los parámetros de corte más representativos en la operación y como estos influyen en las fuerzas de corte y a su vez en el acabado superficial y geométrico de las roscas.

Se obtuvo una buena primera etapa de desarrollo tomando en cuenta que este trabajo es pionero en cuanto al estudio de fuerzas de corte en una operación compleja y poco estudiada como lo es el torneado de roscas. El protocolo diseñado para la realización de este trabajo tuvo muchas depuraciones y correcciones durante todo el proceso que a su vez permitieron llegar al punto en que los experimentos realizados fuesen reproducibles y confiables, además los datos obtenidos, fueron coherentes y cercanos a los valores teóricos.

Se confirmó que el parámetro más importante y determinante en las fuerzas de corte es en definitiva el material de trabajo y sus propiedades; tanto la dureza, el módulo de elasticidad y la capacidad de maquinabilidad son las propiedades más importantes para llevar a cabo el proceso de arranque de viruta. Sin embargo, la potencia unitaria o energía específica del material es la que determina principalmente el valor de las fuerzas de corte.

Los resultados que obtuvo la manteca como fluido de corte fueron muy relevantes, ya que es un método muy empírico y del cual no existe mucha información en la literatura, lo que hace que estos resultados tengan un mayor valor, ya que de manera experimental se pudo comprobar que el uso de un agente natural a base de manteca animal puede aportar grandes beneficios al proceso de torneado de roscas, se observó que aunque fue poca la diferencia, las fuerzas que se obtuvieron con este fluido fueron menores y esto se reflejó en un mejor acabado superficial en las roscas, lo que nos da bases para trabajos a futuro donde se siga estudiando este método y corroborar sus beneficios. La única implicación que se identificó en cuanto al uso de manteca es que su adecuada manipulación depende de la temperatura ambiente, ya que a temperaturas altas la manteca adopta un estado líquido y a temperaturas bajas un estado sólido y en otras ocasiones una combinación de ambos además trae como consecuencia que una vez terminada la operación, las roscas quedan con bastantes residuos de manteca en su superficie.

Este trabajo no solo se enfocó al estudio de las fuerzas de corte en operaciones de roscado, sino que también se obtuvieron datos experimentales de potencia unitaria y de coeficiente de fricción de los materiales estudiados, aluminio 2024, acero inoxidable AISI 304, y titanio Ti6Al4v que son datos de gran utilidad para mejorar la manipulación de estos materiales en procesos con arranque de viruta.

5.2 Recomendaciones y trabajos a futuro

Debido a que este trabajo es solamente una primera etapa en cuanto al desarrollo de mediciones de fuerzas de corte en torneado de roscas, existen varias recomendaciones que son necesarias para darle una continuidad a este trabajo, de tal manera que se tiene la posibilidad de obtener nuevos datos que ayuden a mejorar los conocimientos adquiridos a partir de esta operación.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

Las principales recomendaciones son:

- Diseñar una serie de experimentos donde se integren nuevos parámetros como geometría de la herramienta, material de la herramienta, método de penetración (radial, en flancos, así como incremental), número de pasadas de corte, etc.
- Generar probetas para realizar experimentos con roscas métricas y estándar izquierdas, teniendo presente la posibilidad de fabricar roscas internas con las mismas designaciones de las externas y comparar fuerzas de corte, geometría de los perfiles y acabado superficial.
- Fabricar probetas para roscas especiales para usos particulares como, por ejemplo: roscas cónicas, rosca cuadradas, etc.
- Realizar experimentos agregando velocidades del husillo entre 32 y 200 rpm en los experimentos, además de mayor diversidad de diámetros en las probetas a roscar y diferentes tipos de fluidos de corte etc.
- Contemplar la posibilidad de instalar los sensores de medición de fuerzas en un torno de control numérico (CNC).
- Realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales para verificar que los datos de los fabricantes coincidan con los reales.
- Realizar pruebas de dureza antes y después de la generación de las roscas para verificar si la dureza se modifica debido al proceso.
- Efectuar mediciones de temperatura durante el experimento en la zona de corte y verificar si coincide con la temperatura teórica.
- Realizar un análisis metalográfico de las virutas obtenidas para observar si existen cambios en la microestructura.
- Realizar pruebas de rugosidad para determinar la calidad superficial de las roscas maquinadas.
- Realizar un análisis de la superficie de la herramienta para medir su desgaste después de la operación y verificar si este valor se aproxima al valor teórico utilizando la ecuación de Taylor.
- Someter a un análisis microscópico el perfil de las roscas generadas para evaluar su calidad dimensional y geométrica.
- Comprobar si el uso de la manteca como fluido de corte obtiene los mismos resultados en otras operaciones de corte.
- Implementar este protocolo en otras operaciones de corte con herramientas de forma, y en nuevas aleaciones de las que no exista información en cuanto a sus parámetros de maquinabilidad.

Todas estas recomendaciones tienen el fin de obtener una mayor cantidad de información que respalden los resultados obtenidos en este trabajo, además de que proporcionarían datos de gran utilidad para mejorar el rendimiento del proceso.

Bibliografía

- [1] B. Xavier, «Interempresas,» 20 Octubre 2010.
<http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/43391-Evolucion-historica-de-las-herramientas-manuales.html>.
- [2] S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Volumen 2. Porcesos de manufactura*, México: PEARSON, 2014.
- [3] M. E. Amestoy, *Principios de mecanizado y Planificación de Procesos*, Cartagena: Uniuerisdad Politécnica de Cartagena, 2007.
- [4] S. T. Chiriacescu, *Stability in the Dynamics of Metal Cutting*, Romania: ELSEVIER, 1984.
- [5] SANDVIK, «Maquinabilidad,» SANDVI Coromant. http://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/materials/workpiece_materials/machinability_definition.
- [6] Stewart C. y Black, *Principios de Ingeniería de Manufactura*, México: CONTINENTAL, 1999.
- [7] M. P. Groover, *Introduccion a los Procesos de Manufactura*, Mc Graw Hill, 2012.
- [8] E. LUNDGREN, «La productividad de las herramientas de plaquitas intercambiables,» *Sandvik AB*, pp. A-38 a A-41.
- [9] G. M. D. K. G. ABATE, «Rendimiento de Insertos de Metal Duro No Recubiertos, en Operaciones de Torneado,» Octubre 2013. [En línea].
- [10] C. F. Galvan, *Análisis Del Desgaste Progresivo En La Herramienta De Maquinado Utilizando La Ecuación De Taylor*, D. J. J. C. Cabello, Ed., Universidad Nacional Autónoma, Facultad De Ingeniería, 2015.
- [11] L. A. Garcia Jaramillo y M. A. Alban Chapiro, *Análisis y Selección de Herramientas de Corte, Geometría y Composición para el Mecanizado del Acero AISI 4340, Basado en los Parámetros de la Ecuación de Taylor y los Criterios de Desgaste del Flanco y Craterización*, Guayaquil: Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, 2011.
- [12] J. A. H. Rodriguez, *Analisis Numerico Experimental De Aceros De Alta Resistencia Derivados De Conformacion Plasrtica Sometidos A Procesos De Arranque De Viruta*, Instituto Politecnico Nacional , 2011.
- [13] G. Eskola, *Mecanica Del Corte. Fundamentos*, Departamento De Ingenieria Mecanica, Escuela Superior De Ingeniería.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- [14] I. Hernandez Alvarez Y A. Vazquez Garduño, *Método Simplificado Para La Selección De Tornillería Milimétrica Y American Estandar Americana*, Escuela Superior De Ingeniería Mecánica Y Electrica; Unidad Profesional Azcapotzalco; Instituto Politecnico Nacional.
- [15] M. A. G. Portero, *Estudio Del Efecto Del Sistema De Mínima Cantidad De Lubricante (Mql) Con Aceite Vegetal En El Acabado Superficial Del Fresado Del Acero Inoxidable Aisi 304*, Ambato: Universidad Técnica De Ambato, Facultad De Ingeniería Civil Y Mecánica, 2016.
- [16] C. d. Monroy, *Mecanizado de Metales*, I. E. S. ed., p. 7.
- [17] Sanchez Carrilero, M. Marcos, Álvarez Alcón y Sanchez Corbacho, «Evaluación de la calidad superficial de piezas mecanizadas apartir del análisis de la fuerza de corte,» *Revista de Metalurgia*, pp. 27-31, 1998.
- [18] H. Álvaro Gonzalez, E. A. García y F. Marín Cano, «Diseño Y Construcción De Un Dinamómetro Para La Medición De La Fuerza De Corte En El Proceso De Arranque De Viruta,» n° 27, p. 6, Abril 2005.
- [19] T. Jagadeesha, *Force system in orthogonal cutting*, Calicut.
- [20] M. Diccionario de la Real Academia de Ingeniería; <http://diccionario.raing.es/es/lema/rosca-0>.
- [21] M. Diccionario de la Real Academia de Ingeniería; <http://diccionario.raing.es/es/lema/tornillo> .
- [22] E. G. Frederick , M. Alva, C. S. Hernry, L. H. Ivan , T. D. John, E. N. James y L. Shawna, *Dibujo Técnico con Gráficos de Ingeniería*, México: PEARSON, 2013.
- [23] G. Refenrence, «Roscas de Tornillos Estandarizadas,» In- Depth Information; <http://what-when-how.com/Tutorial/topic-435p7v8g/Dibujo-y-Comunicacion-Grafica-409.html>.
- [24] K. E. Aguas Mosquera Y F. Salinas Toledo, «Diseño Y Construcción De Una Máquina Roscadora Para Tubos Desde Un Cuarto Hasta Cuatro Pulgadas De Diámetro Para Proasin,» *Proyecto Previo A La Obtención Del Título De Ingeniero Mecánico*, p. 118, 2013.
- [25] BULMETAL, «Elementos Roscados,» *Buloneria Industrial* .
- [26] S. Coromant, ROSCADO " Torneado y fresado de roscas".
- [27] Z. A. Fabrikazioaren, «Tolerancias Dimensionales,» Centro Avanzado de Fabricación; <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/proyecto-medicion-tridimensional-en-fabricacion-mecanica-con-equipos-portables/tolerancias-dimensionales>.
- [28] I. A. M. Benitez, *Análisis Macro Y Micro Estructural De Esfuerzos En Birlos De Transporte Pesado*, México, D.F: Instituto Politecnico Nacional , 2009.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- [29] G. S. SEAS, «Teoría Del Taller, Procesos De Mecanizado, http://www.fnmt.es/documents/10179/6968622/TEORIA+DE+TALLER_modulo+4/c796d676-5d3b-4794-9b56-db52c8d69fe4.
- [30] S. Palmer Vargus y K. Kanagowaski, «Metalmecánica Internacional,» septiembre 2003. <http://www.metalmecanica.com/temas/Como-roscar-en-un-torno+7028174?pagina=1>.
- [31] SCADO, «Información tecnica de roscado,» *DROSCADO* , p. 60.
- [32] S. Palmer Vargus Y M. Kanagowaski, «METALMECANICA Internacional,» Septiembre 2003. <http://www.metalmecanica.com/temas/Como-roscar-en-un-torno+7028174?pagina=2>.
- [33] D. d. I. R. A. d. Ingeniería, «Definición de extensimetría»; <http://diccionario.raing.es/es/lema/extensometr%C3%ADa> .
- [34] A. F. S. F. A. F. Thomas Burkhardt, «Sensores de Desplazamiento y Distancia,» BALLUEF, http://www.nortecnica.com.ar/pdf/teoria_sens_desp_dist.pdf .
- [35] KISTLER, «Cutting Force Measurement,» <https://www.kistler.com/mx/es/aplicaciones/tecnologia-de-sensores/medicion-de-la-fuerza-de-mecanizado/>.
- [36] KISTLER, «Equipo de medición de fuerza en mecanizado,» <https://www.kistler.com/mx/es/aplicaciones/tecnologia-de-sensores/medicion-de-la-fuerza-de-mecanizado/> .
- [37] «Especificaciones técnicas de torno TTITANIUM BJ-1640D,» <https://maquinarianuevagdl.jimdo.com/titanium-bj-1640d/> .
- [38] Traverstool, «Especificaciones técnicas de inserto TMNC-NV,» https://www.traverstool.com.mx/categoria/hcar_37.html.
- [39] TTRAVERSTOOLS, «Datos técnicos de porta insertos MTVO,» http://www.traverstool.com.mx/hcar_62_10/55-915-805.html .
- [40] A. E. system, «Ti6Al4V Titanium Alloy,» *CAD TO METAL*.
- [41] G. Fellow, «Acero Inoxidable, AISI 304 (Fe/Cr18/Ni10),» Todos los materiales para Investigación Científica y Fabricación, 2017. <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-304.html>.
- [42] A. y. Metales, «Aluminio 2024,» Distribuidores especialistas en aluminio, 2013. <http://www.aluminiosmetalesunicornio.com.mx/2024.html>.
- [43] MATWEB, «MatWeb, Your Source for Materials Information,» MATWEB, 2017. http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=67d8cd7c00a04ba29b618484f7ff7524.

Análisis experimental de las fuerzas de corte en operaciones de roscado

- [44] KISTLER, «Certificado de calibración Type KISTLER 9263». S. Mogavero Patente SERIAL No. 65180, octubre 2014.
- [45] S. Coromant, «Roscas, Guía de aplicación,»
<https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/es-es/c-2920-031.pdf>.
- [46] L. W. Hernandez Gonzalez, R. Perez Rodriguez, P. C. Zambrano Robledo y H. Toscano Reyes, «Estudio del rendimiento del torneado de alta velocidad utilizando el coeficiente de dimensión volumétrica de la fuerza de corte resultante,» *Revista de Metalurgia* , pp. 245-256, 2013.
- [47] DEXTECH, *Roscas*, Dexter Fastener Technologies Ing.
- [48] L. Warren J Y D. Jon M, Fundamentos De Dibujo En Ingenieria, Decimo Primero Ed.
- [49] M. M. COMPUTING, «InstaCal,» <https://www.mccdaq.com/daq-software/instacal.aspx> .

Nota: Todas las imágenes e ilustraciones fueron elaboradas por el autor de este trabajo, las ilustraciones se realizaron con el apoyo de software de diseño Unigraphics NX 10.