



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS
FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES
DE CILINDRADO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

DANIEL ROLDÁN PÉREZ

DIRECTOR DE TESIS

M. I. Ignacio Cueva Güitron



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Junio de 2016

Dedicatoria

A mis padres:

Myriam Pérez B.

Félix Roldán F.

A mis hermanas:

B. Melissa Roldán P.

C. Ximena Roldán P.

Agradecimientos

A mis padres que simplemente no tengo palabras para agradecerles su apoyo y confianza incondicional.

A toda mi familia que hemos pasado por momentos tan difíciles, pero siempre ha existido en cada uno de nosotros la fuerza necesaria y esperanza para seguir adelante.

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por las indescriptibles aportaciones a mi formación profesional y darme un sentido de pertenencia.

A mi Facultad de Ingeniería que sin ella no hubiera sido posible formarme como Ingeniero.

A mi director de tesis M.I. Ignacio Cueva Güttron, por confiar en mí y tomarse el tiempo de su asesoría y enseñanza para sacar adelante este proyecto.

A mi amigo Oscar Quezada González por sus consejos y todo el apoyo proporcionado para terminar este proyecto.

A todos aquellos que contribuyeron a este proyecto, la suma de su ayuda ha sido un factor importante para finalizarlo.

A mis sinodales:

Dr. Armando Ortiz Prado.

M.C. Ubaldo Eduardo Márquez Amador.

Dr. Adrián Espinosa Bautista.

Ing. Roberto Cisneros Hernández.

Por el tiempo dedicado a realizar observaciones y aportaciones para mejorar este proyecto.

A la dirección general de asuntos de personal académico (DGAPA), por la aportación de recursos financieros para el instrumental de medición utilizado en este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	4
1.1 Estado del arte	4
1.2 Visión tecnológica a futuro	5
1.3 Investigaciones referentes a la medición de las fuerzas de corte	6
1.4 Mecanizado	8
1.5 Operaciones de maquinado con arranque de viruta	8
1.6 Torneado	9
1.7 Máquinas para torneado.....	11
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE TORNEADO	13
2.1 Parámetros de corte.....	13
2.2 Fuerzas de corte en el cilindrado	15
2.3 Cálculo de la fuerza de corte.....	18
2.4 Temperatura en el proceso de torneado	19
2.5 Fluidos en el proceso de corte	20
2.6 Herramientas de corte para el proceso de torneado.....	21
2.7 Desgaste de las herramientas de corte.....	23
2.8 Operaciones de torneado	24
2.9 Maquinabilidad de los materiales.....	25
2.10 Tipos de viruta formada en el corte de metales	25
2.11 Selección de las condiciones de corte.....	26
2.12 Rugosidad superficial	28

2.13 Tolerancias	29
CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE FUERZAS DE CORTE	30
3.1 Descripción de herramientas y equipo de medición.....	30
3.2 Procedimiento para el desarrollo de la medición experimental.....	37
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE LA MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE	44
4.1 Análisis de resultados.....	44
4.2 Comportamiento de la fuerza de corte para aluminio 6061 T6.....	45
4.3 Comportamiento de la fuerza de corte para acero 1018.....	51
4.4 Comportamiento de la fuerza de corte para acero inoxidable 304.....	57
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	64
5.1 Conclusiones.....	64
5.2 Recomendaciones	65
Referencias.....	66

INTRODUCCIÓN

La demanda de profesionales con bases sólidas en las diferentes áreas de conocimiento de las ingenierías, en este caso en el área de manufactura. Es cada día mayor ya que se requiere de profesionales calificados. En uno de los temas en donde se demanda cada día mayor número de ingenieros con robusta formación teórica y de amplios conocimientos técnicos, es la de operaciones que involucran el arranque de viruta para la obtención de piezas geométricas determinadas, tolerancias muy cerradas y acabados de alta calidad.

Con el estudio de los procesos de mecanizado por arranque de viruta se busca una generación de una guía práctica donde se analicen dichos procesos como una herramienta que fortalezca los conocimientos teóricos a través de experimentos, los cuales involucran cálculos de algunas variables que intervienen en dichos procesos.

Un ingeniero con conocimiento basto en los procesos de manufactura y dominio de los parámetros de mayor incidencia en las operaciones de corte, será capaz de generar soluciones óptimas en la manufactura de piezas que involucran ajustes, tolerancias dimensionales, así como rugosidades que permitan un correcto funcionamiento y la alta calidad dentro de estándares internacionales.

El presente trabajo consta de cinco capítulos donde se explica el proceso de medición experimental de las fuerzas de corte y los parámetros que se ven involucrados en dicho proceso.

En el primer capítulo se encontrara el estado del arte referente a los procesos de mecanizado, evolución histórica, actualidad y tendencias al futuro, así como también aborda los principios del proceso de mecanizado por arranque de viruta, haciendo énfasis en el proceso de cilindrado con torno, donde se explican los parámetros involucrados, tales como fuerzas y consideraciones en el mecanizado de piezas.

El segundo capítulo describe paso a paso el impacto que tienen los parámetros involucrados en el proceso de maquinado con las fuerzas de corte y el efecto que tienen las herramientas de corte en dicho proceso.

El capítulo tres explica a detalle los experimentos de medición, los instrumentales de acoplamiento que sirvieron para los dinamómetros, así como los parámetros que se consideraron para el experimento.

El cuarto capítulo contiene un análisis básico de las mediciones experimentales de las fuerzas de corte en el proceso.

Finalmente en el capítulo cinco se dan las conclusiones de esta primera etapa, donde se realizaron experimentos con diferentes materiales, con iguales parámetros de corte para lograr repetibilidad y reproducibilidad de los experimentos, buscando que la documentación recabada en esta tesis sea de gran utilidad para fines didácticos, con el fin de utilizarse como una herramienta de enseñanza, donde se espera que los alumnos y el personal académico puedan efectuar prácticas escolares, visualizar de una mejor manera el proceso y lograr despertar interés para futuros proyectos.

Es importante hacer notar que para dar continuidad al trabajo ya realizado sobre el proceso de torneado, se incluye el desarrollo de los experimentos y su validación a través de pruebas. Con lo anterior se busca que en un futuro alumnos de generaciones posteriores pueden involucrarse de manera activa en el proceso de mejoramiento de estos análisis, demostrando que es posible realizar proyectos de este tipo sin ningún impedimento, además de permitir obtener conocimientos necesarios que marcan el éxito en la manufactura.

Por último, la importancia de este trabajo además del ámbito académico y de investigación, también tiene un enfoque industrial, debido que a nivel mundial se siguen ocupando materiales metálicos en una serie de técnicas de mecanizado para procesos de producción, los cuales generan de forma dinámica importantes cambios, tanto en el progreso de la rama tecnológica como en la demanda de la mejora de procesos.

El conflicto que se presenta con mayor frecuencia es la dificultad de poder aumentar la calidad del producto, a la vez de reducir los costos y disminuir el impacto ambiental. Una comprensión detallada del proceso de mecanizado es esencial con el fin de responder a estas nuevas obligaciones, y el presente trabajo se espera sea aliciente para posteriores estudios en el mecanizado por arranque de viruta.

Las fuerzas y momentos generados durante el mecanizado son importantes indicadores que ayudan a determinar lo que está sucediendo con el material y la herramienta. Esta información puede ser utilizada para mejorar factores tales como el acabado superficial y predecir fallas de la herramienta de corte ante un posible desgaste. Motivo conveniente de emplear medidores de fuerzas durante el mecanizado. El análisis experimental sólo es posible con un sofisticado sistema de sensores y la tecnología piezoeléctrica ofrece tal solución robusta y precisa, que es el punto base del presente trabajo.

La medición de las fuerzas de corte es usado para el análisis del proceso de mecanizado, cubriendo los siguientes rubros:

- Optimizado del proceso de mecanizado.
- Cuantificación de la energía requerida para los procesos.
- Determinación de las características de los materiales y su maquinabilidad.
- Dimensionamiento de las máquinas herramientas y sus componentes.
- Optimizado de la elección y mejora de herramientas de corte.
- Verificación de resultados teóricos, simulaciones y nuevos modelos de procesos.

Metodología

El propósito de cualquier método es dar una secuencia de pasos, que transforma un conjunto de entradas en un conjunto de salidas, en el caso de la medición de fuerzas de corte es permitir que los principios de manufactura se vean claramente y puedan ser manejados de manera estándar, con repetibilidad y reproducibilidad, así como también evitar imponer ideas por motivos no razonados. A continuación se presenta la metodología que se siguió para elaborar la presente tesis.

- Planeación de actividades.
- Investigación y definición de conceptos pertinentes para el objetivo de la tesis.
- Planeación del proceso para la manufactura de una pieza e identificar las restricciones y la capacidad de las tecnologías disponibles, tanto de máquinas herramientas, instrumentales, instrumentos y accesorios de medición.
- Entender el funcionamiento de cada uno de los componentes de medición a utilizar para la instrumentación en el proceso.
- Definir interfaces principales y subsistemas del experimento para hacer la medición de las fuerzas de corte en el proceso de cilindrado.
- Analizar los datos obtenidos en la medición de fuerzas de corte.
- Crear una documentación de los resultados del proceso, e identificar oportunidades de mejora para posibles trabajos a futuro.
- Abordar los beneficios de la implementación de la medición de las fuerzas de corte.
- Conclusiones obtenidas.
- Recomendaciones del presente trabajo.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 Estado del arte

Los métodos de transformación de los metales tienen una larga evolución a través de la historia, aunque referente al corte de metal comienza con la aparición de la primera máquina herramienta, la aparición de la primera máquina herramienta para el corte de metal se dio debido a la necesidad para el mecanizado de cilindros, dicha información se remonta a los registros del diario de Richard Reynolds.

La historia de corte de metal data de la última parte del siglo XVIII. Antes de ese tiempo no existían máquinas herramientas, el Ingeniero Inglés, Richard Reynolds, Octubre de 1760, da una idea de los problemas que se presentaron durante la fabricación de piezas cilíndricas. El ingeniero Reynolds requería producir cilindros para un motor neumático, que extrajera agua de un pozo de carbón. El cilindro a maquinar era de latón fundido, tenía una longitud de 9 ft y un diámetro de 28 in. (Boothroyd, 2006).

A continuación se muestra una breve descripción de la evolución que han tenido las máquinas herramientas:

- 1690-Denis Papin da a conocer el principio fundamental de la máquina de vapor.
- 1712-Thomas Newcomen construyó rudimentarias máquinas de vapor.
- 1765-James Watt construyó la primera máquina de vapor de uso industrial.
- 1775-John Wilkinson construye una máquina barrenadora para el mecanizado de cilindros.
- 1800-El Inglés Henry Maudslay construyó un torno para cilindrar con tres mejoras para aumentar la precisión: estructura totalmente metálica, inclusión de guías planas e incorporación de husillos roscados.
- 1930- Existen tornos de precisión de hasta 3 ejes; carro longitudinal, carro transversal y auxiliar.
- 1948-John Parson inicia la aplicación del control numérico en la máquina herramienta.
- 1990- Se desarrollan centros de mecanizado de hasta 5 ejes de movimiento y cambios automáticos de herramientas.
- 2000- Máquinas multifuncionales creadas para llevar a cabo operaciones de torneado y fresado con la posibilidad de combinar también operaciones de rectificado y mecanizado de engranes. (Schvab, 2011).

En la actualidad las máquinas herramientas son consideradas la base de una industria, las cuales son usadas para manufacturar diferentes productos que forman parte vital en nuestra vida diaria, ya sea en la fabricación directa de productos o indirecta de elementos auxiliares, esto ha llevado también al desarrollo de nuevas máquinas herramientas, que se ajustan a diferentes solicitaciones específicas, abriendo también la puerta a nuevos métodos de mecanizado para partes más complejas y solicitaciones más estrictas que con anteriores métodos eran complicados o imposibles de realizar.

La tecnología relacionada con el mecanizado ha evolucionado mucho en los últimos años, los avances tecnológicos impactan en múltiples campos entre los que destacan las herramientas de corte, la tecnología del mecanizado, los medios de producción y el CAD/CAE/CAM. Sin embargo aún existe un margen de mejora en los procesos de mecanizado, a través de un mayor conocimiento, investigación, desarrollo e innovación de los procesos, que es lo que se busca con esta tesis.

1.2 Visión tecnológica a futuro

A futuro lo que se busca aumentar en el mecanizado es el rendimiento en los procesos de fabricación, la necesidad de esta tendencia es debido a dos factores; el costo del producto y el valor agregado en la fabricación, buscando la mejora en los procesos de mecanizado con geometrías más complejas, utilizando nuevos materiales, mejorando requisitos de calidad y teniendo precisiones aún más estrictas. A continuación algunas de las tendencias del tema abordado hacia el futuro.

Entre las tendencias futuras, en procesos no convencionales se encuentran:

- Micro mecanizado laser combinado con mecanizado a alta velocidad: donde lo que se busca obtener es una elevada precisión en el mecanizado de geometrías complejas con alta calidad superficial, pero no superando el proceso de mecanizado de superacabado.
- Mecanizado rotatorio por ultrasonido: adecuado para el mecanizado de geometrías complejas en materiales duros y frágiles.
- Mecanizado electroquímico: ofrece rapidez de proceso para geometrías complejas en materiales conductores.

Mientras que en procesos convencionales de mecanizado por arranque de viruta las tendencias son:

- Desarrollo y optimizado de mecanizado en materiales duros: El mecanizado de materiales con dureza arriba de 50 HRC y con velocidades de mecanizado superiores a la de métodos convencionales.
- Aplicaciones de simulación a los procesos de mecanizado como: modelos numéricos, integración de los modelos en software CAD/CAE/CAM, que permitan asistir las actividades de programación mediante el análisis de piezas complejas para la identificación de problemas de vibración, así como también para la mejora del proceso de mecanizado y optimizado de las condiciones de corte, aunado a mejorar las trayectorias de mecanizado en las simulaciones de control numérico. (Gonzalo & et al, 2010).

1.3 Investigaciones referentes a la medición de las fuerzas de corte

La importancia de saber la magnitud de las fuerzas de corte que afectan las operaciones básicas de torneado como el cilindrado y careado de piezas que requieren una gran precisión, pueden ayudar a comprender las afectaciones debido a las vibraciones y deformaciones que se pueden originar en las piezas al sobrepasar las fuerzas de corte permisibles debido al desgaste en las herramientas y la influencia de las máquinas utilizadas. Estos factores son de gran importancia en la industria aeronáutica y otros campos ingenieriles, donde se trabaja con materiales muy costosos y difíciles de maquinar, geometrías complejas que muchas veces son rechazadas por su alta complejidad generando pérdidas debido al gran costo de manufacturar una pieza de estos tipos, ejemplo de esto, es el material de aleación Titanio Ti6Al4V, utilizado en las industrias especializadas.

“Por estas razones se han realizado análisis y modelos predictivos que ayuden a cuantificar y evaluar estas fuerzas de corte, así como los principales parámetros que intervienen.” (Dorlin & et al., 2015)

Las fuerzas de corte y la rugosidad superficial que se obtiene en el proceso de maquinado en un torno durante los procesos de cilindrado, se realizan tomando en cuenta cuatro parámetros principales como son: velocidad de corte, avance, profundidad de corte y ángulo de incidencia.

Es de gran importancia conocer los tiempos de maquinado así como las fuerzas de corte ya que esto por consecuente ayuda a mejorar las herramientas de corte, también es importante conocer los elementos que ayudan en la sujeción de las herramientas y de las piezas de trabajo, debido a que la simple sujeción puede causar un efecto de exactitud en el maquinado y en las máquinas herramientas, a fin de evitar la vibración durante un proceso

de torneado. Un aspecto importante a tomar en cuenta es el acabado que se debe dar a las piezas, debido a la gran precisión que se requiere en nuevas aplicaciones en las que se utilizan piezas realizadas a través de estos procesos, por lo que es necesario poder determinar la rugosidad superficial que se obtiene en los materiales bajo diferentes parámetros durante estos procesos. (Mahamani, 2014)

Así mismo se han realizado y evaluado distintos modelos mediante regresión lineal. Con estos modelos se han integrado redes neuronales para la interpretación de distintos parámetros que intervienen en operaciones de corte como por ejemplo; dureza superficial, maquinabilidad del material, fuerzas de corte, etc. Dichos modelos para comparar resultados teóricos y obtenidos experimentalmente. (Sharma & et al., 2008)

En los procesos de manufactura un aspecto a ser considerado y de gran impacto es el acabado superficial de las piezas de trabajo, en donde se busca predecir con modelos matemáticos el efecto de rugosidad en la pieza terminada. La predicción certera de estos efectos sería una aportación de gran ayuda para la industria manufacturera.

Principalmente lo que se busca es mejorar programas de simulación ya existentes basados en FEM y CAM. Las simulaciones hacen mucho más viables los análisis, teniendo presente que se invierte en tiempo de procesamiento para la información de las propias operaciones de torneado pero que a su vez ahorran costos de material y de experimentos físicos.

Los modelos generados por FEM o los modelos experimentales son aplicados en general para estudiar las fuerzas de corte, vibraciones, desgaste de la herramienta, esfuerzos residuales y efecto de la temperatura. Los coeficientes obtenidos empíricamente son las bases para obtener un modelos analíticos que comparados con los modelos FEM no son tan precisos, pero son capaces de poder calcular fuerzas en operaciones de corte durante la trayectoria de la herramienta. Los modelos más utilizados son el modelo exponencial y el modelo lineal, en ambos casos las fuerzas son proporcionales al área instantánea de la viruta y los coeficientes de corte. (Ulután & et al., 2008)

Las investigaciones mencionadas son solo algunos de los estudios que se están desarrollando en diversos laboratorios, universidades y talleres enfocados a los procesos de manufactura. Estas investigaciones han sido enfocadas a diversas áreas principalmente para la obtención de las fuerzas de corte.

1.4 Mecanizado

El mecanizado o maquinado se basa en una operación de corte, la cual tiene como objetivo remover material que no es necesario de la pieza de trabajo. La base de la operación de corte, es la aplicación de una fuerza concentrada en un área del material por medio de una herramienta de corte.

Las operaciones de maquinado se pueden dividir en dos categorías: en una, la pieza de trabajo se mueve mientras que la herramienta de corte está fija típicamente el torneado donde el material gira sobre un eje fijo; y en la otra, ocurre lo contrario, típicamente el fresado donde la herramienta de corte gira sobre un eje fijo.

El mecanizado es caracterizado por su versatilidad y capacidad de lograr gran exactitud y calidad superficial, además de un camino muy económico para la manufactura de piezas. La versatilidad de los procesos de mecanizado pueden ser atribuidos a factores como son:

- El proceso no requiere de herramientas complejas.
- El proceso puede ser utilizado para diversos materiales ingenieriles.
- El desgaste de la herramienta de corte se mantiene en los límites permisibles y las herramientas de corte no son de alto costo.

El mecanizado es generalmente usado para operaciones de acabado final de partes producidas por fundición y forjado antes de que estén listos para su uso en ensamble.

Sin embargo, hay una serie de razones que hacen del proceso de mecanizado una solución obligatoria comparada con otras técnicas de manufactura como son:

- Tener tolerancias requeridas más estrictas en comparación con fundición y forja.
- Cumplir con superficies de calidad requeridas para funciones específicas de las piezas.
- El costo es más rentable al maquinar una pieza, que producirla a través de otras operaciones de manufactura, conservando propiedades mecánicas idóneas. (El-Hofy, 2014).

1.5 Operaciones de maquinado con arranque de viruta

El maquinado es una familia de procesos que se caracteriza por el uso de una herramienta de corte que forma viruta al desprender material de la pieza de trabajo. En la figura 1.1, se observan algunos de los procesos más comunes por arranque de viruta.

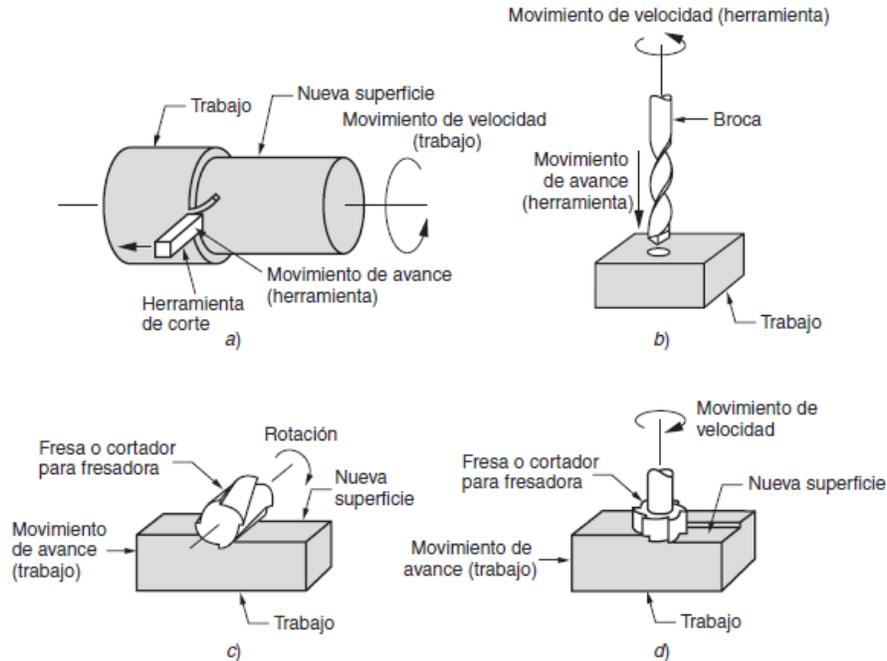


Figura 1.1.- Los tres procesos más comunes de maquinado: a) torneado, b) taladrado, dos formas de fresado c) fresado horizontal y d) fresado vertical. Adaptado de Fundamentos de manufactura moderna. (Groover, 2007).

1.6 Torneado

El torneado es la combinación de dos movimientos: rotación de la pieza de trabajo y movimiento de avance de la herramienta, como se muestra en la figura 1.2. El movimiento de rotación continuo del material parte de una pieza en bruto que puede tener diferentes dimensiones según la sollicitación deseada, a fin de remover la menor cantidad de material para evitar desperdicio excesivo de material y desgaste innecesario en las herramientas de corte, también el material de trabajo puede partir de una pieza ya previamente maquinada la cual se considera como material de trabajo. El material de trabajo antes de llegar a las sollicitaciones deseadas pasa por una etapa que se denomina superficie transitoria. La superficie transitoria son las pasadas en contacto entre la herramienta de corte y el material de trabajo antes de llegar a la dimensión sollicitada. El número de pasadas depende de la profundidad de corte que también puede observarse en la figura 1.2. Dicha profundidad está determinada por la capacidad de la herramienta de corte aunado a la sollicitación del tipo de maquinado, dependiendo de si es, un desbaste o una pasada para acabado de la pieza.

El torneado genera sólidos de revolución con una herramienta de corte casi siempre semi-estacionaria y una pieza que gira alrededor de un eje de simetría. En muchos aspectos, éste es el método más sencillo de corte. Sin embargo, el proceso de torneado tiene muchas

variantes en función de la forma y material de la pieza de trabajo, el tipo de operación, características de la herramienta de corte y condiciones de corte. (Boothroyd, 2006).

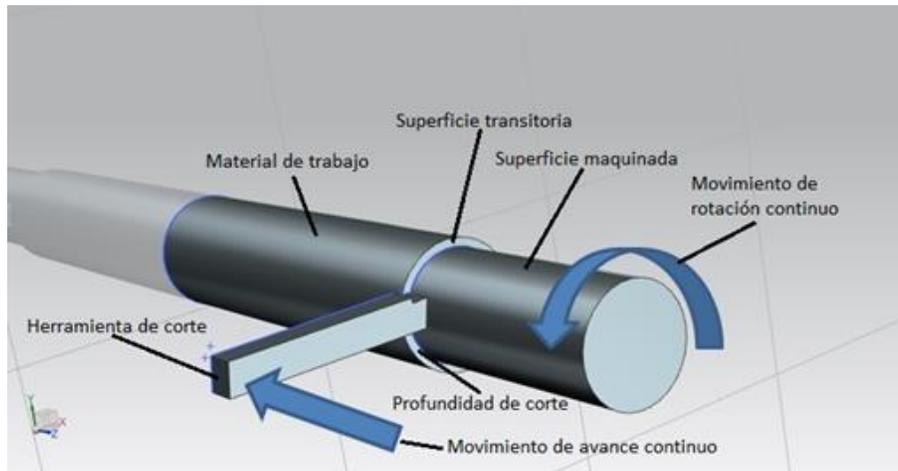


Figura 1.2.- Configuración básica del proceso de cilindrado en torno.

En el proceso de torneado, la pieza de trabajo tiene un diámetro específico; D (mm), gira en un torno a una velocidad del husillo o velocidad de giro; N (rev/min), una velocidad de avance; V_f (m/min) que realiza la función de trasladar la herramienta de corte a lo largo de la pieza de trabajo, y por último, la velocidad de corte o velocidad superficial; V_c (m/min) que se produce en el punto que se está maquinando en la figura 1.3 se pueden apreciar estos parámetros que identifican al proceso de torneado.

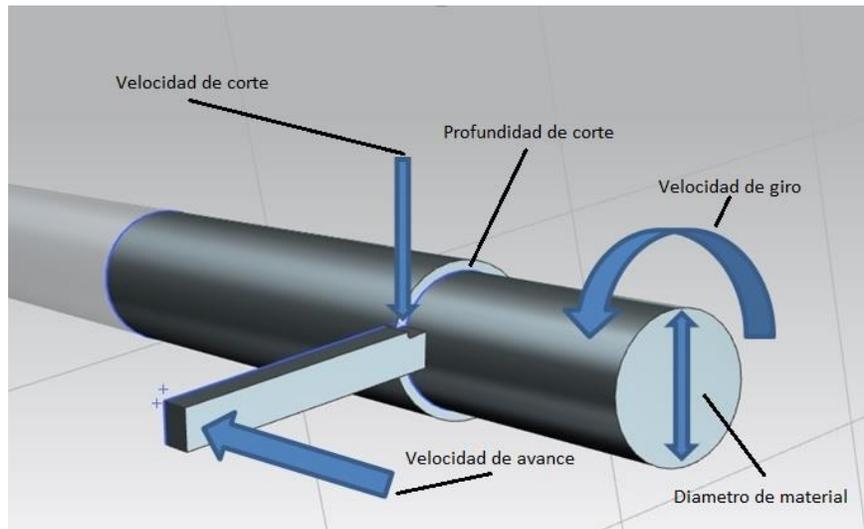


Figura 1.3.- Parámetros involucrados en el proceso de torneado.

1.7 Máquinas para torneado

El torno es una herramienta muy versátil que se opera de forma manual o por computadora en el caso de las máquinas de control numérico. La figura 1.4 muestra la configuración básica de un torno en el que se muestran sus componentes principales:

- Contrapunto: En el cual se monta un centro giratorio para sostener el extremo de la pieza.
- Torreta: La cual se encuentra fija al carro transversal y es la que soporta la herramienta de corte.
- Carro transversal: Está diseñado para avanzar en una dirección perpendicular al movimiento del carro longitudinal.
- Carro longitudinal: Se desliza sobre las guías del torno a fin de avanzar la paralelamente al eje de rotación del husillo.
- Bancada: Son las guías que proveen un armazón rígido para el torno.
- Plato o chuck: Sistema tipo prensa para soportar la pieza de trabajo.
- Caja Norton o caja de velocidades: Es la que permita cambiar las velocidades del husillo por medio de diferentes relaciones de engranes.

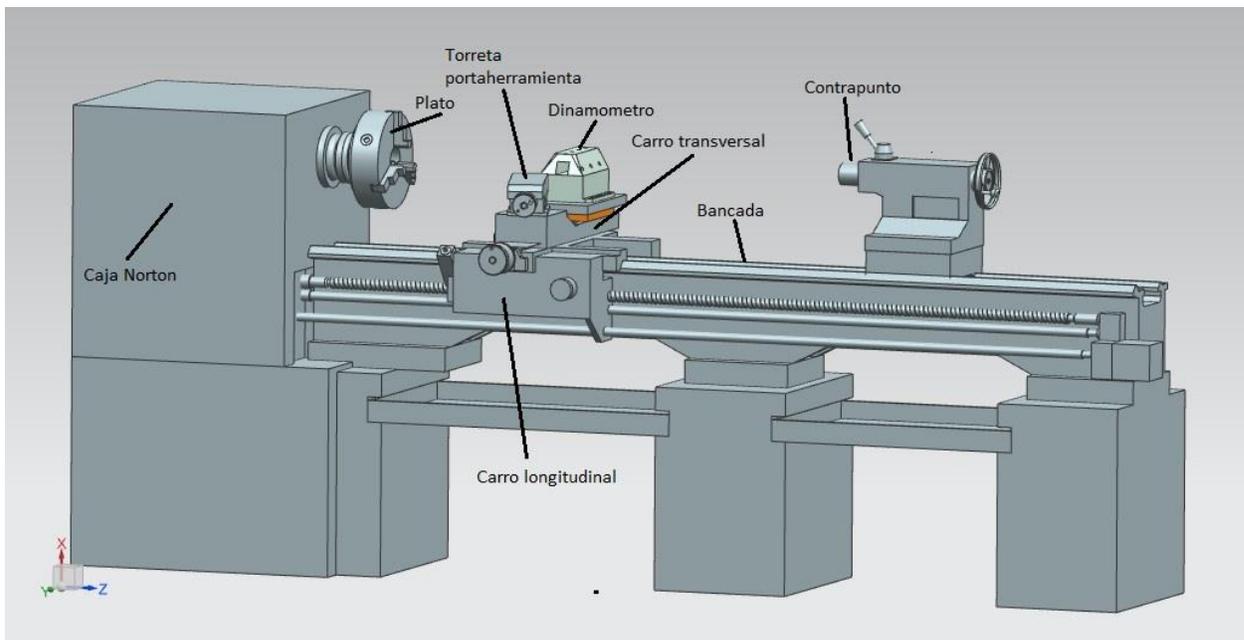


Figura 1.4.- Torno convencional y sus componentes principales.

Por la disposición del eje rotación los tornos se pueden clasificar como:

- Torno horizontal: Para trabajos donde la longitud de la pieza de trabajo es mayor que el diámetro
- Torno vertical: Para trabajos donde el diámetro es mayor que la longitud y el trabajo es pesado.

El tamaño del torno se designa por el volteo y la máxima distancia admisible entre centros. Al volteo se le denomina como el diámetro máximo de la pieza de trabajo que puede girar en el husillo. La máxima distancia entre los centros indica la longitud máxima de la pieza de trabajo que puede ser montada entre el cabezal y el contrapunto.

Además de los tornos convencionales, existen otras variantes para aplicaciones especiales: 1) torno automático, 2) torno bancada al aire, 3) torno revolver, 4) torno mandril, 5) máquina automática de tornillo, y 6) torno controlado numéricamente por computadora. (Gonzalo & et al, 2010).

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE TORNEADO

2.1 Parámetros de corte

La elección correcta de los parámetros de corte es un factor clave que determina la calidad de la superficie a maquinar y sirve para cerciorarse que la formación de las virutas está dentro del campo de la geometría de la herramienta. La elección correcta de los parámetros de corte influye en el grosor de la viruta, así como también en la forma de rotura o desahogo de la viruta.

Parámetros de corte;

- Diámetro inicial D_i (mm): es el diámetro de la pieza en bruto del material o el diámetro de la pieza a maquinar antes de realizar desbaste.
- Diámetro transitorio D_t (mm): es el diámetro que se obtiene en la pieza de trabajo después de haber realizado un desbaste.
- Diámetro medio D_{medio} : es el diámetro que se obtiene entre la diferencia del diámetro inicial y final como se muestra en la ecuación 1.

$$Diametro_{medio} = \frac{Diametro_{inicial} + Diametro_{final}}{2} \text{ --- Ecuación 1}$$

- Diámetro final D_f (mm): es el diámetro de la pieza de trabajo terminada después de maquinados previos.
- Velocidad del husillo N (rev/min): Es la velocidad a la que gira el husillo en donde se encuentra acoplado el plato para sostener la pieza de trabajo.
- Velocidad de corte o velocidad superficial V_c (m/min): es la velocidad existente entre el material y la herramienta, conocida como velocidad tangencial. La velocidad de corte se puede determinar como se muestra en la ecuación 2.

$$V_c = \frac{\pi DN}{1000} \text{ --- Ecuación 2}$$

V_c : Velocidad de corte $\left(\frac{mm}{min}\right)$

D : diametro(m)

N : Velocidad del husillo $\left(\frac{rev}{min}\right)$

- Avance f (mm/rev): Es el avance por revolución de giro del husillo.
- Velocidad de avance V_f (m/min): es la velocidad a la que se mueve la herramienta de corte a lo largo de la pieza de trabajo y está determinado por el avance por revolución de giro del material de trabajo como se muestra en la ecuación 3. La velocidad de avance es un factor muy importante y puede influir en el volumen de producción y en la duración de la herramienta de corte. Una velocidad muy baja en maquinado ocasionaría pérdidas de tiempo; una velocidad muy alta hará que la herramienta tenga un desgaste acelerado. Por ello, la velocidad y el avance correctos son importantes según el material de la pieza y el tipo de herramienta de corte que se utilice.

$$V_f = fN \text{ --- Ecuación 3}$$

V_f : Velocidad de avance $\left(\frac{mm}{min}\right)$

N : Velocidad del husillo $\left(\frac{rev}{min}\right)$

f : avance $\left(\frac{mm}{rev}\right)$

- Profundidad de corte d (mm): es la diferencia entre la superficie de trabajo y la superficie maquinada, dividida entre dos. La profundidad de corte se mide siempre en ángulos rectos respecto a la dirección de avance de la herramienta, no al filo. La manera en que el filo principal se aproxima a la pieza de trabajo se expresa como el ángulo de entrada k , el cual representa el ángulo formado entre el filo y la dirección de avance.
- La velocidad de remoción de material (mm^3/min): es una forma de cuantificar cuanto volumen de material se está removiendo por minuto de la pieza de trabajo, dicho valor se obtiene como se muestra en la ecuación 4.

$$R_{RM} = \pi * D_{medio} * d * V_f \text{ --- Ecuación 4}$$

d : Profundidad de corte (mm)

D_{medio} : Diámetro (mm)

V_f : Velocidad de avance $\left(\frac{mm}{min}\right)$

- La fuerza de corte F_c (N): se puede determinar en un punto tangencial a la herramienta de corte, se obtiene como se muestra en la ecuación 5.

$$F_c = \frac{P_c}{\pi * D_m * N} \text{ --- Ecuación 5}$$

F_c : Fuerza de corte (N)

P_c : Potencia de corte (w)

D_m : Diametro medio (m)

N : Velocidad del husillo ($\frac{rev}{min}$)

- La potencia de corte P_c (w): es un valor que sirve para determinar la fuerza de corte, la cual se obtiene basándose en el trabajo realizado por una distancia fungiendo como estas variables la energía específica del material y la remoción de material como se muestra en la ecuación 6.

$$P_c = U * \frac{R_{RM}}{60} \text{ --- Ecuación 6}$$

P_c : Potencia de corte (w)

U : Energía específica ($\frac{N \cdot m}{mm^3}$)

R_{RM} : Velocidad de remoción de material ($\frac{mm^3}{min}$)

- El tiempo de maquinado de una pieza cilíndrica de un extremo a otro está dado por la ecuación 7, y dicho valor nos ayuda a determinar el tiempo de maquinado de la pieza de trabajo.

$$\text{Tiempo de maquinado (min)} = \frac{\text{Longitud de la pieza (mm)}}{\text{Velocidad de avance } (\frac{mm}{min})} \text{ --- Ecuación 7}$$

2.2 Fuerzas de corte en el cilindrado

La importancia del saber y poder trabajar con nuevos materiales, cada vez más sofisticados o incluso los llamados “exóticos” como se dice con frecuencia, son importantes para el desarrollo de nuevos proyectos, por lo cual es importante contar con parámetros adecuados del maquinado, establecer protocolos y procedimientos más específicos. Entre nuevas aleaciones podemos encontrar aleaciones de aluminio litio serie 8000, aleaciones de titanio grado 5, aceros inoxidables serie 300-400, aleaciones base níquel tipo 625-925, aleaciones base cobalto Aermet 100-340

entre otros enfocados principalmente a altas resistencia a la corrosión en ambientes marítimos así como también a tener materiales ligeros de alta resistencia para la aeronáutica.

Como ya se ha mencionado, en la presente tesis se busca contribuir a encontrar parámetros óptimos de maquinado en base a las fuerzas de corte experimental en el maquinado con torno, para diferentes materiales. Los procesos de acabado deben asegurar y mantener las propiedades mecánicas de la pieza de trabajo para soportar las cargas en uso, y al mismo tiempo no afectar la integridad que pueda llevar a problemas de fatiga o corrosión.

Los modelos matemáticos permiten el cálculo de las fuerzas de corte en operaciones con herramientas de geometría compleja. Este tipo de modelos están basados en la suposición de que las fuerzas de corte son proporcionales al espesor de la viruta, que básicamente es una relación de las condiciones de corte, la geometría del proceso y otras variables del mismo. Estas relaciones se estudian por separado siendo necesaria la experimentación para la obtención de los coeficientes específicos de corte que relacionan las diferentes magnitudes y parámetros medidos. La predicción fiable del valor de las componentes de fuerzas en operaciones de mecanizado es fundamental para determinar los requisitos de potencia, los errores geométricos en los componentes mecanizados, las características de las vibraciones, los requisitos de resistencia de las herramientas de corte, el diseño de otras herramientas de corte o el dimensionamiento de las propias máquinas de mecanizado, de manera directa o indirecta son un paso intermedio necesario para el cálculo de muchos aspectos en los procesos de mecanizado. Por lo cual su importancia es vital para las siguientes actividades:

- Optimización de las condiciones de corte.
- Definición de la geometría óptima de las herramientas.
- Identificación de problemas debidos a causas como vibraciones.
- Optimizado de trayectorias de mecanizado.
- Reducción del tiempo de maquinado.

Una cantidad considerable de investigaciones se han dirigido hacia la predicción y la medición de fuerza de corte efectiva. Esto se debe a que las fuerzas de corte de metal tienen una influencia directa en la generación de calor, el desgaste de la herramienta, la calidad de la superficie mecanizada y la exactitud de la pieza de trabajo. Las tres componentes de la fuerza de corte que se producen durante el proceso se muestran en la figura 2.1. La fuerza de avance está representada por F_f , la fuerza de empuje está representada por F_t , la fuerza de corte principal está representada por F_c , esta última fuerza de corte es uno de los parámetros más importantes en ser monitoreados en los procesos de corte. La importancia de monitorear la fuerzas de corte en tiempo real está estrechamente relacionado con la predicción del desgaste de las herramientas, detección de rotura o mal funcionamiento. Aunque la señal de la fuerza de corte se puede medir directamente por un dinamómetro, mediante la fuerza que se ejerce en la herramienta de corte,

su uso está limitado por el alto costo, la fiabilidad del sensor, restricciones de diseño, (espacio, peso, etc.) Por lo cual el uso de dinamómetro de fuerzas y tecnologías relacionadas sigue siendo no totalmente satisfactorio.

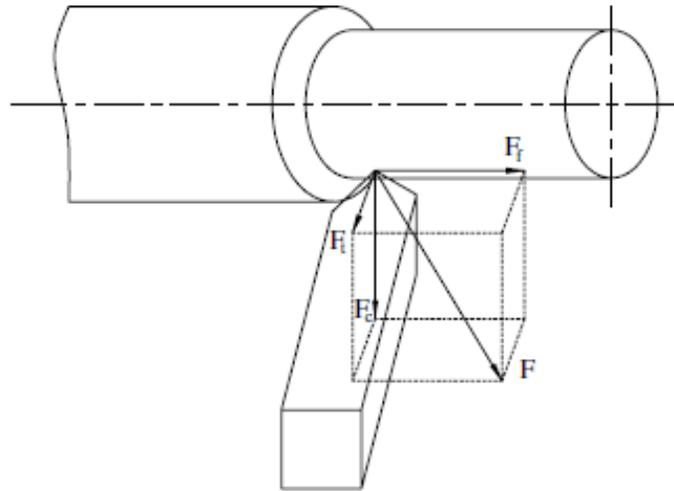


Figura 2.1.- Componentes de las fuerzas de corte durante el proceso de cilindrado. Adaptado de "Comparison of experimental results obtained by designed dynamometer to fuzzy model for predicting cutting forces in turning". (Yaldiz & et al, 2006)

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 resultante F . En la figura 2.2 se puede apreciar el modelo de corte ortogonal de la fuerza de corte ejercida en un plano bidimensional. El momento se puede despreciar ya que el área sobre el que se aplica la fuerza es muy pequeña.

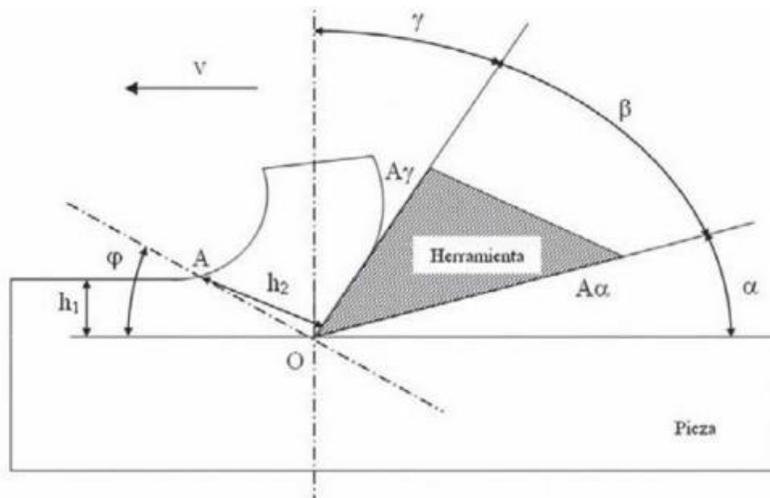


Figura 2.2.- Modelo esquemático del plano de deslizamiento del modelo corte ortogonal en dos dimensiones. Adaptado de "Ejercicios y problemas de mecanizado". (Rubio & et al., 2011)

2.3 Cálculo de la fuerza de corte

Se requiere realizar un proceso de cilindrado con las siguientes características y condiciones de corte, por lo cual se requiere calcular la fuerza de corte.

Datos:

- Material redondo aluminio 6061
- Diámetro inicial= 30.50 mm
- Longitud de maquinado= 40 mm
- Diámetro final solicitado= 30.26 mm
- Velocidad de giro del husillo= 70 rpm
- Avance= 0.101 mm/rev
- Energía específica= 0.9 w-s/mm³ dato consultado en fuente: (Groover, 2007).

Memoria de cálculo:

Obteniendo diámetro medio con la ecuación 1.

$$D_{medio} = \frac{30.50 + 30.26}{2} = 30.38 \text{ mm}$$

Obteniendo la profundidad de corte.

$$d = \frac{30.50 - 30.26}{2} = 0.12 \text{ mm}$$

Obteniendo la velocidad de avance con la ecuación 3.

$$V_f = (0.101)(70) = 7.7 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Obteniendo la velocidad de remoción de material mediante la ecuación 4.

$$R_{RM} = \pi(30.38)(0.12)(7.7) = 88.19 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$$

Obteniendo la potencia de corte a través de la ecuación 6.

$$P_c = 0.9 \left(\frac{88.19}{60} \right) = 1.32 \text{ w}$$

Por último sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 5 para obtener la fuerza de corte teórica.

$$F_c = \frac{1.32}{\pi(30.38E - 3)(70)\left(\frac{1}{60}\right)} = 11.85 \text{ N}$$

Se puede obtener fácilmente el tiempo de maquinado en base a la ecuación 7.

$$\text{Tiempo de maquinado} = \frac{40}{7.7} = 5.19 \text{ minutos}$$

2.4 Temperatura en el proceso de torneado

Como en todas las operaciones de trabajo en metales, la energía disipada en la operación de corte se convierte en calor, que a su vez eleva la temperatura en la zona de corte. Es importante conocer el aumento de temperatura por los siguientes fenómenos:

- Una temperatura excesiva afecta negativamente la resistencia, dureza y desgaste de la herramienta de corte.
- Al aumentar el calor se provocan cambios dimensionales en la parte que se máquina y en la herramienta, por lo cual se dificulta controlar la exactitud dimensional.
- El calor induce defectos por esfuerzos térmicos en la superficie maquinada.

Debido al trabajo efectuado para cortar el material, se genera una fricción en la superficie de ataque de la herramienta, la principal zona en la que se incrementa la temperatura es la intercara entre la herramienta y la viruta. Además si la herramienta se encuentra desafilada genera mayor aumento de la temperatura debido a la fricción entre la punta de la herramienta y la superficie de la pieza.

Hay varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte, el método de Cook es uno de ellos derivado de un análisis dimensional, usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores para una ecuación. La ecuación 8 predice la elevación de la temperatura en la interfase herramienta-viruta durante el maquinado. (Groover, 2007).

$$T = 0.4 \frac{U}{\rho C} \left(\frac{V_c \cdot t_o}{K} \right)^{0.33} \text{ --- Ecuación 8}$$

T: Aumento de la temperatura media (°C)

U: Energía específica $\left(\frac{N \cdot m}{mm^3}\right)$

ρC : Calor específico volumétrico del material $\left(\frac{J}{mm^3 \cdot ^\circ C}\right)$

K: Difusividad térmica del material $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

t_o: Espesor de la viruta (m)

$$V_c: \text{Velocidad de corte } \left(\frac{m}{min} \right)$$

En la figura 2.3 se muestra una distribución típica de temperaturas en la zona de corte. Nótese la presencia de grandes gradientes térmicos y que la temperatura máxima se presenta aproximadamente a la mitad del recorrido por la cara de la herramienta. La distribución de temperaturas depende de factores como el calor específico, la conductividad térmica de los materiales de la herramienta y la pieza, la velocidad de corte y la profundidad de corte.

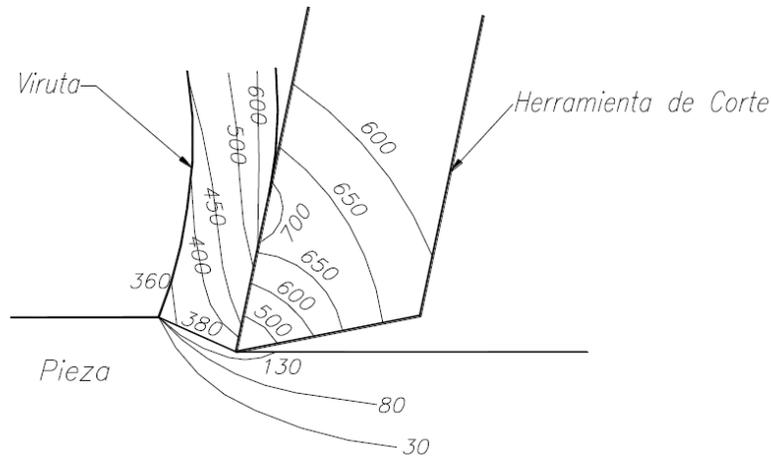


Figura 2.3.-Distribución de las diferentes temperaturas que se producen entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo. Adaptado de Tecnologías y procesos de producción. (Borkosky, 2010).

2.5 Fluidos en el proceso de corte

Los fluidos para corte son esenciales en las operaciones de maquinado de metales para reducir el calor y la fricción provocada por la viruta y la herramienta. Para que la sustancia utilizada como lubricante funcione eficientemente, debe poseer las siguientes características deseables; buena capacidad de enfriamiento, buenas cualidades de lubricación, resistencia a la oxidación, estabilidad, larga vida útil, no toxicidad, transparencia, viscosidad relativamente baja y no inflamable. (Krar & et al., 2009).

Los fluidos de corte tienen dos funciones:

- Refrigeración: Para disminuir las temperatura de corte permitiendo trabajar a mayor velocidad y evitando inconvenientes del incremento de la temperatura.
- Lubricación: Una buena lubricación durante el mecanizado de la pieza de trabajo es de gran beneficio ya que se interpone entre la viruta y la herramienta evitando en lo posible las fuerzas de fricción y disminuye el desgaste del filo de la herramienta de corte.

2.6 Herramientas de corte para el proceso de torneado

El corte de metal resulta de la interferencia de la herramienta material de alta dureza con la pieza de trabajo material de menor dureza. Para que la interferencia se mantenga es necesario que la herramienta se desplace a lo largo de la pieza de trabajo. El borde cortante de la herramienta se diseña y se fabrica con cierta forma geométrica, la cual está determinada por las necesidades del proceso. Una gama de las herramientas de corte utilizan materiales de acero de alta velocidad, sometidas a un tratamiento térmico que aumenta su dureza, estas herramientas son esmeriladas para darle la forma final deseada, por ejemplo; brocas y buriles. Cabe resaltar que muchas veces para el afilado de un buril de acero rápido, la efectividad de funcionamiento depende de la capacidad del técnico o ingeniero en su afilado. También existen las herramientas de corte tipo plaquita soldada en diferentes formas y se pueden afilar de la misma manera que las herramientas de acero rápido, en la figura 2.4 se muestra un buril de acero de alta velocidad.

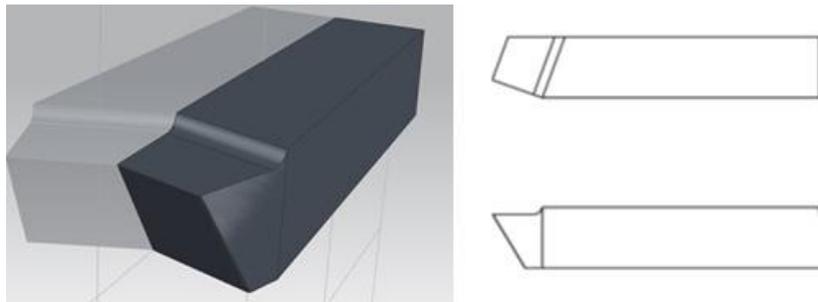


Figura 2.4.- Buril de acero de alta velocidad para desbaste general.

En la actualidad alrededor del 50% de las herramientas que se utilizan en la industria son insertos desechables, en la figura 2.5 se puede apreciar diferentes tipos de insertos utilizados en la industria con los respectivos sistemas de sujeción y la base que los soporta denominada portaherramienta que depende del tipo de máquina herramienta a utilizar. Dichos insertos son desechables de carburo tungsteno, de cerámica u otros materiales, tienen un borde cortante diseñado para controlar el movimiento de la viruta durante el corte. Controlar el movimiento de la viruta es de vital importancia para evitar dañar la pieza de trabajo, ya que esto puede ocurrir al enredarse la viruta alrededor de las herramientas en la máquina. Las principales propiedades con las que cuentan las herramientas de corte son: alta dureza, elevado coeficiente de conductividad térmica, elevada resistencia al desgaste, buena tenacidad, y resistencia al choque térmico.

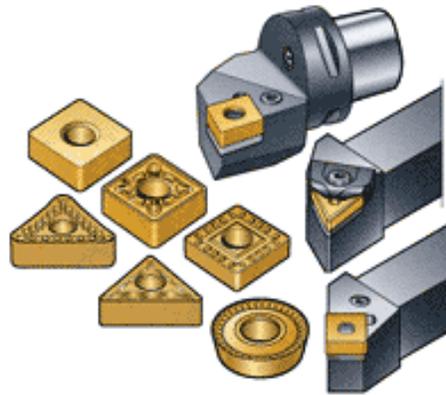


Figura 2.5.-Diferentes tipos de inserto desechables y su respectivo portaherramienta, Adaptado de Torneado I. (E.T.S.I.B, s. f.).

En la figura 2.6 podemos observar diferentes tipos de insertos comerciales y de fácil accesibilidad así como también se puede apreciar los ángulos que presentan según su forma.

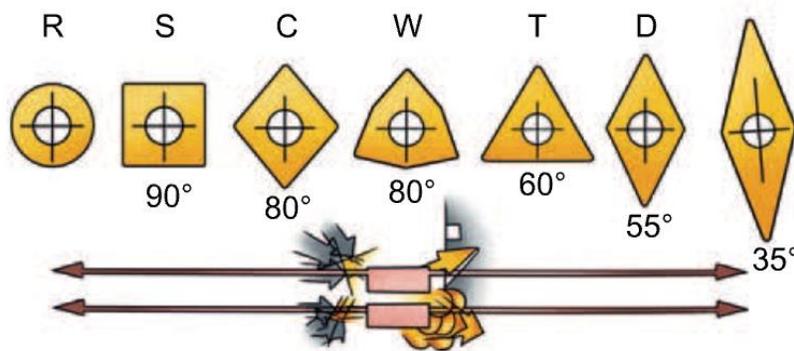


Figura 2.6.-Insertos comerciales más comunes, Adaptado de Sandvik Coromant. (Villar, 2010).

La tabla 2.1, corresponde a la versatilidad que presentan los insertos de acuerdo a las características de su forma, en donde para algunas sollicitaciones unos pueden mostrar ventajas frente a otros y viceversa.

Tabla 2.1.- Características de uso de Insertos comerciales, Adaptado de Sandvik Coromant. (Manual Sandvik Coromant, 2016).

Designación de forma básica	R	S	C	W	T	D	V
Desbaste pesado	●	●	●	○	○		
Desbaste ligero/semi acabado		○	●	●	●	●	
Acabado fino/super acabado			○	○	●	●	●
Menor consumo de potencia			○	○	●	●	●
Tendencia a la vibración				○	●	●	●
Materiales duros	●	●	○				

2.7 Desgaste de las herramientas de corte

Las herramientas utilizadas en el proceso de torneado están sometidas a diferentes sollicitaciones como: grandes esfuerzos, altas temperaturas, deslizamiento y rozamiento de la viruta por la cara de ataque; las condiciones antes expuestas favorecen el desgaste de la herramienta y su falla, a continuación se presenta algunas de las principales fallas.

- El desgaste de flanco: se presenta en la superficie de incidencia como se muestra en la figura 2.7. El desgaste por incidencia es favorecido por altas temperaturas, que a su vez afectan las propiedades de los materiales en contacto.

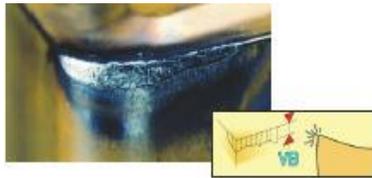


Figura 2.7. Desgaste de incidencia, Adaptado de manual Sandvik Coromant.

- El desgaste es adhesivo: cuando se produce la soldadura entre la pieza y la viruta, al mismo tiempo la unión formada por la soldadura efectuada vuelve a romperse por efecto de movimiento relativo entre la pieza de trabajo y viruta, por lo tanto continuamente se arrancan partículas de material de la herramienta. En este proceso si la viruta no se despegaba una vez soldada, se produce un sobre filo.
- El desgaste abrasivo: se produce por el rozamiento de una superficie sobre otra, desprendiendo partículas microscópicas de la herramienta.
- El desgaste de cráter: se presenta en la cara de ataque de la herramienta en general, donde la viruta roza la herramienta como se muestra en la figura 2.8. La craterización está influenciada por dos factores la afinidad química entre los materiales de la herramienta y la pieza, también está influenciada por la adhesión y la abrasión.



Figura 2.8. Cráter de desgaste en inserto. Adaptado de Sandvik Coromant.

- El despostillamiento: es el término usado para describir la rotura y expulsión de una pequeña parte del filo, debido a la superación del límite de fractura del material como se muestra figura 2.9. Este fragmento al desprenderse causa un deficiente maquinado por el cambio de

geometría. En casos extremos, este desprendimiento del filo abarca a todo el inserto y se produce una destrucción instantánea de la herramienta.



Figura 2.9 Desgaste por despostillamiento. Adaptado de Sandvik Coromant. (*Manual Sandvik Coromant, 2016*).

La vida de la herramienta en general está determinada por la pérdida del filo a través del tiempo, lo cual provoca en la pieza de trabajo un mal acabado superficial, grandes esfuerzos de corte y vibraciones que impiden la continuación del trabajo.

2.8 Operaciones de torneado

Además del cilindrado, se pueden realizar variedad de operaciones de maquinado en un torno como se presentan en la figura 2.10.

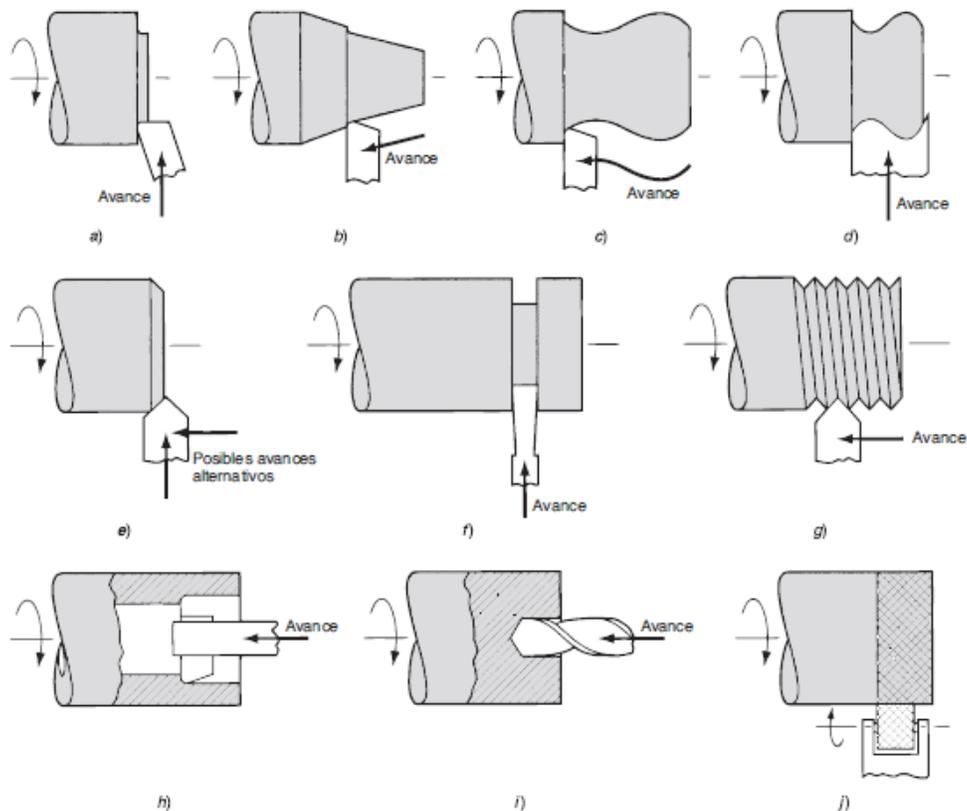


Figura 2.10.-Principales operaciones de torneado, a)careado, b)torneado ahusado, c)torneado de contornos, d)torneado de formas, e)achaflanado, f)tronzado, g)roscado h)perforado, i)taladrado, j)moleteado. Adaptado de fundamentos de manufactura moderna. (Groover, 2007).

2.9 Maquinabilidad de los materiales

La maquinabilidad de los materiales se refiere a la facilidad con la que pueden ser cortados, esta propiedad básicamente está definida por 4 factores clave:

- Acabado superficial e integridad de la superficie
- Vida útil de la herramienta
- Fuerza de corte requerida
- Control de la formación de la viruta

Estos factores de desempeño, a su vez, dependen de la combinación de propiedades físicas y mecánicas del material, por ejemplo: materiales muy suaves y dúctiles se cortan fácilmente por lo que terminan con acabados superficiales pobres, y materiales duros y frágiles desgastan terriblemente a las herramientas de corte, tal que un material con alta maquinabilidad será aquel que tenga una balanceada combinación de dureza, ductilidad, resistencia y homogeneidad.

Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad son principalmente la dureza, la tenacidad, módulo de elasticidad, calor específico y la resistencia. Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste abrasivo y la vida de la herramienta se reduce. La resistencia se indica por lo general como resistencia a la tracción, aun cuando el maquinado implica esfuerzos cortantes, por lo cual al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, haciendo que el material sea más difícil de maquinar. Por otro lado una dureza muy baja puede disminuir el desempeño en el maquinado. Por ejemplo aceros de bajo carbono, cuya dureza es relativamente baja con frecuencia son demasiados dúctiles, la alta ductilidad causa desgarramientos en el metal al formarse la viruta y produce un pobre acabado y problemas con la eliminación de la viruta. (Stewar & et al., 1999).

2.10 Tipos de viruta formada en el corte de metales

Diversos factores afectan la formación de la viruta. El material de la pieza de trabajo tiene un papel importante, estos factores pueden ser: resistencia, microestructura, dureza, forma y tamaño del material que en conjunto afectan la formación de la viruta. Los parámetros de corte influyen directamente en el tamaño y formas de las virutas, principalmente el avance, la profundidad de corte, la velocidad de corte, la geometría de la herramienta y la aplicación de fluido de corte.

“La formación de viruta se le conoce como el volumen de material removido” (Boothroyd, 2006).

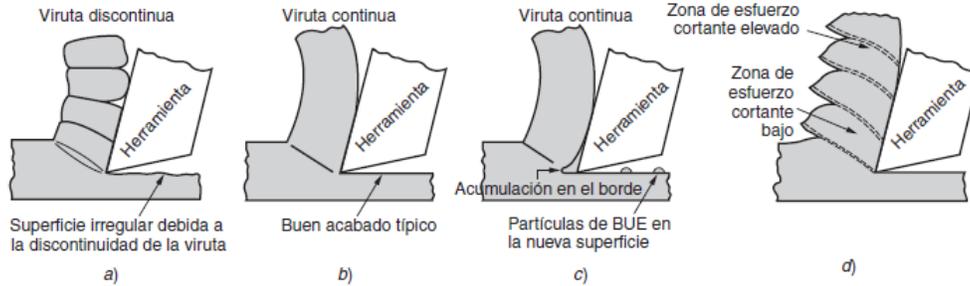


Figura 2.11.-Tipos de viruta, a) discontinua, b) continua, c) continua con acumulación en el borde, d) dentada. Adaptado de fundamentos de manufactura moderna. (Groover, 2007)

En la figura 2.11 se muestra los tipos de formación de la viruta. La formación depende en gran parte del tipo de material que se máquina, aunque también se ve afecta la formación de la viruta en gran medida a las condiciones de corte de operación y el tipo de filo de la herramienta de corte.

2.11 Selección de las condiciones de corte

Un problema frecuente en el maquinado de piezas es seleccionar las condiciones de corte apropiadas. Dicha toma de decisión debe considerar las capacidades de la máquina herramienta, la herramienta de corte, la maquinabilidad de la pieza de trabajo, el proceso a desarrollar, el acabado superficial solicitado, entre otros factores.

La selección de las condiciones de corte en una operación de maquinado consisten en elegir la velocidad del husillo, velocidad de avance, profundidad de corte y fluido de corte. La profundidad de corte se determina frecuentemente por la operación a desarrollar. Muchos mecanizados de piezas requieren de una serie de operaciones de desbaste seguidas de una operación final de acabado.

La operación de desbaste significa remover la mayor cantidad de material eficientemente con una profundidad tan grande como sea posible y la operación de acabado tiene por objetivo obtener superficies que cumplan con las exigencias de rugosidad y de tolerancias impuestas para llegar a las solicitaciones finales de la pieza.

En la selección del avance y de la velocidad del husillo por lo general los valores de estos parámetros deben decidirse en orden: primero el avance y segundo la velocidad del husillo. La determinación de la velocidad de avance apropiada para una operación de maquinado depende de los siguientes factores: tipo de operación a desarrollar desbaste o acabado, que tipo de herramienta se está utilizando, rigidez de la máquina y su instalación, potencia de corte permisible, etc. (Escamilla, 2004).

El ángulo de posición, también es un parámetro de corte que se debe tomar en cuenta, dicho ángulo se mide entre el filo de la herramienta de corte y la dirección de avance como se muestra en la figura 2.12. La toma de decisión del ángulo ayuda a la vida de la herramienta, determina la presión por unidad de superficie en el filo, formación de la viruta y beneficia a la versatilidad de poder maquinar de distintas formas.

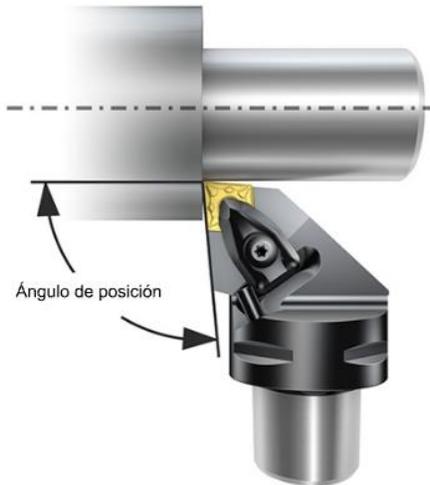


Figura 2.12. Ángulo de posición entre la herramienta de corte y la dirección de avance. (Manual Sandvik Coromant, 2016).

Cabe resaltar que existen tablas con datos en forma de rangos para la selección de avance, para maquinados de algunas familias de materiales. Dichas tablas pueden ayudar a la toma de decisión de una forma general, véase la tabla 2.2. Teniendo en cuenta que la toma de decisión puede variar dependiendo de:

- Las maquinas herramientas utilizadas en los talleres de manufactura son de diferentes capacidades y potencias, englobar la información solo produce aproximaciones en la toma de decisiones de parámetros.
- Las condiciones de la herramienta de corte, y tipo pueden variar de un taller de manufactura a otro.
- Las dimensiones del material a maquinar pueden variar en grandes rangos, por lo que tener una tabla general de parámetros no es suficiente.
- En el campo de la manufactura existen diversidad de materiales que tienen que ser mecanizados, las tablas solo cuentan con algunos datos de familias de materiales en general, donde la elección de un parámetro a otro puede afectar considerablemente.
- En las tablas no está determinado el ángulo principal de ataque de la herramienta, dado que no se utiliza una única herramienta de corte. Estandarizar el ángulo de ataque puede afectar la fuerza principal de corte.

Tablas 2.2. Avances recomendados para el proceso de mecanizado con torno. Adaptado de *Manufactura, ingeniería y tecnología. (Kalpakjian, 2008).*

	Desbaste	Acabado
Material	Milímetros	Milímetros
Acero para máquina	0.25-0.50	0.07-0.25
Acero para herramientas	0.25-0.50	0.07-0.25
Hierro fundido	0.37-0.62	0.13-0.30
Bronce	0.37-0.62	0.07-0.25
Aluminio	0.37-0.75	0.13-0.25

2.12 Rugosidad superficial

Las irregularidades de mayor tamaño son errores de forma asociados con la variación en el tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies, planicidad o redondez de una superficie que pueden medirse con instrumentos convencionales.

Las irregularidades de menor tamaño son la ondulación y la rugosidad. La ondulación puede deberse a la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc. La rugosidad depende de los parámetros de maquinado como se ha mencionado en el subtema 2.1 y 2.10.

La rugosidad superficial tiene una amplia correlación entre la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte. La rugosidad superficial es un índice utilizado en la calidad del producto y como requerimiento técnico en los productos. Lograr la rugosidad deseada es de gran importancia para el comportamiento de una pieza.

La topografía superficial, que según la norma ASME B46.1 es la representación tridimensional de las irregularidades geométricas de las superficies, está descrita en función de sus características espaciales, por los siguientes componentes:

- Longitud de onda corta: Rugosidad.
- Onda media: Ondulación.
- Onda larga: Errores de forma. (Pedraza & et al., 2011).

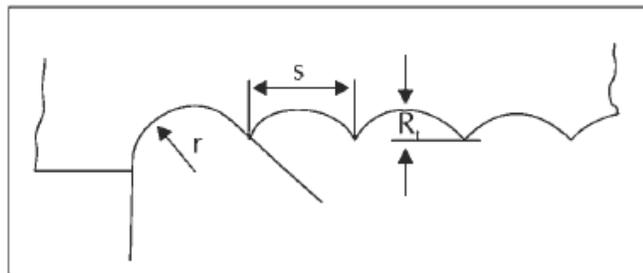


Figura 2.13.-Vista de la rugosidad superficial que se obtiene debido al radio de punta. (Manual Sandvik Coromant, 2016)

El acabado superficial y las tolerancias son afectados por la combinación del radio de punta y el avance, en la figura 2.13, se muestra la relación entre estas condiciones después de un proceso de maquinado.

2.13 Tolerancias

El propósito básico de los procesos de manufactura es producir piezas de un tamaño y forma determinados. Este tamaño y forma es comunicado al fabricante mediante dibujos técnicos que contienen todas las especificaciones requeridas para el satisfactorio funcionamiento del producto. El proceso por sencillo que este sea, tendrá variaciones inevitables. Para integrar estas fluctuaciones junto con la incertidumbre propia de la medición al diseño y funcionamiento adecuado del producto es que resulta necesario anticipar cierta variación con respecto a la dimensión nominal especificada en el dibujo. A esta variación permitida o esperada se le conoce como tolerancia.

En términos generales se puede suponer que entre más cerrada la tolerancia especificada hay más probabilidad de que la parte funcione adecuadamente. Sin embargo también es conocido que mientras más abierta sea la tolerancia de una dimensión, más económica y fácil será su fabricación. (NOM Z23, 1973).

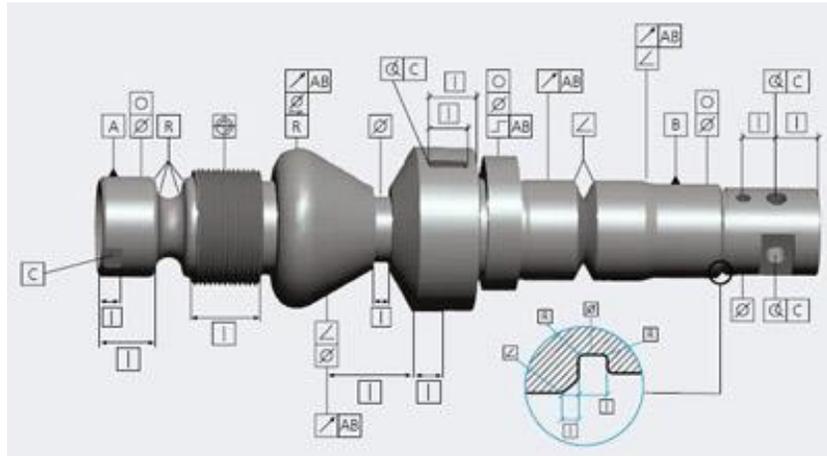


Figura 2.14 Forma isométrica de una pieza que muestra diferentes simbologías de tolerancia que pueden ser solicitadas para la fabricación de una pieza. (Homel-Etamic, 2012).

Por ello, el definir una tolerancia aceptable para cada dimensión de una parte, componente o ensamble es responsabilidad del ingeniero. En la figura 2.14 se muestran diferentes ejemplos de las tolerancias que se toman en cuenta para la fabricación de una pieza y su correcto funcionamiento. Toda dimensión debe ir acompañada de una tolerancia lo suficientemente reducida para asegurar un correcto desempeño de la pieza y tan holgada para que sea posible permitir un proceso de fabricación competitivo.

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA LA MEDICIÓN DE FUERZAS DE CORTE

3.1 Descripción de herramientas y equipo de medición

En el presente apartado se especifica el equipo utilizado durante la medición de las fuerzas de corte así como la preparación de los experimentos y herramientas utilizados.

- Torno convencional y accesorios
- Herramienta de corte
- Portaherramienta
- Dinamómetro
- Amplificador
- Tarjeta de adquisición de datos y licencia
- Computadora
- Cables de conexión
- Herramientales de acoplamiento al torno convencional
- Especímenes de prueba

Torno

Para llevar a cabo el proceso de cilindrado se utilizó un torno con las especificaciones que se muestran en la tabla 3.1. Un torno paralelo marca Titanium BJ1640, 16"x40" de reciente adquisición ubicado en el taller de la facultad de Ingeniería, división DIMEI, como se muestra en la figura 3.1.

Tabla 3.1.- Características del torno Titanium BJ1640D

Especificación	Unidades	Valor
Volteo sobre la bancada	mm	460
Volteo sobre el carro	mm	288
Distancia entre puntos	mm	1000
Viaje del carro transversal	mm	230
Viaje del carro auxiliar	mm	120
Rango de velocidades	RPM	32-200
Motor principal	HP	5.5
Peso	Kg	2000

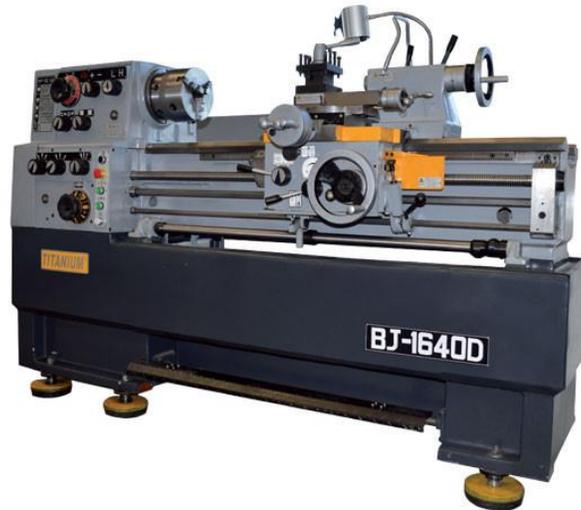


Figura 3.1.- Torno Titanium BJ1640D, utilizado en la medición de fuerza de corte.

Herramienta de corte

La herramienta de corte utilizada para el experimento es un inserto cuadrado de clasificación S tipo escuadra 90°, con ángulo de incidencia a 5° para un sistema de sujeción por presión.

Portaherramienta

El porta herramienta es de tipo fijación a presión para insertos sin agujero. El inserto es sujetado por una brida a presión que lo mantiene sobre el asiento del portaherramienta.

Dinamómetro Kistler

El dispositivo utilizado para la medición de las fuerzas de corte en esta tesis es un dinamómetro modelo 9263 estacionario de estructura modular que se monta en la torreta de la máquina herramienta, dicho dinamómetro se basa en un cristal piezoeléctrico contenido en su base, y como complemento una herramienta de corte, la cual es soportada de tal manera que se pueda cambiar y hacer pruebas sin alterar el sensor precargado.

El análisis de las fuerzas de corte es de gran valía para los procesos mecánicos de corte, por lo cual la aplicación de dinamómetros para medir dichas fuerzas de corte durante el maquinado es esencial para la investigación, monitoreo y optimizado en los procesos de torneado, taladrado, fresado, entre otros. En las últimas décadas, diferentes tipos de dinamómetros han sido utilizados en la industria y laboratorios de investigación para entender las principales formaciones de viruta, el desarrollo de modelos de fuerzas de corte, así mismo para el control de procesos de corte, optimizado de la geometría de

herramienta, monitoreo de las condiciones de la herramienta de corte, así como para la detección de vibraciones. (G. Totis, 2010).

La medición de las fuerzas de corte se realiza con un dinamómetro KISTLER mediante celdas de carga como se muestra en la figura 3.2 donde la fuerza de corte al momento de la medición se descompone en tres componentes F_c , F_f , y F_t .

- F_c : Asociada a la fuerza de corte en el eje z.
- F_t : Asociada a la fuerza de empuje en el eje y.
- F_f : Asociada a la fuerza de avance en el eje x.

Dichas celdas se encuentran previamente calibradas a solicitud del fabricante para garantizar un comportamiento lineal, de tal manera que las 3 celdas se pueden comunicar a través de tres cables con el amplificador.

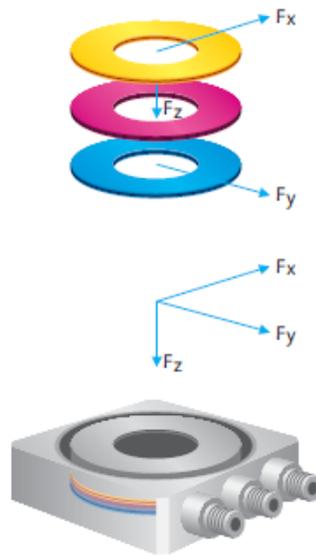


Figura 3.2.- Celdas utilizadas en el dinamómetro y las respectivas fuerzas que se encargan de medir, Adaptado de manual Kistler. (KISTLER, 2013).

Dichas celdas se encuentran dentro de la carcasa del dinamómetro como se muestra en la figura 3.3 acopladas de tal manera que puedan transmitir información de las fuerzas que están monitoreando. Estas celdas de carga sirven para monitorear las fuerzas a las que están siendo sometidas, utilizan dentro de sus materiales que las componen cristales piezoeléctricos, los cuales de ninguna manera se ven afectados por las condiciones de uso crítico que se presentan en el mecanizado; los materiales con los que cuentan los dinamómetros son diseñados y fabricados

para minimizar la vibración y la interferencia por la emisión acústica. La solidez y rigidez de estos sensores y componentes los hace ideales para los entornos de fabricación dinámica de los procesos de manufactura.

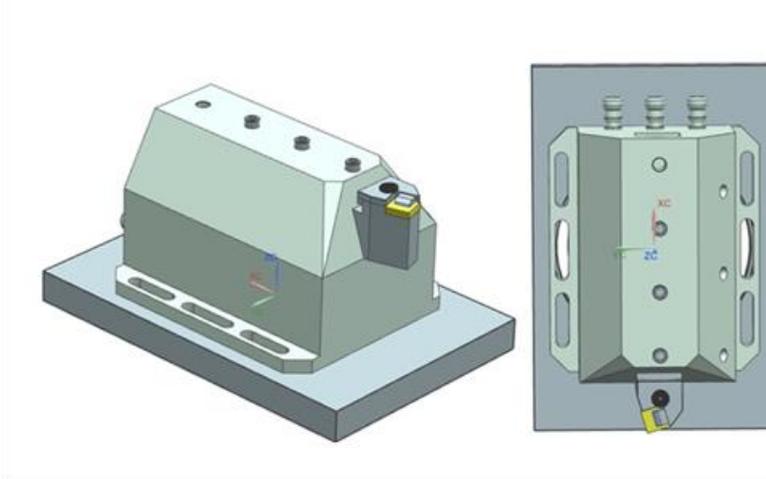


Figura 3.3.-Izquierda; Vista isométrica dinamómetro KISTLER con accesorios, Derecha; Vista superior de dinamómetro con portaherramientas.

Ventajas del dinamómetro Kistler utilizado para la medición de las fuerzas de corte:

- ✓ Alta rigidez
- ✓ Amplio rango de medición
- ✓ Rigidez
- ✓ Diseño versátil
- ✓ Larga vida útil
- ✓ Operación simple

Tarjeta de adquisición de datos y amplificador

La tarjeta de adquisición de datos es tipo DAQ tipo 5697A universal compatible con Dynoware, conexión a PC mediante USB, con capacidad de adquisición de hasta 28 canales. El amplificador de carga universal es de cuatro módulos amplificadores de carga con pantalla analógica de visualización, compatible con la tarjeta de adquisición de datos y el dinamómetro Kistler. En la figura 3.4 se muestra el conjunto de dispositivos utilizados para la base experimental del presente trabajo.

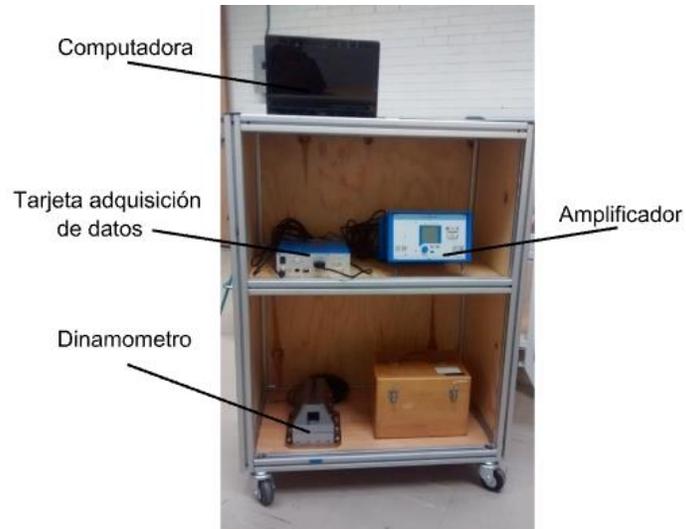


Figura 3.4 Conjunto de dispositivos utilizados en la medición de las fuerzas de corte

Software

DynoWare, es un software utilizado para la adquisición y muestra de datos compatible con dinamómetros y amplificadores de carga Kistler.

“Dynoware es un software para la medición de las fuerzas de corte en aplicaciones de dinamómetros, como se muestra en la figura 3.5., es un programa para guardar, analizar y visualizar la reacción de las fuerzas generadas. Aunque fue desarrollado específicamente para la medición de las fuerzas de corte en mecanizado. “(KISTLER, 2013).

Computadora

La computadora utilizada en el análisis presenta las siguientes características:

- Marca DELL Inspiron 14 3000 series
- Windows 8.1 Single
- Procesador Intel® Core™ i5-4210U CPU @ 1.79 GHz
- Memoria RAM 4.00 GB
- Sistema operativo de 64 bits

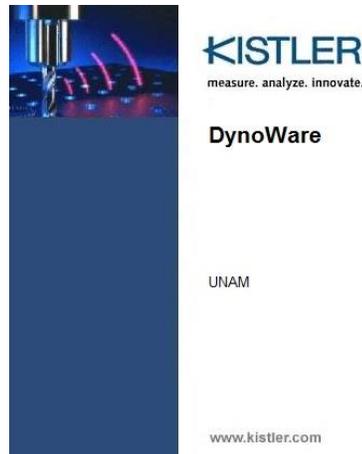


Figura 3.5.- Software DynoWare pantalla de bienvenida para la medición de las fuerzas de corte.

Especímenes

Aluminio ASTM 6061-T6

Aluminio ASTM 6061-T6: Se caracteriza por su excelente resistencia a la corrosión, buena maquinabilidad, y permite la mejora de las propiedades mecánicas mediante el endurecimiento por envejecimiento artificial.

Aplicaciones: Moldes de inyección de plásticos y equipo de transportación.

Densidad: 2.70 (g/cm³)

Punto de fusión: 652 (°C)

Dureza Brinell: 95HB

Módulo de elasticidad: 68.9 (GPa)

Coefficiente de Poisson: 0.33

Módulo de rigidez a corte: 26 (GPa)

Composición química del aluminio ASTM 6061-T6 tabla 3.2. (MatWeb, 2016).

Tabla 3.2.- Composición química del aluminio 6061

Aluminio, Al	95.8 - 98.6 %
Cromo, Cr	0.04 - 0.35 %
Cobre, Cu	0.15 - 0.40 %
Hierro, Fe	<= 0.70 %
Magnesio, Mg	0.80 - 1.2 %
Manganeso, Mn	<= 0.15 %
Otros,	<= 0.05 %
Otros, total	<= 0.15 %
Silicio, Si	0.40 - 0.80 %
Titanio, Ti	<= 0.15 %
Zinc, Zn	<= 0.25 %

Acero SAE 1018

Acero SAE 1018: Acero para construcción de maquinaria de bajo carbono, con facilidad de ser soldado y mecanizado. Presenta buena tenacidad y baja resistencia mecánica siendo adecuado para componentes de maquinaria que no demandan alta resistencia.

Utilizado para la fabricación mediante el maquinado por arranque de viruta y otros procesos en frío, utilizado principalmente en piezas para la industria metalmecánica y automotriz, con alta exactitud dimensional.

Densidad: 7.87 (g/cm³)

Dureza Brinell: 126 HB

Módulo de elasticidad: 200 (GPa)

Coefficiente de Poisson: 0.30

Módulo de rigidez a corte: 78 (GPa)

Composición química del acero SAE 1018 tabla 3.3. (MatWeb, 2016).

Tabla 3.3.- Composición química del acero 1018

Carbono, C	0.14-0.20 %
Hierro, Fe	98.81-99.26 %
Manganeso, Mn	0.60-0.90 %
Fósforo, P	<=0.040 %
Azufre, S	<=0.050%

Acero Inoxidable AISI 304

Acero inoxidable AISI 304: Excelentes propiedades de ductilidad y resistencia al golpe. Posee excelente resistencia a la corrosión en servicio continuo, su bajo contenido de carbono lo hace muy apropiado para soldadura.

Aplicaciones: Evaporadores, tanques en general, partes de válvulas, utilizado en la industria; aeronáutica, naval, petroquímica, biomédica, alimentos, instalaciones criogénicas, destilerías, entre otras.

Densidad: 8.027 (g/cm³)

Dureza Brinell: 150 HB

Dureza Rockwell B: 80 HRB

Módulo de elasticidad: 193 (GPa)

Coefficiente de Poisson: 0.29

Módulo de rigidez a corte: 77 (GPa)

Composición química del Acero inoxidable AISI 304 tabla 3.4. (MatWeb, 2016).

Tabla 3.4.- Composición química del acero inoxidable AISI 304

Carbono, C	<=0.080 %
Cromo, Cr	18-20 %
Hierro, Fe	66.35-74 %
Manganeso, Mn	<=2.0 %
Níquel, Ni	8.0-10.5 %
Fósforo, P	<=0.045 %
Silicio, Si	<= 1.0 %
Azufre, S	<=0.030%

Dimensiones de los especímenes

Para llevar a cabo las mediciones experimentales de las fuerzas de corte se ocuparon 6 piezas de prueba de aluminio ASTM 6061-T6, 6 piezas de acero SAE 1018 y 6 piezas de acero inoxidable AISI 304, con las dimensiones solicitadas como se muestra en la figura 3.6.

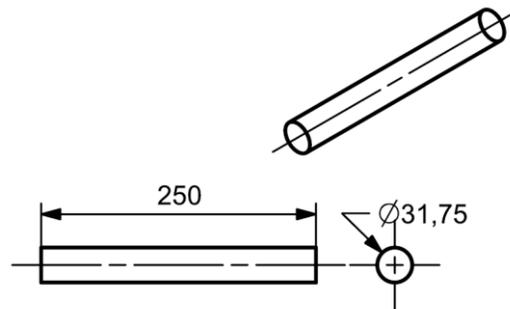


Figura 3.6. Dimensiones de las piezas experimentales en milímetros, dibujo hecho en NX 10.

3.2 Procedimiento para el desarrollo de la medición experimental

Para la presente tesis se realizaron pruebas en un torno paralelo Titanium modelo BJ1640D, con tres materiales; Aluminio 6061 a 95 HB, Acero 1018 a 126 HB y Acero Inoxidable 304 a 150 HB, se utilizaron 6 piezas de trabajo de cada material con las dimensiones antes indicadas para efectuar la comparación del proceso de mecanizado obtenido bajo los diferentes parámetros.

Los dispositivos empleados para la medición de las fuerzas fueron; dinamómetro calibrado por la empresa Kistler modelo 9263 para operaciones de torneado, un amplificador de señales Kistler 5070A, tarjeta de adquisición de datos Kistler 2825A y la paquetería DynoWare para la visualización y análisis de datos así como cables conectores blindados para la transmisión de los datos. Como complemento se diseñó y fabricó herramientas que permiten el montaje del dinamómetro en el torno.

Una vez adaptado el dinamómetro sobre el carro longitudinal se procede a colocar el porta herramienta con la respectiva herramienta de corte en la punta, como se pudo apreciar en la figura 3.3 después de tener dicha configuración se procede a conectar los cables para establecer señal entre el dinamómetro y el amplificador. En la figura 3.7 se ejemplifica la distribución de componentes necesarios para llevar a efecto la medición de fuerzas de corte en operaciones de torneado.

Realizada la instalación del dinamómetro con una adecuada conexión se procede a colocar la pieza de trabajo en el plato universal chuck de 3 mordazas de tal forma que se garantice su correcto centrado sujetando 70 (mm) de la pieza de trabajo, después se marcan 60 (mm) de seguridad para evitar maquinar esa parte y garantizar que el dinamómetro no sufra daño alguno. Por último los 120 (mm) restantes se dividen en 4 zonas de maquinado, donde en cada una se variara un avance diferente para posteriormente hacer una comparación visual.

En la figura 3.8 se puede apreciar la posición de una pieza de trabajo con cuatro zonas a maquinar de 30 (mm) cada una para realizar desbastes variando el avance (f) y que sea posible distinguir las variaciones en los acabados superficiales. En este caso solamente se limitó a realizar una inspección visual de la pieza, ya que el propósito del presente trabajo es la medición experimental de las fuerzas de corte y sus efectos en el acabado de forma cualitativa, el análisis de rugosidad y dimensional se omitirán, sin embargo se proponen para trabajos futuros.

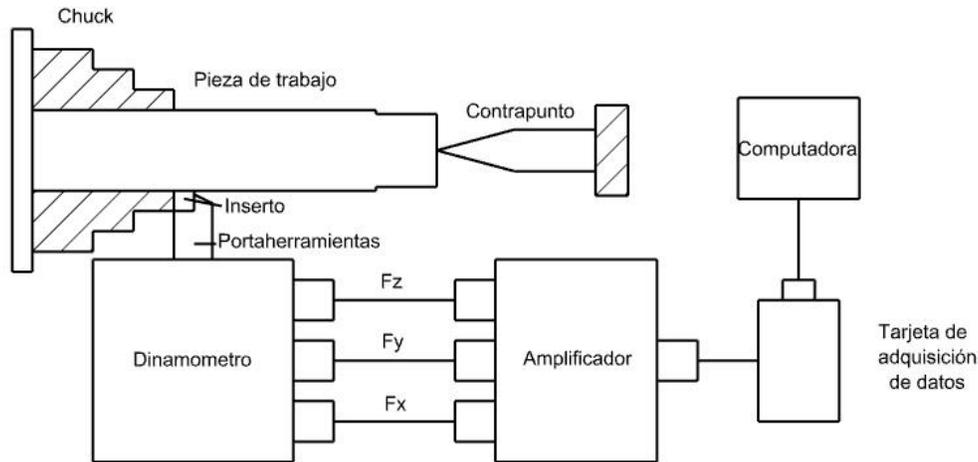


Figura 3.7.- Esquema de conexión de los dispositivos que se utilizan en la medición de fuerzas de corte, hecho en NX 10.

Realizado lo anterior se ajustan los parámetros de corte como son velocidad del husillo (rpm) y avance en el torno.

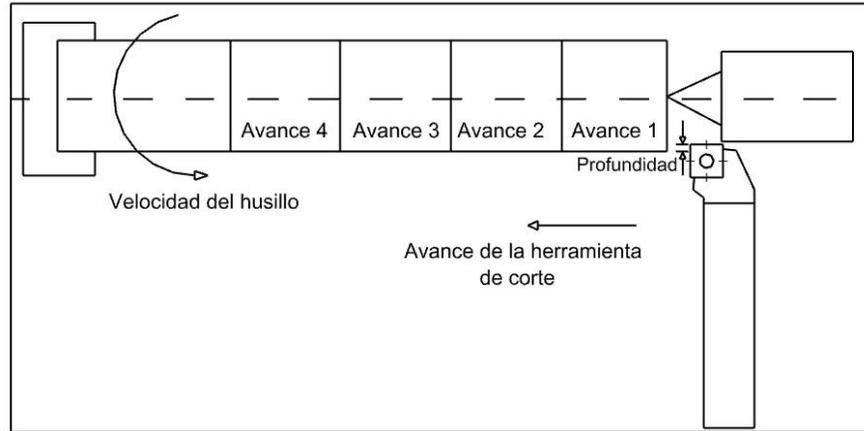


Figura 3.8.- Esquema de montaje propuesto para los ensayos de mecanizado. Adaptado de determinación experimental de la fuerza de corte de la aleación AA A356 T6 en operaciones de torneado. (Pereira & Romanello, 2007).

En la figura 3.9 se identifican los dispositivos de medición de fuerzas de corte en una prueba de cilindrado. Los ensayos se realizaron en un torno horizontal convencional con una potencia 5.5 hp y un peso de 2000 kg que brinda una buena estabilidad en la manufactura aún en velocidades de 1600 a 2000 RPM.



Figura3.9.- Dispositivos para las pruebas de medición de fuerzas de corte.

En la figura 3.10 se aprecia el conjunto de dispositivos durante su operación.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO



Figura 3.10.- Experimento de prueba para el maquinado en acero 1018.

Después de haber realizado una serie de pruebas para confirmar el correcto funcionamiento del equipo y se procedió a configurar la computadora para realizar las lecturas en la figura 3.11 se puede apreciar los parámetros ingresados en el software Dynoware, dichos parámetros son la sensibilidad del equipo, el rango de medición, la frecuencia que se va a utilizar en los experimentos y el tiempo que durará la medición.

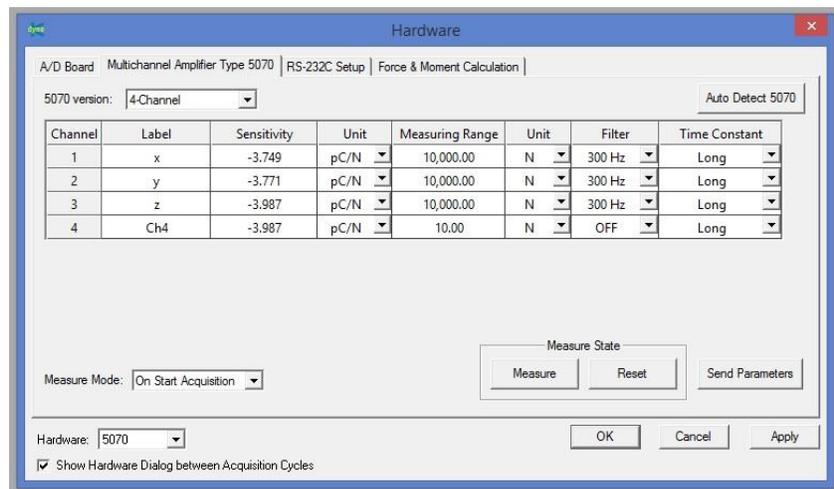


Figura 3.11.-Configuración de software para realizar las mediciones.

Configurado el software se procede a realizar pruebas de medición, en la figura 3.12 es posible identificar dos zonas, a la extrema derecha se tiene una apariencia opaca que expone un acabado más burdo que en la zona central de la pieza donde el acabado es mejor.

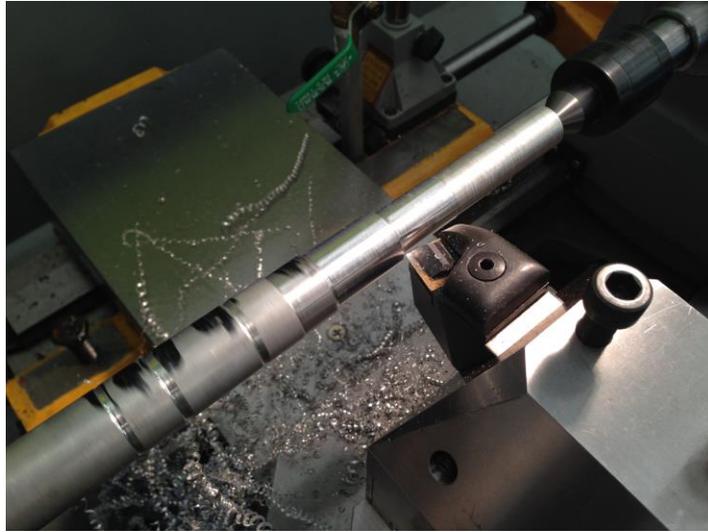


Figura 3.12.- Prueba de medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 T6.

En la figura 3.13 se muestra como se desprende la viruta respecto a una profundidad de corte considerable de 0.60 (mm), en aluminio 6061.



Figura 3.13.-Prueba experimental de maquinado en aluminio 6061 T6.

Así, en la figura 3.14 se muestra la respectiva grafica obtenida al realizar una medición experimental en aluminio 6061 T6, en donde se puede apreciar la medición de 3 respectivas fuerzas que se presentan durante el mecanizado, en este gráfico se puede apreciar de color morado la fuerza de corte, de color rojo la fuerza de empuje y la fuerza de avance en color azul. En dicha figura se puede apreciar como las fuerzas predominantes son la fuerza de corte y la fuerza de empuje.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

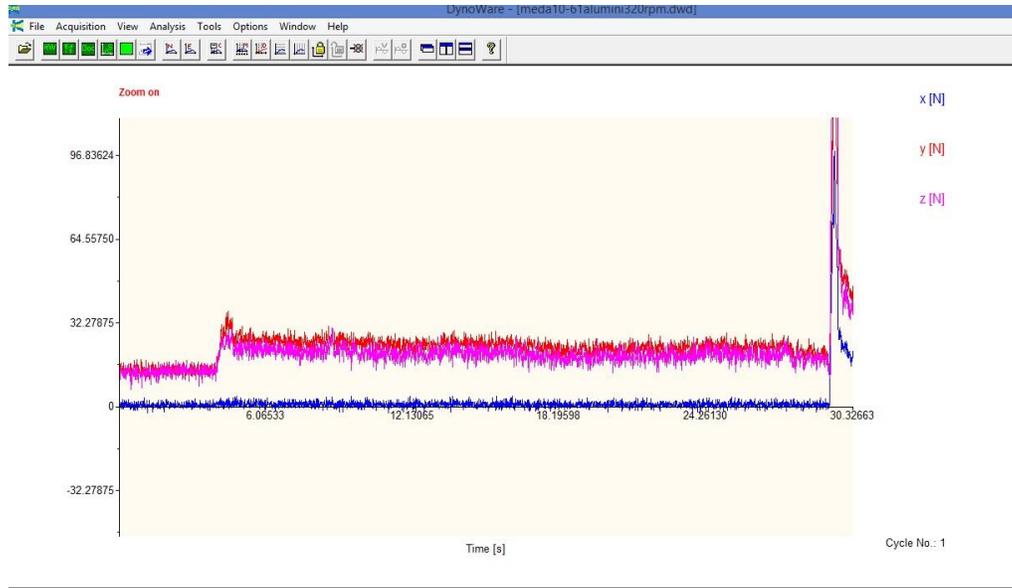


Figura 3.14. Gráfica de la medición experimental de las tres fuerzas obtenidas con el dinamómetro a una profundidad de corte aproximada de 0.12 mm.

De igual forma en la figura 3.15 se muestra la gráfica obtenida al realizar una medición con una profundidad de corte que alcanza un valor de 180 (N) aproximadamente, con esta gráfica es factible corroborar que el comportamiento de las gráficas es similar a pesar de que se tiene mayor profundidad de corte, además de que se aprecia que empieza a tener menor estabilidad el comportamiento de la gráfica 3.15 en comparación con la presentada en la figura 3.14.

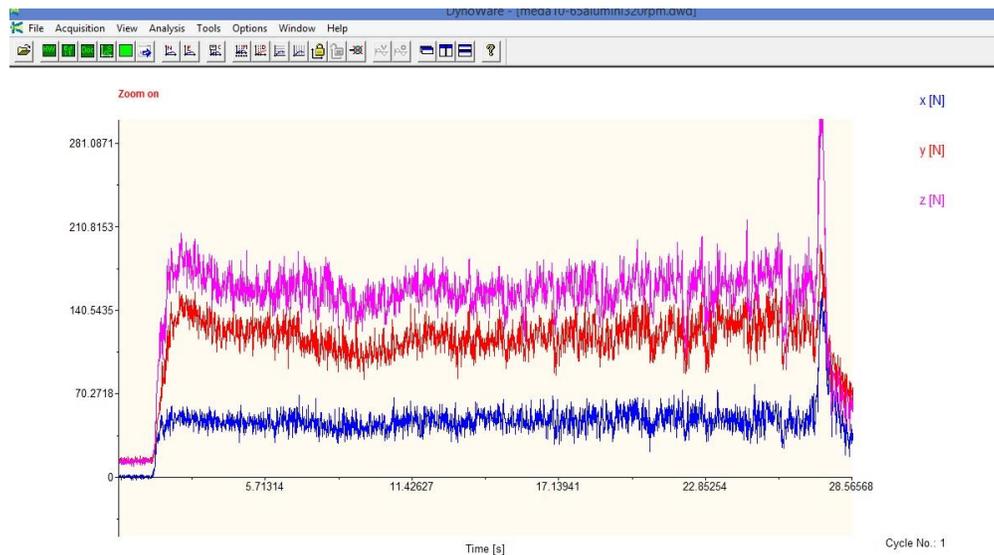


Figura 3.15. Gráfica de la medición experimental obtenida con el dinamómetro, a profundidad de corte aproximadamente de 1 mm.

Cabe resaltar que el manejo de datos y su análisis ha sido una tarea de gran valor ya que se realizaron en total 452 mediciones de las cuales solo se utilizaron 345 mediciones para analizar como efectivas. Las 107 mediciones descartadas para sus análisis fueron con las que se inició la familiarización y limitantes del equipo. Es importante mencionar que los datos capturados por segundo son 100, y que el tiempo de maquinado para una superficie de prueba fue de 30 a 60 segundos, así los valores para una prueba con un periodo de tiempo de 60 segundos fueron 6000 datos para su posterior análisis y concluir con un concentrado de valores en forma de un gráfico.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE LA MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE

4.1 Análisis de resultados

Mediante el análisis de todos los resultados obtenidos se comprobó que a un mayor avance se producen mayores fuerzas de corte, lo mismo que a mayor profundidad de corte existen mayores fuerzas. Confirmando de la misma manera que la fuerza de corte aumenta con el tamaño de la viruta. Lo anterior representa una comprobación de lo indicado en todos los textos.

En el caso concreto del cilindrado los problemas suelen estar relacionados con la obtención de la calidad y la integridad superficial requeridas que están asociados principalmente con el desgaste de la herramienta, las vibraciones y la rigidez de la máquina. Para el correcto desarrollo de un proceso de torneado es necesaria la utilización de una máquina adecuada, principalmente de alta rigidez y potencia, pero normalmente se utilizan las máquinas disponibles por lo que la mejora del rendimiento del proceso pasa por seleccionar adecuadamente otros aspectos como las herramientas y las condiciones de corte. Por lo cual en la siguiente familia de tablas y gráficas se muestran los resultados obtenidos con los dispositivos descritos en el apartado 4.4 del presente trabajo.

Cabe mencionar que la medición de las fuerzas de corte sirve como comprobación y generador de información a las simulaciones por elemento finito del proceso de mecanizado. A continuación se presentan las gráficas obtenidas en el proceso de cilindrado para aluminio 6064 T6, acero 1018 y acero inoxidable 304.

Los datos propuestos para las mediciones experimentales como velocidad del husillo y avance se tomaron en base a las disponibilidades del torno utilizado, así como los demás parámetros propuestos se tomaron de acuerdo a los rangos de valores que se encuentran en la literatura.

Datos de entrada para el proceso experimental.

- Velocidad del husillo: 70, 160, 320, 700 y 1600 rpm
- Avance para desbaste: 0.101, 0.151, 0.202, 0.304, 0.405 mm/rev
- Avance para acabado: 0.038, 0.051, 0.076, 0.101 mm/rev
- Profundidad de corte: 0.04, 0.12, 0.20, 0.60, 1 mm
- Ángulo de posición constante para todas las mediciones a 75° medido entre el filo principal del inserto y el eje de avance.
- En todos los casos el mecanizado se realizó sin ningún fluido para corte.

En la figura 4.1 se presenta un análisis de las gráficas obtenidas para determinar la fuerza de corte experimental, donde dichas gráficas pasan por dos estados, el transitorio y el estacionario. Para el análisis de estas gráficas cabe destacar que solo se tomaron los datos de un lapso de tiempo, en el presente trabajo se tomaron solo 5 segundos de la parte más estable de la gráfica que equivale a analizar 500 datos, donde se obtiene la media aritmética y establece un dato promedio de la fuerza de corte, fuerza de empuje y fuerza de avance.

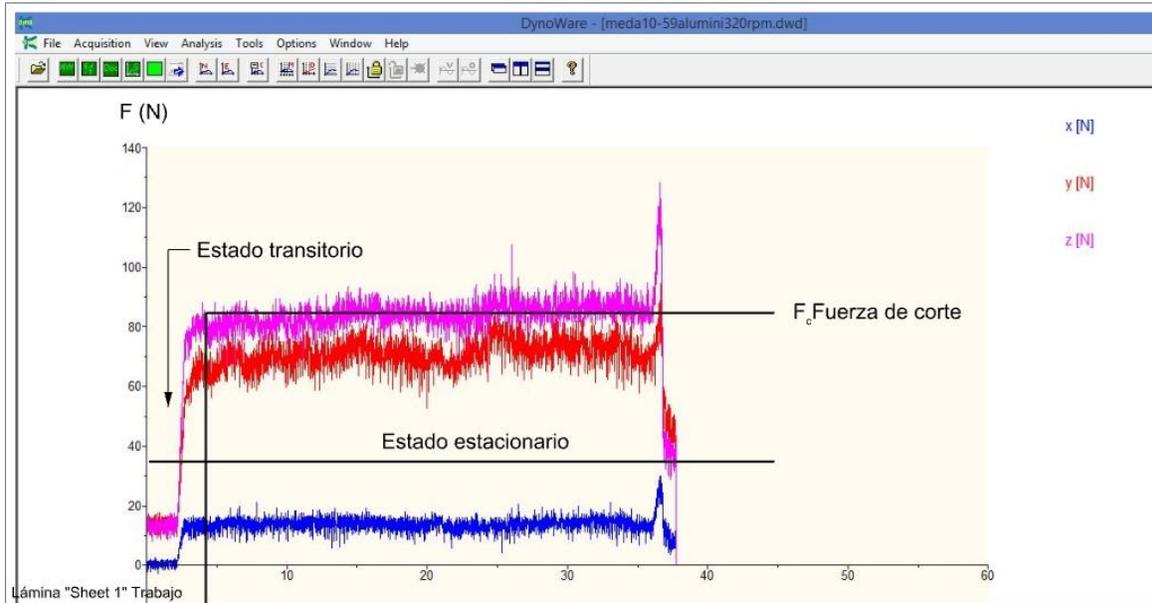


Figura 4.1.- Gráfica obtenida de la medición de las fuerzas de corte donde se muestra el estado transitorio y estacionario.

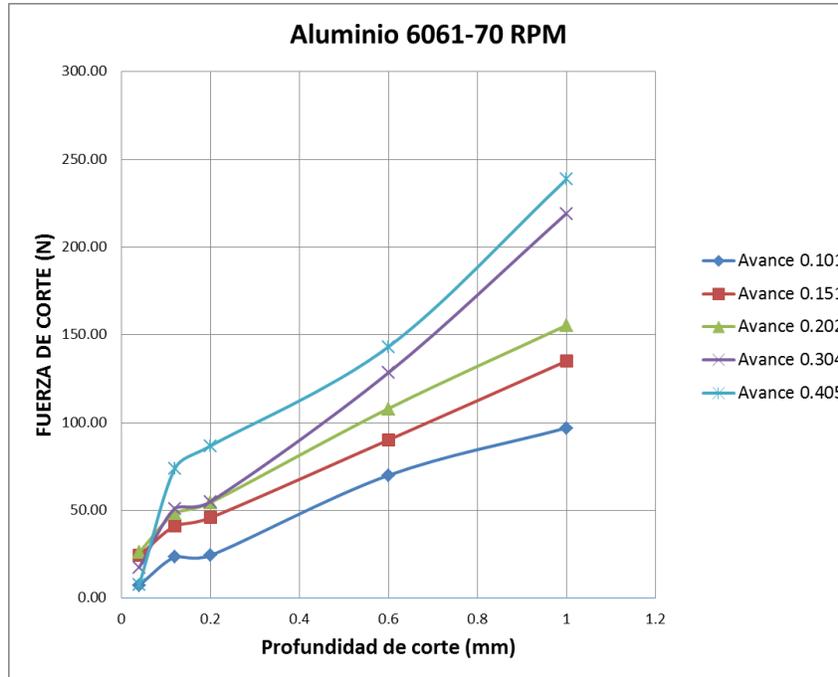
4.2 Comportamiento de la fuerza de corte para aluminio 6061 T6.

Las curvas experimentales suavizadas para cada combinación de parámetros fueron analizadas, y obtenidas de los experimentos antes mencionados, representando dichos datos de manera global en los siguientes gráficos. Los valores capturados también se desglosan en las tablas siguientes.

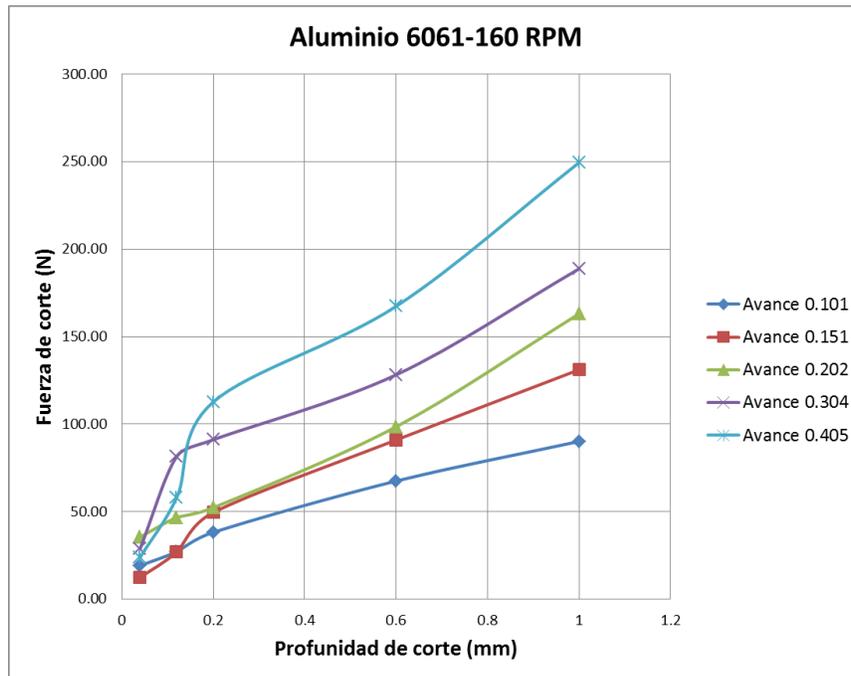
Los siguientes gráficos describen el comportamiento que tuvo la fuerza de corte en el material aluminio 6061 al variar dichos parámetros, los cuales se pueden comparar con los distintos gráficos para ver el aumento de la fuerza de corte.

Los cinco gráficos representados corresponden a dos secciones planteadas en las pruebas experimentales, los tres primeros corresponden a parámetros para desbaste, y por ende los dos últimos corresponden a parámetros de acabado.

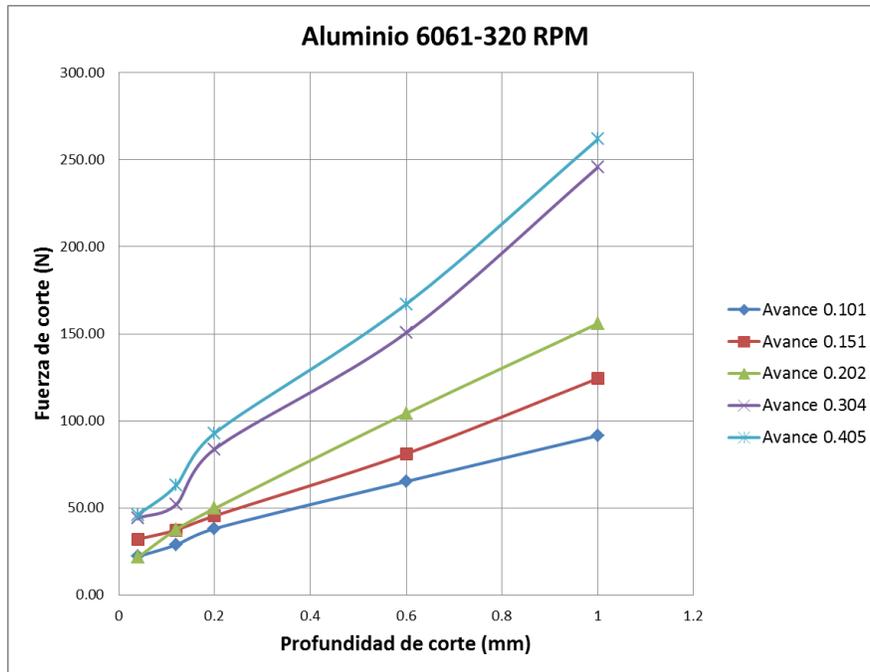
En los tres primeros gráficos se aprecia que el valor de fuerza de corte máximo es 260 (N) aproximadamente para desbaste de hasta 1.00 (mm). Con respecto a parámetros de acabado el valor máximo presentado es 82 (N) para profundidades de hasta 0.60 (mm).



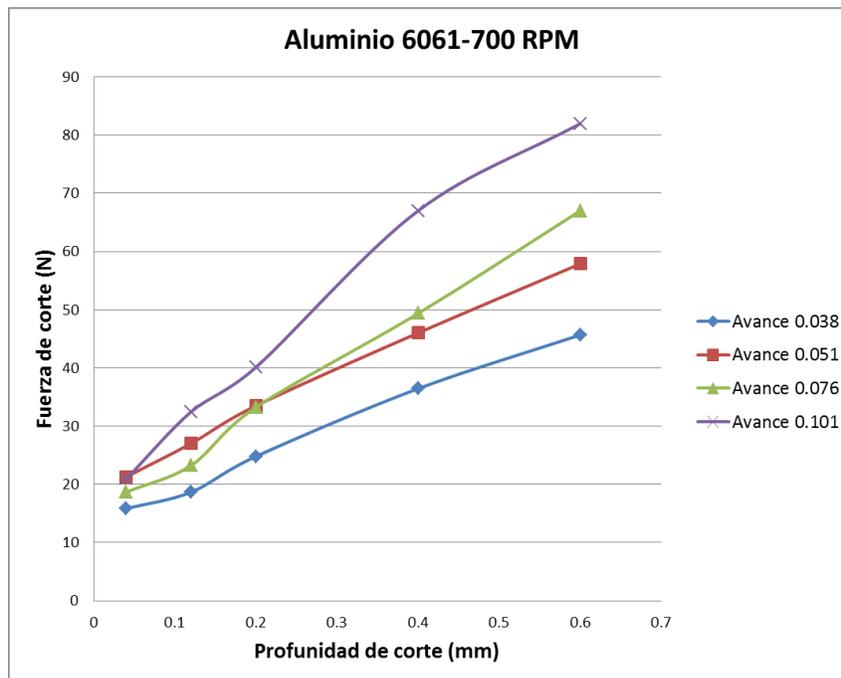
Gráfica 4.1.- Medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



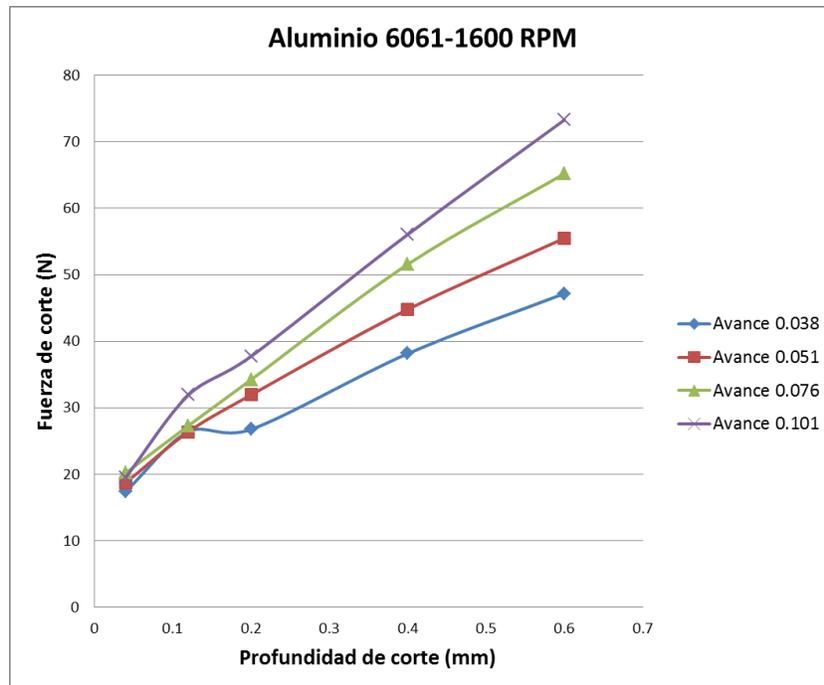
Gráfica 4.2.- Medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.3.- Medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.4.- Medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.5.- Medición de la fuerza de corte en aluminio 6061 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).

Las siguientes tablas son datos explícitos correspondientes a los gráficos antes mostrados respectivos a aluminio 6061, en los que se desglosa de manera detallada cada uno de los parámetros, cálculos teóricos y las respectivas tres fuerzas experimentales obtenidas.

Significado de cada abreviación utilizada en las tablas siguientes:

M: Material	d: Profundidad
Al: Aluminio	X: Fuerza de avance experimental
Rev: Revoluciones	Y: Fuerza de empuje experimental
D: Diámetro de material	Z: Fuerzas de corte experimental
f: Avance	Fc teórica: Fuerza de corte teórica calculada como en el subtema 2.3

Cabe destacar que en dichas tablas se incluyó el apartado de calidad de la pieza, aunque este apartado no tiene gran sustento como una medición de rugosidad, es una apreciación visual cualitativa del presentador de esta tesis, por lo cual se describe la siguiente escala cualitativa:

- Acabado malo: se presenta una discontinuidad absoluta en la pieza visual y táctil.
- Acabado regular: se aprecia cierto rayado del maquinado pero es uniforme y continuo.
- Acabado bueno: La pieza presenta uniformidad, no se distingue ningún rayado visual o táctil.
- Acabado excelente: La pieza denota uniformidad y brillo.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.1. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para aluminio 6061 a 70 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	Al	70	0.101	7.07	0.04	30.50	-1.18	2.20	7.30	3.56	bueno	4.24	
2	Al	70	0.101	7.07	0.12	30.50	0.62	20.86	23.42	10.69	bueno	4.24	
3	Al	70	0.101	7.07	0.20	30.50	2.62	25.49	24.35	17.82	bueno	4.24	
4	Al	70	0.101	7.07	0.60	30.50	10.90	51.34	69.96	53.47	bueno	4.24	
5	Al	70	0.101	7.07	1.00	30.50	21.04	70.23	96.93	89.12	bueno	4.24	
6	Al	70	0.151	10.57	0.04	30.50	-0.39	18.99	24.18	5.33	bueno	2.84	
7	Al	70	0.151	10.57	0.12	30.50	2.45	31.19	41.15	15.99	bueno	2.84	
8	Al	70	0.151	10.57	0.20	30.50	3.00	33.33	45.80	26.65	bueno	2.84	
9	Al	70	0.151	10.57	0.60	30.50	13.44	68.17	90.09	79.94	bueno	2.84	
10	Al	70	0.151	10.57	1.00	30.50	31.02	96.51	135.03	133.24	regular	2.84	
11	Al	70	0.202	14.14	0.04	30.50	0.11	22.48	26.14	7.13	regular	2.12	
12	Al	70	0.202	14.14	0.12	30.50	4.44	35.45	48.29	21.39	regular	2.12	
13	Al	70	0.202	14.14	0.20	30.50	4.88	40.46	54.47	35.65	regular	2.12	
14	Al	70	0.202	14.14	0.60	30.50	16.85	84.74	107.97	106.94	regular	2.12	
15	Al	70	0.202	14.14	1.00	30.50	31.77	110.18	155.41	178.24	regular	2.12	
16	Al	70	0.304	21.28	0.04	30.50	0.07	9.54	17.49	10.73	malo	1.41	
17	Al	70	0.304	21.28	0.12	30.50	3.45	42.52	51.03	32.19	malo	1.41	
18	Al	70	0.304	21.28	0.20	30.50	3.96	49.68	54.96	53.65	malo	1.41	
19	Al	70	0.304	21.28	0.60	30.50	16.69	119.24	128.37	160.94	malo	1.41	
20	Al	70	0.304	21.28	1.00	30.50	45.85	155.85	219.09	268.24	malo	1.41	
21	Al	70	0.405	28.35	0.04	30.50	-0.78	7.93	7.48	14.29	malo	1.06	
22	Al	70	0.405	28.35	0.12	30.50	6.28	62.93	73.73	42.88	malo	1.06	
23	Al	70	0.405	28.35	0.20	30.50	7.46	68.28	86.71	71.47	malo	1.06	
24	Al	70	0.405	28.35	0.60	30.50	22.33	110.98	143.18	214.41	malo	1.06	
25	Al	70	0.405	28.35	1.00	30.50	49.50	185.34	238.57	357.35	malo	1.06	

Tabla 4.2. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para aluminio 6061 a 160 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	Al	160	0.101	16.16	0.04	30.50	0.56	17.09	19.18	3.56	bueno	1.86	
2	Al	160	0.101	16.16	0.12	30.50	1.56	23.92	27.16	10.69	bueno	1.86	
3	Al	160	0.101	16.16	0.20	30.50	4.71	33.25	38.21	17.82	bueno	1.86	
4	Al	160	0.101	16.16	0.60	30.50	13.84	51.59	67.51	53.47	bueno	1.86	
5	Al	160	0.101	16.16	1.00	30.50	22.89	64.53	90.13	89.12	bueno	1.86	
6	Al	160	0.151	24.16	0.04	30.50	-0.01	6.48	12.35	5.33	bueno	1.24	
7	Al	160	0.151	24.16	0.12	30.50	1.51	21.36	26.95	15.99	bueno	1.24	
8	Al	160	0.151	24.16	0.20	30.50	5.26	39.40	49.54	26.65	bueno	1.24	
9	Al	160	0.151	24.16	0.60	30.50	16.87	65.71	91.01	79.94	bueno	1.24	
10	Al	160	0.151	24.16	1.00	30.50	32.29	91.61	131.15	133.24	regular	1.24	
11	Al	160	0.202	32.32	0.04	30.50	1.62	28.19	35.49	7.13	regular	0.93	
12	Al	160	0.202	32.32	0.12	30.50	4.71	34.42	46.62	21.39	regular	0.93	
13	Al	160	0.202	32.32	0.20	30.50	5.80	38.97	52.29	35.65	regular	0.93	
14	Al	160	0.202	32.32	0.60	30.50	17.67	71.36	98.53	106.94	regular	0.93	
15	Al	160	0.202	32.32	1.00	30.50	49.10	114.56	163.11	178.24	regular	0.93	
16	Al	160	0.304	48.64	0.04	30.50	1.01	25.80	28.82	10.73	malo	0.62	
17	Al	160	0.304	48.64	0.12	30.50	2.72	59.78	81.47	32.19	malo	0.62	
18	Al	160	0.304	48.64	0.20	30.50	4.20	65.30	91.11	53.65	malo	0.62	
19	Al	160	0.304	48.64	0.60	30.50	27.57	125.40	128.23	160.94	malo	0.62	
20	Al	160	0.304	48.64	1.00	30.50	79.48	175.18	188.81	268.24	malo	0.62	
21	Al	160	0.405	64.80	0.04	30.50	0.69	20.96	23.87	14.29	malo	0.46	
22	Al	160	0.405	64.80	0.12	30.50	4.74	46.43	57.99	42.88	malo	0.46	
23	Al	160	0.405	64.80	0.20	30.50	8.15	101.45	112.69	71.47	malo	0.46	
24	Al	160	0.405	64.80	0.60	30.50	26.19	114.37	167.39	214.41	malo	0.46	
25	Al	160	0.405	64.80	1.00	30.50	64.80	178.40	249.49	357.35	malo	0.46	

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.3. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para aluminio 6061 a 320 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
									z						
1	Al	320	0.101	32.32	0.04	30.50	0.97	17.72	22.16	3.56	bueno	0.93			
2	Al	320	0.101	32.32	0.12	30.50	2.98	24.38	28.83	10.69	bueno	0.93			
3	Al	320	0.101	32.32	0.20	30.50	5.71	33.38	38.13	17.82	bueno	0.93			
4	Al	320	0.101	32.32	0.60	30.50	15.27	47.50	65.21	53.47	bueno	0.93			
5	Al	320	0.101	32.32	1.00	30.50	24.88	65.16	91.52	89.12	bueno	0.93			
6	Al	320	0.151	48.32	0.04	30.50	1.91	27.19	32.10	5.33	bueno	0.62			
7	Al	320	0.151	48.32	0.12	30.50	2.78	30.59	37.34	15.99	bueno	0.62			
8	Al	320	0.151	48.32	0.20	30.50	4.42	36.02	45.48	26.65	bueno	0.62			
9	Al	320	0.151	48.32	0.60	30.50	13.79	61.55	81.16	79.94	bueno	0.62			
10	Al	320	0.151	48.32	1.00	30.50	34.27	80.73	124.36	133.24	regular	0.62			
11	Al	320	0.202	64.64	0.04	30.50	1.03	18.38	21.70	7.13	regular	0.46			
12	Al	320	0.202	64.64	0.12	30.50	3.21	30.94	37.65	21.39	regular	0.46			
13	Al	320	0.202	64.64	0.20	30.50	4.94	39.34	49.71	35.65	regular	0.46			
14	Al	320	0.202	64.64	0.60	30.50	22.82	78.79	104.28	106.94	regular	0.46			
15	Al	320	0.202	64.64	1.00	30.50	48.26	110.79	155.89	178.24	regular	0.46			
16	Al	320	0.304	97.28	0.04	30.50	1.30	38.82	44.19	10.73	malo	0.31			
17	Al	320	0.304	97.28	0.12	30.50	3.47	41.47	52.00	32.19	malo	0.31			
18	Al	320	0.304	97.28	0.20	30.50	27.44	128.00	83.80	53.65	malo	0.31			
19	Al	320	0.304	97.28	0.60	30.50	66.64	133.10	150.60	160.94	malo	0.31			
20	Al	320	0.304	97.28	1.00	30.50	67.14	202.37	245.61	268.24	malo	0.31			
21	Al	320	0.405	129.6	0.04	30.50	10.58	40.69	46.10	14.29	malo	0.23			
22	Al	320	0.405	129.6	0.12	30.50	12.61	50.64	63.03	42.88	malo	0.23			
23	Al	320	0.405	129.6	0.20	30.50	21.10	65.93	92.88	71.47	malo	0.23			
24	Al	320	0.405	129.6	0.60	30.50	46.49	131.80	167.05	214.41	malo	0.23			
25	Al	320	0.405	129.6	1.00	30.50	91.11	196.32	261.78	357.35	malo	0.23			

Tabla 4.4. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para aluminio 6061 a 700 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
									z						
1	Al	700	0.038	26.6	0.04	30.5	1.28	10.34	15.83	1.34	bueno	1.13			
2	Al	700	0.038	26.6	0.12	30.5	1.73	11.82	18.66	4.02	bueno	1.13			
3	Al	700	0.038	26.6	0.20	30.5	4.05	19.77	24.8	6.71	bueno	1.13			
4	Al	700	0.038	26.6	0.40	30.5	8.11	20.64	36.45	13.41	bueno	1.13			
5	Al	700	0.038	26.6	0.60	30.5	14.21	28.11	45.68	20.12	bueno	1.13			
6	Al	700	0.051	35.7	0.04	30.5	1.816	15.85	21.29	1.80	bueno	0.84			
7	Al	700	0.051	35.7	0.12	30.5	4.416	15.14	27.03	5.40	bueno	0.84			
8	Al	700	0.051	35.7	0.20	30.5	6.717	23.74	33.5	9.00	bueno	0.84			
9	Al	700	0.051	35.7	0.40	30.5	13.47	37.5	46.02	18.00	bueno	0.84			
10	Al	700	0.051	35.7	0.60	30.5	20.42	48.66	57.89	27.00	bueno	0.84			
11	Al	700	0.076	53.2	0.04	30.5	1.86	20.32	18.67	2.68	bueno	0.56			
12	Al	700	0.076	53.2	0.12	30.5	2.86	20.56	23.26	8.05	bueno	0.56			
13	Al	700	0.076	53.2	0.20	30.5	5.963	35.57	33.25	13.41	bueno	0.56			
14	Al	700	0.076	53.2	0.40	30.5	12.19	53.02	49.37	26.82	bueno	0.56			
15	Al	700	0.076	53.2	0.60	30.5	20.46	66.9	67.02	40.24	bueno	0.56			
16	Al	700	0.101	70.7	0.04	30.5	1.92	25.86	20.92	3.56	regular	0.42			
17	Al	700	0.101	70.7	0.12	30.5	4.51	36.1	32.48	10.69	regular	0.42			
18	Al	700	0.101	70.7	0.20	30.5	6.82	43.95	40.13	17.82	regular	0.42			
19	Al	700	0.101	70.7	0.40	30.5	17.66	68.94	67.01	35.65	regular	0.42			
20	Al	700	0.101	70.7	0.60	30.5	24.54	75.04	81.98	53.47	regular	0.42			

Tabla 4.5. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para aluminio 6061 a 1600 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
									z						
1	Al	1600	0.038	60.8	0.04	30.5	1.80	19.72	17.44	1.34	bueno	0.49			
2	Al	1600	0.038	60.8	0.12	30.5	4.20	30.90	26.43	4.02	bueno	0.49			
3	Al	1600	0.038	60.8	0.20	30.5	5.53	30.72	26.77	6.71	bueno	0.49			
4	Al	1600	0.038	60.8	0.40	30.5	11.26	41.79	38.15	13.41	bueno	0.49			
5	Al	1600	0.038	60.8	0.60	30.5	16.78	52.27	47.18	20.12	bueno	0.49			
6	Al	1600	0.051	81.6	0.04	30.5	1.77	19.22	18.74	1.80	bueno	0.37			
7	Al	1600	0.051	81.6	0.12	30.5	3.80	29.77	26.40	5.40	bueno	0.37			
8	Al	1600	0.051	81.6	0.20	30.5	6.21	35.70	31.95	9.00	bueno	0.37			
9	Al	1600	0.051	81.6	0.40	30.5	13.23	48.87	44.80	18.00	bueno	0.37			
10	Al	1600	0.051	81.6	0.60	30.5	20.30	59.90	55.50	27.00	bueno	0.37			
11	Al	1600	0.076	121.6	0.04	30.5	2.05	24.01	20.22	2.68	excelente	0.25			
12	Al	1600	0.076	121.6	0.12	30.5	4.44	32.17	27.32	8.05	excelente	0.25			
13	Al	1600	0.076	121.6	0.20	30.5	7.00	39.22	34.24	13.41	excelente	0.25			
14	Al	1600	0.076	121.6	0.40	30.5	16.05	56.50	51.58	26.82	excelente	0.25			
15	Al	1600	0.076	121.6	0.60	30.5	23.83	69.00	65.22	40.24	excelente	0.25			
16	Al	1600	0.101	161.6	0.04	30.5	1.75	23.31	19.55	3.56	excelente	0.19			
17	Al	1600	0.101	161.6	0.12	30.5	4.86	36.51	31.93	10.69	excelente	0.19			
18	Al	1600	0.101	161.6	0.20	30.5	7.32	40.57	37.75	17.82	excelente	0.19			
19	Al	1600	0.101	161.6	0.40	30.5	13.24	59.56	56.07	35.65	excelente	0.19			
20	Al	1600	0.101	161.6	0.60	30.5	26.83	79.02	73.29	53.47	excelente	0.19			

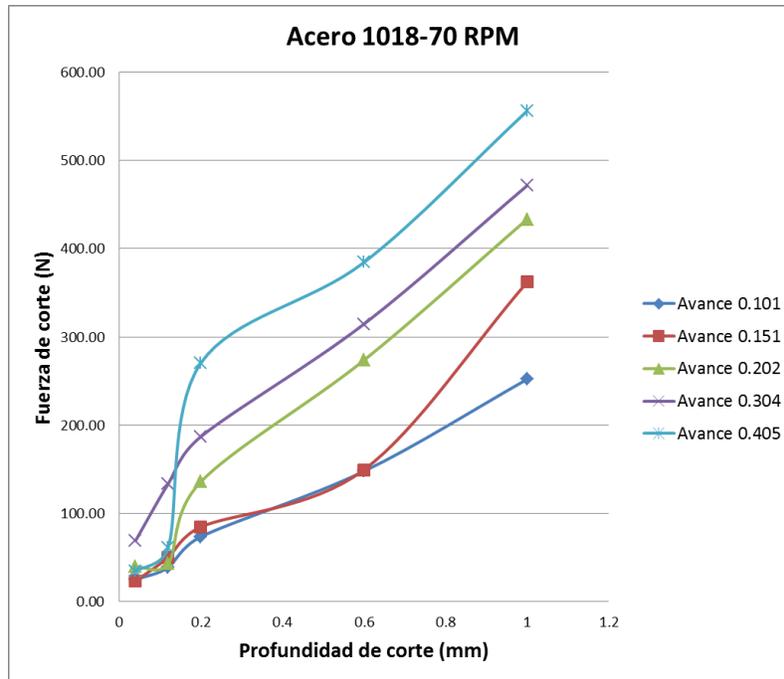
4.3 Comportamiento de la fuerza de corte para acero 1018.

En el presente tema se muestran el conjunto de gráficas de la fuerza de corte obtenidas versus tiempo, medidas experimentalmente para el material acero 1018. De manera similar que el subtema 4.2 se representan las curvas experimentales para cada combinación de parámetros, representando los datos de manera global en los siguientes gráficos. Los valores capturados también se desglosan en las tablas siguientes.

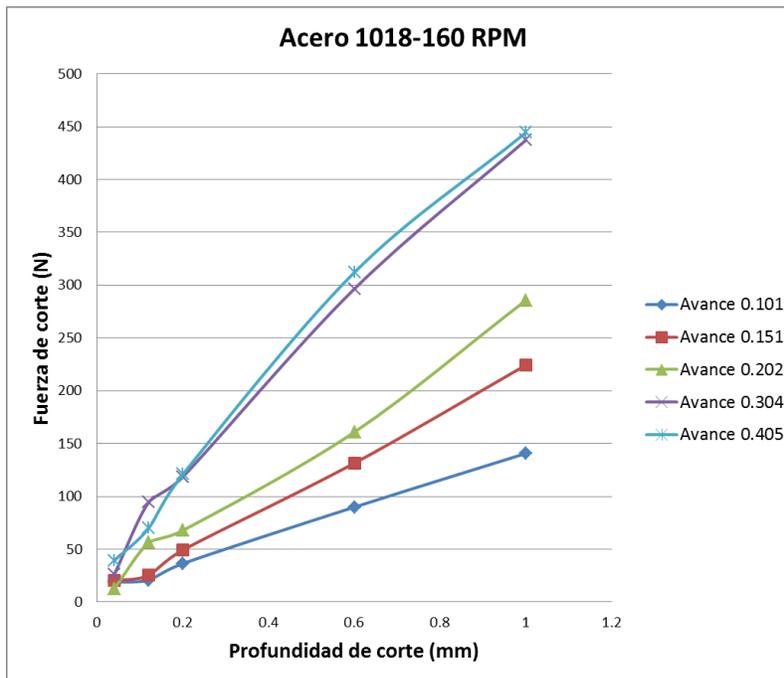
Los siguientes gráficos describen el comportamiento que tuvo la fuerza de corte en el material acero 1018 al variar dichos parámetros, los cuales se pueden comparar con los distintos gráficos para ver el aumento de la fuerza de corte.

Los cinco gráficos representados corresponden a dos secciones planteadas en las pruebas experimentales, al igual que en el apartado 4.2.

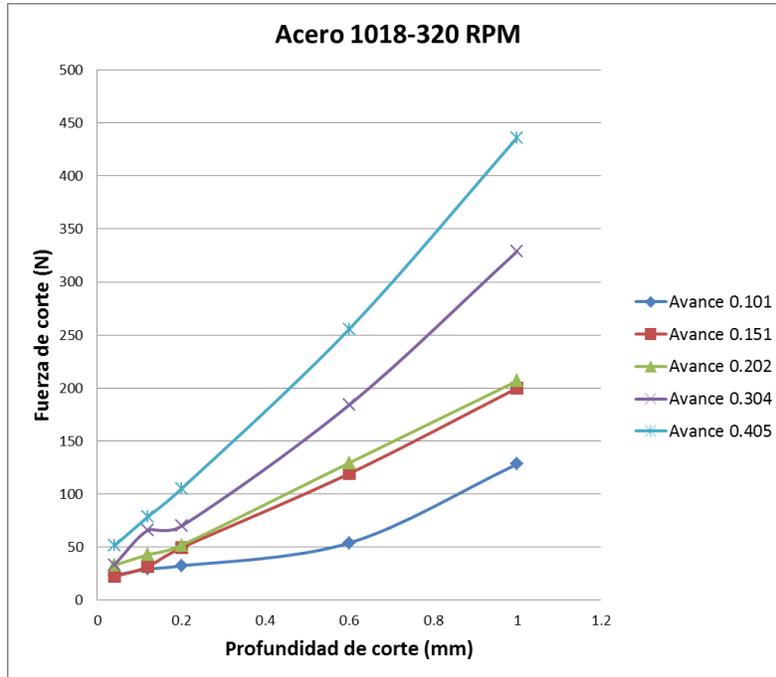
En los tres primeros gráficos se aprecia que el valor de fuerza de corte máximo es 550 (N) aproximadamente para desbaste de hasta 1.00 (mm). Con respecto a parámetros de acabado el valor máximo presentado es 340 (N) para profundidades de hasta 0.60 (mm).



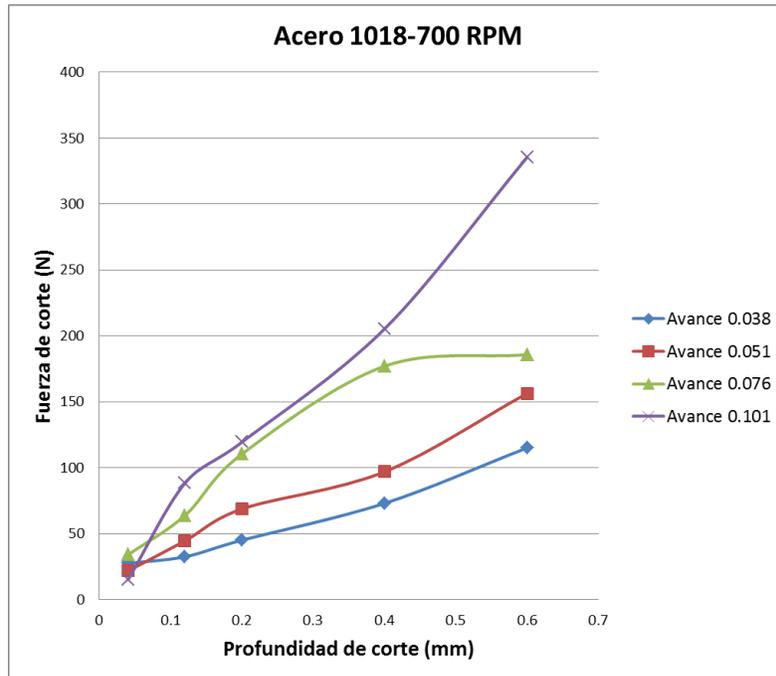
Gráfica 4.6.- Medición de la fuerza de corte en acero 1018 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



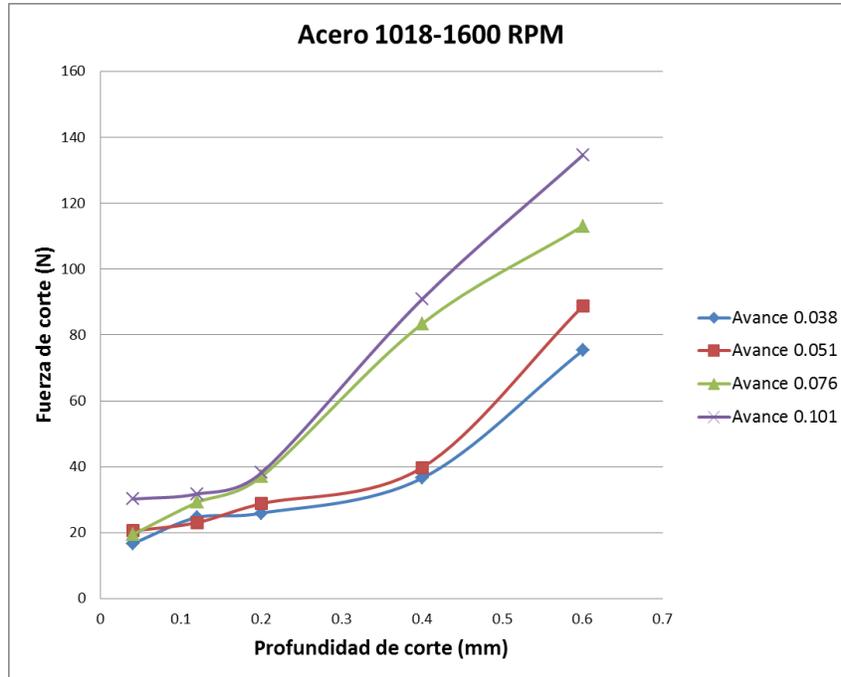
Gráfica 4.7.- Medición de la fuerza de corte en acero 1018 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.8.- Medición de la fuerza de corte en acero 1018 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.9.- Medición de la fuerza de corte en acero 1018 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.10.- Medición de la fuerza de corte en acero 1018 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).

Las siguientes tablas son datos explícitos correspondientes a los gráficos antes mostrados de acero 1018, en los que se desglosa de manera detallada cada uno de los parámetros, cálculos teóricos y las respectivas tres fuerzas experimentales obtenidas, de la misma forma que se describió para los resultados de aluminio.

Significado de cada abreviación utilizada en las tablas siguientes:

M: Material	d: Profundidad
Al: Aluminio	X: Fuerza de avance experimental
Rev: Revoluciones	Y: Fuerza de empuje experimental
D: Diámetro de material	Z: Fuerzas de corte experimental
f: Avance	Fc teórica: Fuerza de corte teórica calculada como en el subtema 2.3

El acabado superficial también se incluyó en las tablas siguientes bajo la misma descripción cualitativa explicada en el subtema 4.2.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.6. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero1018 a 70 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
									z						
1	A.1018	70	0.101	7.07	0.04	30.5	1.90	21.05	24.92	7.92	regular	4.24			
2	A.1018	70	0.101	7.07	0.12	30.5	6.58	36.24	38.57	23.76	regular	4.24			
3	A.1018	70	0.101	7.07	0.20	30.5	8.99	61.16	73.42	39.61	regular	4.24			
4	A.1018	70	0.101	7.07	0.60	30.5	34.76	112.71	147.79	118.82	regular	4.24			
5	A.1018	70	0.101	7.07	1.00	30.5	72.39	169.93	252.09	198.04	regular	4.24			
6	A.1018	70	0.151	10.57	0.04	30.5	22.20	-37.16	23.14	11.84	regular	2.84			
7	A.1018	70	0.151	10.57	0.12	30.5	5.62	36.03	50.03	35.53	malo	2.84			
8	A.1018	70	0.151	10.57	0.20	30.5	12.45	73.09	84.57	59.22	malo	2.84			
9	A.1018	70	0.151	10.57	0.60	30.5	51.17	56.90	149.42	177.65	malo	2.84			
10	A.1018	70	0.151	10.57	1.00	30.5	120.60	262.70	362.20	296.08	malo	2.84			
11	A.1018	70	0.202	14.14	0.04	30.5	1.70	33.29	39.58	15.84	malo	2.12			
12	A.1018	70	0.202	14.14	0.12	30.5	2.77	34.48	43.05	47.53	malo	2.12			
13	A.1018	70	0.202	14.14	0.20	30.5	32.43	142.52	135.80	79.22	malo	2.12			
14	A.1018	70	0.202	14.14	0.60	30.5	98.17	228.30	273.70	237.65	malo	2.12			
15	A.1018	70	0.202	14.14	1.00	30.5	123.43	304.53	433.54	396.08	malo	2.12			
16	A.1018	70	0.304	21.28	0.04	30.5	7.00	53.20	68.97	23.84	malo	1.41			
17	A.1018	70	0.304	21.28	0.12	30.5	14.04	123.43	133.29	71.53	malo	1.41			
18	A.1018	70	0.304	21.28	0.20	30.5	27.18	110.30	186.89	119.22	malo	1.41			
19	A.1018	70	0.304	21.28	0.60	30.5	59.31	205.61	314.70	357.65	malo	1.41			
20	A.1018	70	0.304	21.28	1.00	30.5	127.97	334.05	471.70	596.08	malo	1.41			
21	A.1018	70	0.405	28.35	0.04	30.5	3.25	32.94	34.86	31.76	malo	1.06			
22	A.1018	70	0.405	28.35	0.12	30.5	2.37	48.66	60.98	95.29	malo	1.06			
23	A.1018	70	0.405	28.35	0.20	30.5	39.90	209.19	270.30	158.82	malo	1.06			
24	A.1018	70	0.405	28.35	0.60	30.5	75.99	285.17	384.57	476.47	malo	1.06			
25	A.1018	70	0.405	28.35	1.00	30.5	137.55	395.76	556.26	794.12	malo	1.06			

Tabla 4.7. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero1018 a 160 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
									z						
1	A.1018	160	0.101	16.16	0.04	30.5	3.29	21.81	18.78	7.92	regular	1.86			
2	A.1018	160	0.101	16.16	0.12	30.5	1.45	23.20	20.76	23.76	regular	1.86			
3	A.1018	160	0.101	16.16	0.20	30.5	3.67	30.75	36.41	39.61	regular	1.86			
4	A.1018	160	0.101	16.16	0.60	30.5	19.48	59.93	89.84	118.82	regular	1.86			
5	A.1018	160	0.101	16.16	1.00	30.5	43.33	85.16	140.70	198.04	regular	1.86			
6	A.1018	160	0.151	24.16	0.04	30.5	0.85	22.05	20.16	11.84	regular	1.24			
7	A.1018	160	0.151	24.16	0.12	30.5	1.49	24.30	25.19	35.53	regular	1.24			
8	A.1018	160	0.151	24.16	0.20	30.5	5.99	40.93	49.27	59.22	regular	1.24			
9	A.1018	160	0.151	24.16	0.60	30.5	34.84	86.52	131.50	177.65	regular	1.24			
10	A.1018	160	0.151	24.16	1.00	30.5	69.93	142.70	224.30	296.08	regular	1.24			
11	A.1018	160	0.202	32.32	0.04	30.5	-0.10	16.72	12.80	15.84	malo	0.93			
12	A.1018	160	0.202	32.32	0.12	30.5	7.94	46.21	56.11	47.53	malo	0.93			
13	A.1018	160	0.202	32.32	0.20	30.5	6.04	55.40	67.80	79.22	malo	0.93			
14	A.1018	160	0.202	32.32	0.60	30.5	37.46	111.50	160.90	237.65	malo	0.93			
15	A.1018	160	0.202	32.32	1.00	30.5	89.65	181.00	285.70	396.08	malo	0.93			
16	A.1018	160	0.304	48.64	0.04	30.5	0.08	24.19	26.32	23.84	malo	0.62			
17	A.1018	160	0.304	48.64	0.12	30.5	13.82	71.94	94.29	71.53	malo	0.62			
18	A.1018	160	0.304	48.64	0.20	30.5	18.42	98.69	118.61	119.22	malo	0.62			
19	A.1018	160	0.304	48.64	0.60	30.5	80.98	235.10	296.50	357.65	malo	0.62			
20	A.1018	160	0.304	48.64	1.00	30.5	134.30	284.60	437.30	596.08	malo	0.62			
21	A.1018	160	0.405	64.8	0.04	30.5	0.08	32.34	39.34	31.76	malo	0.46			
22	A.1018	160	0.405	64.8	0.12	30.5	3.31	57.24	69.88	95.29	malo	0.46			
23	A.1018	160	0.405	64.8	0.20	30.5	11.03	96.09	121.00	158.82	malo	0.46			
24	A.1018	160	0.405	64.8	0.60	30.5	48.49	221.10	312.10	476.47	malo	0.46			
25	A.1018	160	0.405	64.8	1.00	30.5	121.00	278.00	444.40	794.12	malo	0.46			

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.8. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero1018 a 320 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	A.1018	320	0.101	32.32	0.04	30.50	2.28	22.60	23.32	7.9215686	bueno	0.93	
2	A.1018	320	0.101	32.32	0.12	30.50	2.36	25.02	29.02	23.764706	bueno	0.93	
3	A.1018	320	0.101	32.32	0.20	30.50	2.99	26.36	32.06	39.607843	bueno	0.93	
4	A.1018	320	0.101	32.32	0.60	30.50	12.20	39.32	53.72	118.82353	bueno	0.93	
5	A.1018	320	0.101	32.32	1.00	30.50	33.72	78.18	128.10	198.03922	bueno	0.93	
6	A.1018	320	0.151	48.32	0.04	30.50	0.00	20.64	21.97	11.843137	bueno	0.62	
7	A.1018	320	0.151	48.32	0.12	30.50	2.31	28.05	31.23	35.529412	bueno	0.62	
8	A.1018	320	0.151	48.32	0.20	30.50	7.20	39.71	49.14	59.215686	bueno	0.62	
9	A.1018	320	0.151	48.32	0.60	30.50	20.73	81.02	119.20	177.64706	bueno	0.62	
10	A.1018	320	0.151	48.32	1.00	30.50	66.66	111.60	199.80	296.07843	bueno	0.62	
11	A.1018	320	0.202	64.64	0.04	30.50	1.44	29.30	32.69	15.843137	bueno	0.46	
12	A.1018	320	0.202	64.64	0.12	30.50	3.03	37.17	42.64	47.529412	bueno	0.46	
13	A.1018	320	0.202	64.64	0.20	30.50	4.36	43.17	51.54	79.215686	bueno	0.46	
14	A.1018	320	0.202	64.64	0.60	30.50	45.67	92.30	129.30	237.64706	bueno	0.46	
15	A.1018	320	0.202	64.64	1.00	30.50	51.54	134.80	206.60	396.07843	bueno	0.46	
16	A.1018	320	0.304	97.28	0.04	30.50	0.84	30.84	33.14	23.843137	regular	0.31	
17	A.1018	320	0.304	97.28	0.12	30.50	5.40	50.60	65.72	71.529412	regular	0.31	
18	A.1018	320	0.304	97.28	0.20	30.50	5.64	53.31	69.62	119.21569	regular	0.31	
19	A.1018	320	0.304	97.28	0.60	30.50	19.56	117.57	184.00	357.64706	malo	0.31	
20	A.1018	320	0.304	97.28	1.00	30.50	89.33	218.80	328.90	596.07843	malo	0.31	
21	A.1018	320	0.405	129.6	0.04	30.50	1.33	44.02	51.04	31.764706	malo	0.23	
22	A.1018	320	0.405	129.6	0.12	30.50	5.33	63.11	78.34	95.294118	malo	0.23	
23	A.1018	320	0.405	129.6	0.20	30.50	7.75	77.54	104.80	158.82353	malo	0.23	
24	A.1018	320	0.405	129.6	0.60	30.50	48.06	189.30	255.60	476.47059	malo	0.23	
25	A.1018	320	0.405	129.6	1.00	30.50	106.40	312.70	436.20	794.11765	malo	0.23	

Tabla 4.9. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero1018 a 700 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	A.1018	700	0.038	26.6	0.04	30.5	1.38	20.47	27.56	2.98	bueno	1.13	
2	A.1018	700	0.038	26.6	0.12	30.5	1.91	22.74	32.53	8.94	bueno	1.13	
3	A.1018	700	0.038	26.6	0.20	30.5	5.80	31.27	45.10	14.90	bueno	1.13	
4	A.1018	700	0.038	26.6	0.40	30.5	12.76	49.96	73.02	29.80	bueno	1.13	
5	A.1018	700	0.038	26.6	0.60	30.5	28.24	78.18	115.10	44.71	bueno	1.13	
6	A.1018	700	0.051	35.7	0.04	30.5	0.03	16.69	21.77	4.00	bueno	0.84	
7	A.1018	700	0.051	35.7	0.12	30.5	2.06	33.08	44.61	12.00	malo	0.84	
8	A.1018	700	0.051	35.7	0.20	30.5	16.80	49.57	68.82	20.00	malo	0.84	
9	A.1018	700	0.051	35.7	0.40	30.5	18.20	73.85	97.00	40.00	malo	0.84	
10	A.1018	700	0.051	35.7	0.60	30.5	42.31	112.00	156.40	60.00	malo	0.84	
11	A.1018	700	0.076	53.2	0.04	30.5	1.24	25.78	34.02	5.96	malo	0.56	
12	A.1018	700	0.076	53.2	0.12	30.5	5.81	45.44	63.88	17.88	malo	0.56	
13	A.1018	700	0.076	53.2	0.20	30.5	6.44	65.46	110.48	29.80	malo	0.56	
14	A.1018	700	0.076	53.2	0.40	30.5	35.00	133.10	177.00	59.61	malo	0.56	
15	A.1018	700	0.076	53.2	0.60	30.5	39.83	136.40	185.70	89.41	malo	0.56	
16	A.1018	700	0.101	70.7	0.04	30.5	0.21	12.04	15.11	7.92	malo	0.42	
17	A.1018	700	0.101	70.7	0.12	30.5	8.19	74.30	88.37	23.76	malo	0.42	
18	A.1018	700	0.101	70.7	0.20	30.5	14.26	100.60	119.50	39.61	malo	0.42	
19	A.1018	700	0.101	70.7	0.40	30.5	59.61	329.80	205.30	79.22	malo	0.42	
20	A.1018	700	0.101	70.7	0.60	30.5	77.82	398.30	335.40	118.82	malo	0.42	

Tabla 4.10. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero 1018 a 1600 rpm con diferentes parámetros.

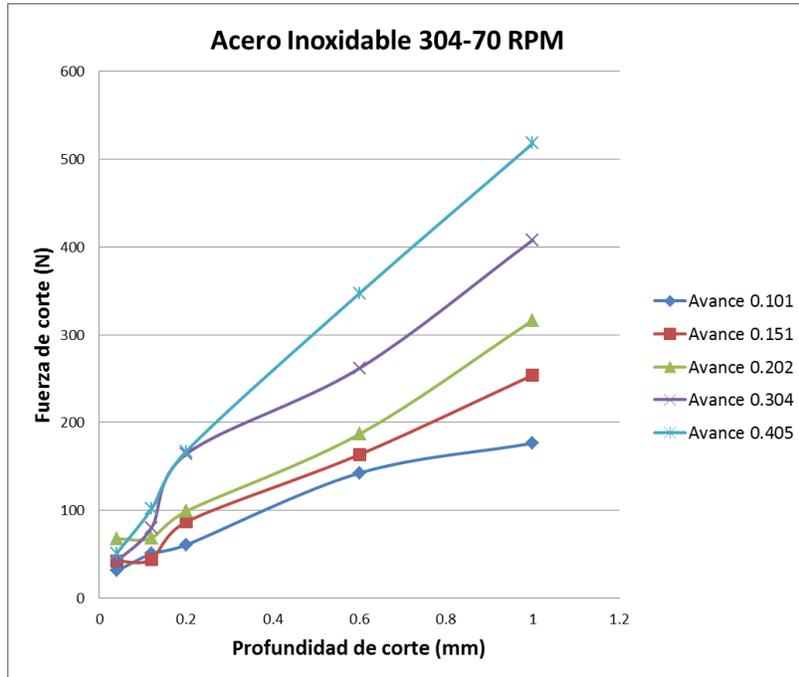
No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Fc teorica	
									z			Acabado	TM
1	A.1018	1600	0.038	60.8	0.04	30.5	0.82	8.26	16.71		2.98	bueno	0.4934
2	A.1018	1600	0.038	60.8	0.12	30.5	3.56	13.54	24.64		8.94	bueno	0.4934
3	A.1018	1600	0.038	60.8	0.20	30.5	3.824	13.92	25.91		14.90	bueno	0.4934
4	A.1018	1600	0.038	60.8	0.40	30.5	9.15	21.79	36.53		29.80	bueno	0.4934
5	A.1018	1600	0.038	60.8	0.60	30.5	33.52	77.58	75.33		44.71	bueno	0.4934
6	A.1018	1600	0.051	81.6	0.04	30.5	2.19	11.88	20.51		4.00	bueno	0.3676
7	A.1018	1600	0.051	81.6	0.12	30.5	2.667	13.54	23.05		12.00	malo	0.3676
8	A.1018	1600	0.051	81.6	0.20	30.5	5.783	17.18	28.79		20.00	malo	0.3676
9	A.1018	1600	0.051	81.6	0.40	30.5	10.24	26.14	39.75		40.00	malo	0.3676
10	A.1018	1600	0.051	81.6	0.60	30.5	42.19	90.74	88.77		60.00	malo	0.3676
11	A.1018	1600	0.076	121.6	0.04	30.5	2.53	11.63	19.47		5.96	malo	0.2467
12	A.1018	1600	0.076	121.6	0.12	30.5	4.05	17.38	29.21		17.88	malo	0.2467
13	A.1018	1600	0.076	121.6	0.20	30.5	8.81	28.28	37.03		29.80	malo	0.2467
14	A.1018	1600	0.076	121.6	0.40	30.5	33.71	82.89	83.43		59.61	malo	0.2467
15	A.1018	1600	0.076	121.6	0.60	30.5	53.95	112.7	113.1		89.41	malo	0.2467
16	A.1018	1600	0.101	161.6	0.04	30.5	4.27	17.38	30.21		7.92	malo	0.1856
17	A.1018	1600	0.101	161.6	0.12	30.5	5.48	21.68	31.73		23.76	malo	0.1856
18	A.1018	1600	0.101	161.6	0.20	30.5	6.75	25.45	38.2		39.61	malo	0.1856
19	A.1018	1600	0.101	161.6	0.40	30.5	34	92.28	90.89		79.22	malo	0.1856
20	A.1018	1600	0.101	161.6	0.60	30.5	67.33	139.8	134.6		118.82	malo	0.1856

4.4 Comportamiento de la fuerza de corte para acero inoxidable 304

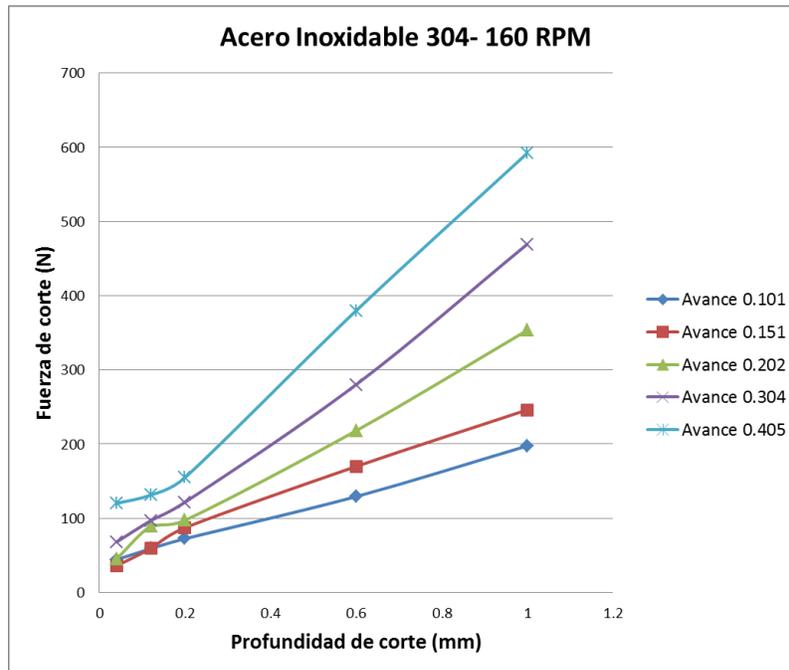
En el presente tema se muestran el conjunto de gráficas de la fuerza de corte obtenidas versus tiempo, medidas experimentalmente para el material acero inoxidable 304. De manera similar como se ha presentado en los subtemas anteriores, se representan las curvas experimentales para cada combinación de parámetros, representando los datos de manera global en los siguientes gráficos determinándose el valor media aritmética de la fuerza de corte en la zona estable de los gráficos. Los valores capturados también se desglosan en las tablas consecuentes a los gráficos.

Los siguientes gráficos describen el comportamiento que tuvo la fuerza de corte en el material acero inoxidable 304 al variar dichos parámetros, los cuales se pueden comparar con los distintos gráficos para ver el aumento de la fuerza de corte. Los cinco gráficos representados corresponden a la mismas características mencionadas en los dos subtemas anteriores gráficas de desbaste y acabado.

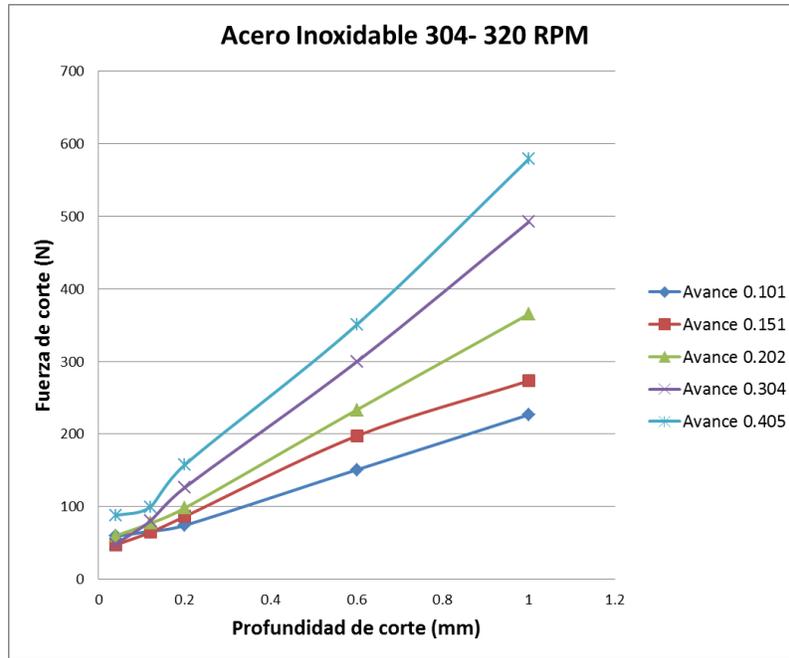
En los tres primeros gráficos se aprecia que el valor de fuerza de corte máximo es 600 (N) aproximadamente para desbaste de hasta 1.00 (mm). Con respecto a parámetros de acabado el valor máximo presentado es 145 (N) para profundidades de hasta 0.60 (mm).



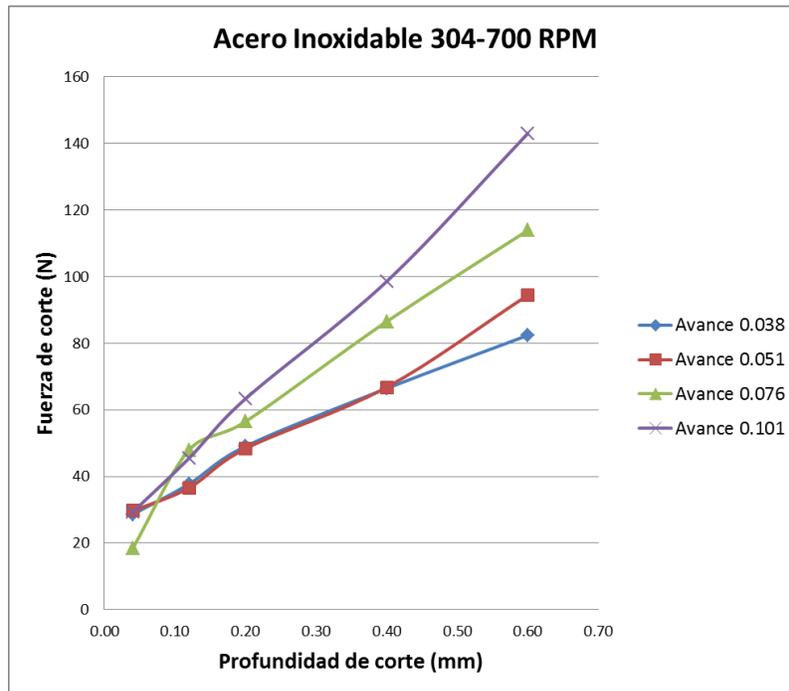
Gráfica 4.11.- Medición de la fuerza de corte en acero inoxidable 304 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



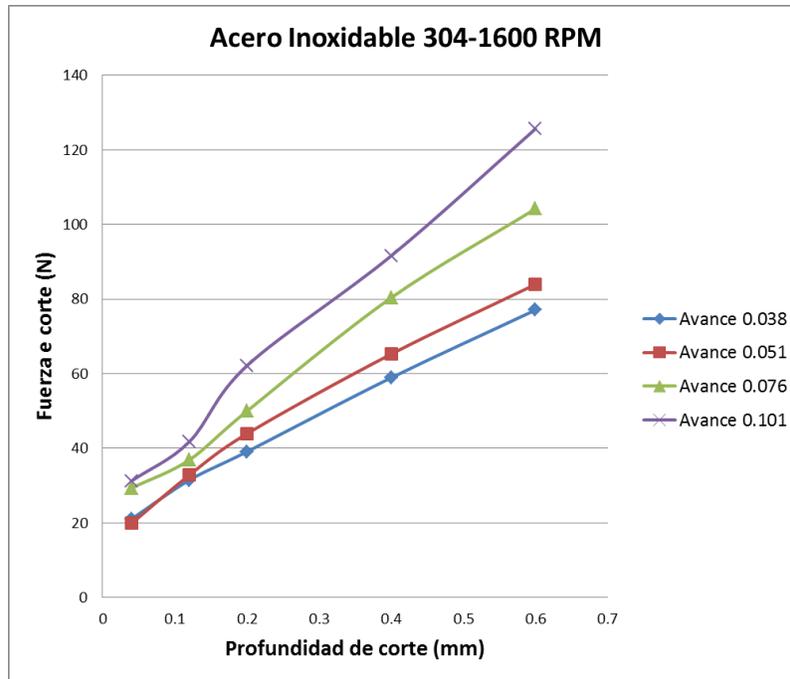
Gráfica 4.12.- Medición de la fuerza de corte en acero inoxidable 304 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.13.- Medición de la fuerza de corte en acero inoxidable 304 vs profundidad de corte para desbaste con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.14.- Medición de la fuerza de corte en acero inoxidable 304 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).



Gráfica 4.15.- Medición de la fuerza de corte en acero inoxidable 304 vs profundidad de corte para acabado con diferentes avances en (mm/rev).

Las siguientes tablas son datos explícitos correspondientes a los gráficos antes mostrados de acero inoxidable 304, en los que se desglosa de manera detallada cada uno de los parámetros, cálculos teóricos y las respectivas tres fuerzas experimentales obtenidas, de la misma forma que se describió para los resultados de aluminio 6061 y acero 1018.

El significado de cada abreviación utilizada corresponde de igual forma a la nomenclatura explicada en los anteriores 2 subtemas, así de la misma manera corresponde como se ha calificado el acabado de las piezas.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.11. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero inoxidable a 70 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	A.Inox	70	0.101	7.07	0.04	30.5	4.49	32.24	31.14	8.71	regular	4.24	
2	A.Inox	70	0.101	7.07	0.12	30.5	8.52	49.20	50.56	26.14	bueno	4.24	
3	A.Inox	70	0.101	7.07	0.20	30.5	13.81	54.58	60.64	43.57	bueno	4.24	
4	A.Inox	70	0.101	7.07	0.60	30.5	44.99	126.70	142.50	130.71	bueno	4.24	
5	A.Inox	70	0.101	7.07	1.00	30.5	62.72	150.70	176.40	217.84	bueno	4.24	
6	A.Inox	70	0.151	10.57	0.04	30.5	5.67	38.38	42.03	13.03	bueno	2.84	
7	A.Inox	70	0.151	10.57	0.12	30.5	5.98	44.18	44.03	39.08	bueno	2.84	
8	A.Inox	70	0.151	10.57	0.20	30.5	17.50	81.21	86.72	65.14	bueno	2.84	
9	A.Inox	70	0.151	10.57	0.60	30.5	48.86	142.87	163.50	195.41	bueno	2.84	
10	A.Inox	70	0.151	10.57	1.00	30.5	93.21	204.50	254.00	325.69	bueno	2.84	
11	A.Inox	70	0.202	14.14	0.04	30.5	9.29	63.79	67.59	17.43	regular	2.12	
12	A.Inox	70	0.202	14.14	0.12	30.5	10.18	63.97	68.41	52.28	regular	2.12	
13	A.Inox	70	0.202	14.14	0.20	30.5	17.09	88.97	98.87	87.14	regular	2.12	
14	A.Inox	70	0.202	14.14	0.60	30.5	30.96	144.10	186.80	261.41	regular	2.12	
15	A.Inox	70	0.202	14.14	1.00	30.5	111.10	253.40	316.50	435.69	regular	2.12	
16	A.Inox	70	0.304	21.28	0.04	30.5	1.95	41.43	41.90	26.23	malo	1.41	
17	A.Inox	70	0.304	21.28	0.12	30.5	7.29	77.15	80.16	78.68	malo	1.41	
18	A.Inox	70	0.304	21.28	0.20	30.5	34.67	146.00	164.00	131.14	malo	1.41	
19	A.Inox	70	0.304	21.28	0.60	30.5	66.95	245.60	261.80	393.41	malo	1.41	
20	A.Inox	70	0.304	21.28	1.00	30.5	146.60	394.40	407.90	655.69	malo	1.41	
21	A.Inox	70	0.405	28.35	0.04	30.5	1.81	53.93	51.16	34.94	malo	1.06	
22	A.Inox	70	0.405	28.35	0.12	30.5	8.62	96.30	101.50	104.82	malo	1.06	
23	A.Inox	70	0.405	28.35	0.20	30.5	22.38	140.00	167.10	174.71	malo	1.06	
24	A.Inox	70	0.405	28.35	0.60	30.5	74.38	307.70	347.20	524.12	malo	1.06	
25	A.Inox	70	0.405	28.35	1.00	30.5	162.40	462.40	518.00	873.53	malo	1.06	

Tabla 4.12. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero inoxidable a 160 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	Fc Real			Acabado	TM
									z				
1	A.Inox	160	0.101	16.16	0.04	30.5	2.367	51.79	44.35	8.71	regular	1.86	
2	A.Inox	160	0.101	16.16	0.12	30.5	10	66.54	59.11	26.14	bueno	1.86	
3	A.Inox	160	0.101	16.16	0.20	30.5	16.19	80.62	72.47	43.57	bueno	1.86	
4	A.Inox	160	0.101	16.16	0.60	30.5	52.17	130.1	129.3	130.71	bueno	1.86	
5	A.Inox	160	0.101	16.16	1.00	30.5	96	175.7	197.5	217.84	bueno	1.86	
6	A.Inox	160	0.151	24.16	0.04	30.5	2.79	41.68	36.03	13.03	bueno	1.24	
7	A.Inox	160	0.151	24.16	0.12	30.5	10.1	70.54	59.41	39.08	bueno	1.24	
8	A.Inox	160	0.151	24.16	0.20	30.5	43.85	101.8	87.28	65.14	bueno	1.24	
9	A.Inox	160	0.151	24.16	0.60	30.5	22.76	99.9	169.83	195.41	bueno	1.24	
10	A.Inox	160	0.151	24.16	1.00	30.5	119	239.3	246.1	325.69	bueno	1.24	
11	A.Inox	160	0.202	32.32	0.04	30.5	2.261	53.28	45.4	17.43	bueno	0.93	
12	A.Inox	160	0.202	32.32	0.12	30.5	13.19	95.7	89.3	52.28	bueno	0.93	
13	A.Inox	160	0.202	32.32	0.20	30.5	15.03	105.8	97.32	87.14	bueno	0.93	
14	A.Inox	160	0.202	32.32	0.60	30.5	64.4	209.6	218	261.41	bueno	0.93	
15	A.Inox	160	0.202	32.32	1.00	30.5	91.24	217.4	353.3	435.69	bueno	0.93	
16	A.Inox	160	0.304	48.64	0.04	30.5	4.295	74.55	68.11	26.23	regular	0.62	
17	A.Inox	160	0.304	48.64	0.12	30.5	9.64	101	96.9	78.68	regular	0.62	
18	A.Inox	160	0.304	48.64	0.20	30.5	15	124.3	121.7	131.14	regular	0.62	
19	A.Inox	160	0.304	48.64	0.60	30.5	72.12	268.1	280.1	393.41	regular	0.62	
20	A.Inox	160	0.304	48.64	1.00	30.5	162.2	410.5	469.3	655.69	regular	0.62	
21	A.Inox	160	0.405	64.80	0.04	30.5	10.64	125.6	120.1	34.94	malo	0.46	
22	A.Inox	160	0.405	64.80	0.12	30.5	13.56	137.7	131.4	104.82	malo	0.46	
23	A.Inox	160	0.405	64.80	0.20	30.5	19.79	161.5	154.9	174.71	malo	0.46	
24	A.Inox	160	0.405	64.80	0.60	30.5	93.37	362.8	379.7	524.12	malo	0.46	
25	A.Inox	160	0.405	64.80	1.00	30.5	181.4	504.7	591.9	873.53	malo	0.46	

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.13. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero inoxidable a 320 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	z	Fc Real		Fc teorica		Acabado	TM
1	A.Inox	320	0.101	32.32	0.04	30.5	8.384	74.61	59.32	8.71	regular	0.93			
2	A.Inox	320	0.101	32.32	0.12	30.5	11.41	84.21	66.07	26.14	bueno	0.93			
3	A.Inox	320	0.101	32.32	0.20	30.5	13.74	89.5	74.19	43.57	bueno	0.93			
4	A.Inox	320	0.101	32.32	0.60	30.5	50.88	157.7	150.8	130.71	bueno	0.93			
5	A.Inox	320	0.101	32.32	1.00	30.5	93.9	211.11	226.6	217.84	bueno	0.93			
6	A.Inox	320	0.151	48.32	0.04	30.5	3.462	57	47.48	13.03	bueno	0.62			
7	A.Inox	320	0.151	48.32	0.12	30.5	8.372	79.57	64.53	39.08	bueno	0.62			
8	A.Inox	320	0.151	48.32	0.20	30.5	15.7	101.7	86.33	65.14	bueno	0.62			
9	A.Inox	320	0.151	48.32	0.60	30.5	67.71	201.9	197.4	195.41	bueno	0.62			
10	A.Inox	320	0.151	48.32	1.00	30.5	107.7	257.7	273.4	325.69	bueno	0.62			
11	A.Inox	320	0.202	64.64	0.04	30.5	5.642	75.72	59.93	17.43	bueno	0.46			
12	A.Inox	320	0.202	64.64	0.12	30.5	10.48	96.34	76.96	52.28	bueno	0.46			
13	A.Inox	320	0.202	64.64	0.20	30.5	16.9	118.1	98.03	87.14	bueno	0.46			
14	A.Inox	320	0.202	64.64	0.60	30.5	73.47	233.2	233.3	261.41	bueno	0.46			
15	A.Inox	320	0.202	64.64	1.00	30.5	141.1	329.8	365.2	435.69	bueno	0.46			
16	A.Inox	320	0.304	97.28	0.04	30.5	1.716	62.75	48.68	26.23	regular	0.31			
17	A.Inox	320	0.304	97.28	0.12	30.5	6.71	99.2	80.28	78.68	regular	0.31			
18	A.Inox	320	0.304	97.28	0.20	30.5	18.17	147.3	126.2	131.14	regular	0.31			
19	A.Inox	320	0.304	97.28	0.60	30.5	81.16	297.7	299.6	393.41	regular	0.31			
20	A.Inox	320	0.304	97.28	1.00	30.5	168.9	428.5	492.3	655.69	regular	0.31			
21	A.Inox	320	0.405	129.6	0.04	30.5	5.41	111	87.71	34.94	regular	0.23			
22	A.Inox	320	0.405	129.6	0.12	30.5	7.086	122.1	99.73	104.82	regular	0.23			
23	A.Inox	320	0.405	129.6	0.20	30.5	19.95	171	157.5	174.71	regular	0.23			
24	A.Inox	320	0.405	129.6	0.60	30.5	82.34	332.4	350.6	524.12	regular	0.23			
25	A.Inox	320	0.405	129.6	1.00	30.5	174.2	472	578.9	873.53	regular	0.23			

Tabla 4.14. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero inoxidable a 700 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	x	y	z	Fc Real		Fc teorica		Acabado	TM
1	A.Inox	700	0.038	26.6	0.04	30.5	2.25	36.4	28.61	3.28	regular	1.13			
2	A.Inox	700	0.038	26.6	0.12	30.5	5.95	47.6	37.75	9.84	regular	1.13			
3	A.Inox	700	0.038	26.6	0.20	30.5	9.73	61.6	49.07	16.39	regular	1.13			
4	A.Inox	700	0.038	26.6	0.60	30.5	23.65	85.58	66.42	49.18	regular	1.13			
5	A.Inox	700	0.038	26.6	1.00	30.5	33.99	102.4	82.38	81.96	regular	1.13			
6	A.Inox	700	0.051	35.7	0.04	30.5	1.65	40.3	29.66	4.40	regular	0.84			
7	A.Inox	700	0.051	35.7	0.12	30.5	5.7	50.29	36.57	13.20	bueno	0.84			
8	A.Inox	700	0.051	35.7	0.20	30.5	11.97	67.09	48.37	22.00	bueno	0.84			
9	A.Inox	700	0.051	35.7	0.60	30.5	22.68	87.18	66.79	66.00	bueno	0.84			
10	A.Inox	700	0.051	35.7	1.00	30.5	41.43	117.3	94.45	110.00	bueno	0.84			
11	A.Inox	700	0.076	53.2	0.04	30.5	0.28	25.88	18.35	6.56	bueno	0.56			
12	A.Inox	700	0.076	53.2	0.12	30.5	8.81	64.84	47.97	19.67	bueno	0.56			
13	A.Inox	700	0.076	53.2	0.20	30.5	13.99	77.31	56.51	32.78	bueno	0.56			
14	A.Inox	700	0.076	53.2	0.60	30.5	24.78	87.8	86.51	98.35	bueno	0.56			
15	A.Inox	700	0.076	53.2	1.00	30.5	46.42	135.8	113.9	163.92	bueno	0.56			
16	A.Inox	700	0.101	70.7	0.04	30.5	0.58	36.57	29.29	8.71	bueno	0.42			
17	A.Inox	700	0.101	70.7	0.12	30.5	6.28	61.62	45.5	26.14	bueno	0.42			
18	A.Inox	700	0.101	70.7	0.20	30.5	14.82	84.71	63.35	43.57	bueno	0.42			
19	A.Inox	700	0.101	70.7	0.60	30.5	33.54	123	98.54	130.71	bueno	0.42			
20	A.Inox	700	0.101	70.7	1.00	30.5	59.05	166.8	143	217.84	bueno	0.42			

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

Tabla 4.15. Valores de la fuerza de corte experimental y teórica, para acero inoxidable a 1600 rpm con diferentes parámetros.

No	M	Rev	f	Vf	d	D	Fc Real			Fc teorica		Acabado	TM
							x	y	z				
1	A.Inox	1600	0.038	60.80	0.04	30.5	1.79	47.31	21.09	3.28	excelente	0.49	
2	A.Inox	1600	0.038	60.80	0.12	30.5	8.34	72.09	31.5	9.84	excelente	0.49	
3	A.Inox	1600	0.038	60.80	0.20	30.5	11.96	80.79	39.13	16.39	excelente	0.49	
4	A.Inox	1600	0.038	60.80	0.60	30.5	25.47	104.8	58.93	49.18	excelente	0.49	
5	A.Inox	1600	0.038	60.80	1.00	30.5	37.38	119.3	77.07	81.96	excelente	0.49	
6	A.Inox	1600	0.051	81.60	0.04	30.5	0.39	42.15	19.89	4.40	excelente	0.37	
7	A.Inox	1600	0.051	81.60	0.12	30.5	7.24	71.35	32.84	13.20	excelente	0.37	
8	A.Inox	1600	0.051	81.60	0.20	30.5	12.69	84.13	43.94	22.00	excelente	0.37	
9	A.Inox	1600	0.051	81.60	0.60	30.5	26.53	110.2	65.27	66.00	excelente	0.37	
10	A.Inox	1600	0.051	81.60	1.00	30.5	37.52	126.6	83.93	110.00	excelente	0.37	
11	A.Inox	1600	0.076	121.60	0.04	30.5	3.1	63.37	29.38	6.56	excelente	0.25	
12	A.Inox	1600	0.076	121.60	0.12	30.5	6.17	75.46	36.91	19.67	excelente	0.25	
13	A.Inox	1600	0.076	121.60	0.20	30.5	13.76	93.76	50	32.78	excelente	0.25	
14	A.Inox	1600	0.076	121.60	0.60	30.5	30.37	125.5	80.36	98.35	excelente	0.25	
15	A.Inox	1600	0.076	121.60	1.00	30.5	43.82	144	104.2	163.92	excelente	0.25	
16	A.Inox	1600	0.101	161.60	0.04	30.5	3.05	67.29	31.29	8.71	excelente	0.19	
17	A.Inox	1600	0.101	161.60	0.12	30.5	7.6	84.64	41.78	26.14	excelente	0.19	
18	A.Inox	1600	0.101	161.60	0.20	30.5	16.95	107.9	62.16	43.57	excelente	0.19	
19	A.Inox	1600	0.101	161.60	0.60	30.5	32.21	137.1	91.6	130.71	regular	0.19	
20	A.Inox	1600	0.101	161.60	1.00	30.5	49.58	161.1	125.6	217.84	regular	0.19	

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se diseñaron y se maquinaron los herramientales necesarios para el desarrollo de los experimentos de las fuerzas de corte durante las operaciones de torneado. Hasta el momento se cuenta con los herramientales propios para la instalación de los dispositivos en un torno BJ 1640D marca Titanium.

Con la implementación del medidor de fuerza en operaciones de torneado, se logró registrar la fuerza principal de corte en 3 materiales diferentes; acero 1018, acero inoxidable 304 y aluminio 6061, logrando cumplir el objetivo principal.

Se obtuvo de manera efectiva la medición de las fuerzas de corte experimentalmente, permitiendo analizar el efecto que tiene la variación de los parámetros involucrados en el proceso de torneado.

Al analizar el comportamiento de la fuerza de corte en los diferentes gráficos obtenidos se concluye; que al incrementar la profundidad de corte aumenta la fuerza de manera proporcional aproximándose a un comportamiento lineal, este comportamiento se evidencio para la gama de avances y velocidades seleccionados.

La presente tesis incluye la documentación del desarrollo experimental de las fuerzas de corte, así como también información básica para comprender lo relativo al proceso de torneado, ésta será un documento de apoyo.

Considerando que esta es una primera etapa en la medición de fuerzas de corte se logró adquirir experiencia en el manejo de los medidores de fuerzas y los equipos acoplados.

Con la elaboración de este trabajo se logró una mejor comprensión en las operaciones con arranque de viruta, factor importante en el área de manufactura que se verá reflejado en la toma de decisiones en la práctica profesional.

La medición experimental de las fuerzas de corte es una herramienta para la optimización de los procesos de maquinado, buscando hacer más eficiente la producción de productos, e igualmente la capacidad de control del proceso.

Por último, el presente trabajo puede ayudar a la mejora de estrategias del proceso de mecanizado, además de proporcionar información para la investigación como; formación de viruta, desgaste de la herramienta, validación de modelos matemáticos, mejora en la elección de la geometría de corte y comportamiento real que presentan diferentes materiales.

5.2 Recomendaciones

Durante las operaciones de maquinado siempre estará latente la posibilidad de enfrentar inconvenientes propios de la máquina herramienta u operario. En este sentido una mala selección de los parámetros de corte, aditamentos de sujeción, consideraciones de la longitud de maquinado y otros aspectos pueden afectar considerablemente la medición de fuerzas de corte.

Cabe resaltar que los herramientas a utilizar se deben encontrar en buenas condiciones.

El propósito de esta tesis fue plantear una base para las mediciones de corte y continuar con investigaciones futuras

Como proyecto a futuro se debe hermetizar el dinamómetro para hacer pruebas incluyendo diferentes fluidos de corte para evaluar los efectos en el acabado de las piezas de trabajo.

En base a lo mencionado anteriormente se puede resaltar que un fluido de corte puede mejorar y aumentar la eficiencia de los parámetros de corte.

Es importante para la continuidad de este trabajo es conveniente contar con un protocolo experimental más amplio, que incluya; el desgaste de las herramientas, la deflexión de las piezas de trabajo, temperatura de corte, acabado superficial y correlacionarlo con las fuerza de corte.

Finalmente al implementar prácticas en los laboratorios de Ingeniería Mecánica, los estudiantes reforzarán sus conocimientos teóricos al determinar de manera experimental las magnitudes de fuerzas derivadas en las operaciones de torneado.

Referencias

- ✚ Boothroyd, G. (2006). *Fundamentals of Machining and Machine tools*. 3rd. pp.-. CRC Press. Traducción mia.
- ✚ Borkosky, D. (2010). *Tecnologías y procesos de producción*. Universidad Nacional de Tucumán, 3.
- ✚ Coromant, S. (2016). *Manual Sandvik Coromant*.
- ✚ Dorlin, T., & et al. (2015). Analysis and modelling of the contact radius effect on the cutting forces in cylindrical and face turning of Ti6Al4V titanium alloy. *ScienceDirect*, 185-190.
- ✚ E.T.S.I.B. (s. f.). *Proceso de Torneado I*. Escuela Tecnica Superior de Ingeniería Bilbao.
- ✚ El-Hofy, H. (2014). *Fundamentals of machining processes: conventional an nonconventional processes*. Second edition. pp.1-2. CRC Press. Traducción mia.
- ✚ Escamilla, I. G. (2004). *Optimización de las variables envueltas en el maquinado en un torno de control numerico computarizado*. Nuevo León: Universidad Autonoma de Nuevo León.
- ✚ G. Totis, M. S. (2010). Developmente of a modular dynamometerfor triaxial cutting force measurement in turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, p.1. Recuperado de la base de datos Elsevier. Traducción mia.
- ✚ Gonzalo, O., & et al. (2010). Nuevas tendencias para el mecanizado. *Metalmecánica No.707*, 25-32.
- ✚ Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*. Tercera edición. pp.511-516. McGraw-Hill Interamericana.
- ✚ Homel-Etamic, E. (2012). Casos prácticos de puesta a punto de tornos y rectificadoras. *Interempresas.net*.
- ✚ Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Quinta edición. pp--. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- ✚ KISTLER. (2013). *Instruction Manual Dynoware*.
- ✚ Krar, S., & et al. (2009). *Tecnología de las Máquinas Herramienta*. México: Alfaomega.
- ✚ Mahamani, A. (2014). Influence of process parameters on cutting force and surface roughness during turning of AA2219-TiB2/ZrB2 In-situ Metal Matrix Composites. *Procedia Materials Science*, 1178-1186.
- ✚ MatWeb. (2016). *Recuperado de: <http://www.matweb.com/>*.
- ✚ NOM Z23. (1973). *Norma Mexicana de Tolerancias y Ajustes*.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS DE CORTE EN OPERACIONES DE CILINDRADO

- ✚ Pedraza , C., & et al. (2011). Determinación de los factores que nfluyen en la rugosidad superficial en un proceso de mecanizado para el acero AISI 4140: cilindrado. *Universidad Tecnologica de Pereira*, 37-44.
- ✚ Pereira, J., & Romanello , D. (2007). Determinación experimental de la fuerza de corte de la aleación AA A356 T6 en operaciones de torneado. *Revista Ingeniería UC Vol. 14. No.1* , 64-73.
- ✚ Rubio, E. M., & et al. (2011). *Ejercicios y probelmas de mecanizado*. España: PEARSON EDUCACIÓN.
- ✚ Schvab, L. (2011). *Máquinas herramientas*. Autonomia de Buenos Aires: Industria Argentina.
- ✚ Sharma, V., & et al. (2008). Estimation of cutting forces and surface roughness for hard turning using neural networks. *Springer*, 473-483.
- ✚ Stewar, B., & et al. (1999). *Principios de ingenieria de manufactura*. México: CECSA.
- ✚ Ulutan, D., & et al. (2008). Three-dimensional temperature predictions in machining processes using finite difference method. *Journal of materials processing technology No.209*, 1111-11121.
- ✚ Villar, C. M. (2010). Seleccion y consejos sobre insertos intercambiables para torneado. *METAL Actual*, 42-48.
- ✚ Yaldiz, S., & et al. (2006). Comparison of experimental results obtained by designed dynamometer to fuzzy model for predicting cutting forces in turning. *Materials & Design No.27*, 1-2.
- ✚ Childs, T., & et al. (2000). *Metal Machining Theory and Applications*. Gran Bretaña, Arnold.
- ✚ Klocke, Fritz. (2011). *Manufacturing Processes 1 Cutting*. Germany. Springer.
- ✚ Trend, E., & et al. (2000). *Metal cutting*. 4th ed. United States of America, Butterworth Heinemann.