ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Análisis y Selección de Herramientas de Corte, Geometría y Composición para el Mecanizado del Acero AISI 4340, Basado en los Parámetros de la Ecuación de Taylor y los Criterios de Desgaste del Flanco y Craterización"

TESINA DE SEMINARIO

Previo a la Obtención del Título de:

INGENIEROS MECÁNICOS

Presentada por:

Lino Andrés García Jaramillo

Marcelo Antonio Albán Chapiro

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2011

AGRADECIMIENTO

Al M.Sc. Gabriel Helguero por guiarnos durante el desarrollo de esta tesina, al laboratorio LEMAT por facilitarnos los equipos de medición y a todas las personas e instituciones que nos apoyaron moral y económicamente durante el tiempo de desarrollo del trabajo.

DEDICATORIA

A nuestros padres y hermanos por su apoyo y confianza. Gracias por ayudarnos a cumplir nuestros objetivos como personas y estudiantes. A nuestros padres por brindarnos los recursos necesarios y estar a nuestro lado apoyándonos y aconsejándonos siempre. A nuestras madres por hacer de nosotros unas mejores personas a través de sus consejos y enseñanzas.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gustavo Guerrero M.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

M.Sc. Gabriel Helguero A.
DIRECTOR DE TESINA

Ing. Federico Camacho B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesina de seminario nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

_____ _____

Lino Andrés García Jaramillo Marcelo Antonio Albán Chapiro

RESUMEN

Actualmente en la industria es muy usado el maquinado de piezas mecánicas, especialmente árboles para transmisión que soportan gran esfuerzo de torsión y flexión, fabricados de acero aleado AISI 4340.

El proceso de maquinado de las piezas utiliza las herramientas de corte para producir la forma deseada de la pieza. Por tal razón es necesario estudiar el tiempo de vida de estas para prevenir el desgaste prematuro o fractura de la herramienta y evitar que la pieza maquinada tenga imperfecciones.

Para modelar y predecir el desgaste de la herramienta de corte en esta tesina se usó la ecuación propuesta por F. W. Taylor y se utilizaron 2 criterios de desgaste recomendados para herramientas de metal duro, los cuales se realizaron en el Campo Avanzado de Mecanización y Prototipos de la ESPOL, en donde se varió la velocidad de corte como parámetro de corte principal para determinar las constantes de la ecuación de Taylor.

El avance y la profundidad de corte también se variaron para determinar el comportamiento de estas variables en el proceso de corte para el maquinado de una pieza elaborada con acero AISI 4340.

En la experimentación se usó 2 herramientas de corte con el fin de comparar y buscar una herramienta que presente mejor tiempo de vida para el maquinado de este material.

Fue necesario simular el proceso de desgaste mediante el uso de herramientas computacionales como MATLAB para poder encontrar las constantes de la ecuación de Taylor y predecir el tiempo de vida de una herramienta de metal duro para maquinar AISI 4340 de acuerdo a los datos obtenidos de la experimentación.

Los criterios de desgaste seleccionados para la experimentación se basan en la norma ASME 94.55M, en la cual para las herramientas de metal duro se recomienda como límite el desgaste del flanco y la profundidad de los cráteres producidos.

Con los datos registrados de la experimentación se realizó una regresión lineal con el fin de ajustar los datos a la ecuación de Taylor.

Los resultados comparativos muestran las tendencias del desgaste entre las 2 herramientas seleccionadas para la experimentación.

ÍNDICE GENERAL

Pag.

RESUMEN……...II

ÍNDICE GENERAL……IV

ABREVIATURAS……....X

SIMBOLOGÌAS……..XI

ÍNDICE DE FIGURAS……..……..XII

ÍNDICE DE TABLAS……..……..XVI

INTRODUCCIÓN……1

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Descripción y características técnicas del acero aleado AISI 4340……..….3

1.2. Fundamentos del proceso de mecanizado..……..….....8

1.3. Definición y Términos de la geometría de las herramientas de corte 19

1.3.1. Ángulos característicos.....19

1.3.2. Influencia de los ángulos.....20

1.4. Materiales de las herramientas de corte…….....25

1.4.1. Propiedades…….....….....…….26

1.4.2. Tipos de herramientas de corte……..…..……..…….....27

1.5. Mecanismos de desgaste.....37

1.6. Formulación de Taylor para obtener el tiempo de vida del material.....…...41

1.7. Proceso de mecanizado en TORNO CNC…… …..45

CAPÍTULO 2

2. PARÁMETROS A ANALIZAR

2.1. Selección de la herramienta de corte basado en criterios de selección y recomendaciones del fabricante de las herramientas.....52

2.2. Parámetros de corte a analizar……...…….63

2.3. Criterios de desgate.....……..…...…64

2.3.1. Desgaste del flanco V_B.....66

2.3.2. Profundidad del cráter ...…….....……67

2.4. Medición y evaluación de los criterios de desgaste…….....…67

2.4.1. Medición del desgaste del flanco usando microscopio…….....…67

2.4.2. Medición de la profundidad de cráter usando el palpador…..….....68

2.4.3. Evaluación experimental……...……...…….69

2.4.4. Procedimiento experimental..... 72

CAPÍTULO 3

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

3.1. Presentación de las curvas de pruebas obtenidas, desgaste vs tiempo, tiempo de vida de la herramienta vs velocidad de corte, para ambas herramientas.....77

3.1.1. Variación de la velocidad de corte para la herramienta TNMG160408-PM GC4225……...…78

3.1.2. Variación de la velocidad de corte para la herramienta TNMG160404-PF GC4215.....81

3.1.3. Variación de la profundidad de corte para la herramienta TNMG160404-PF GC4215….....…..84

3.1.4. Variación del avance para la herramienta TNMG160404-PF GC4215….....….....86

3.2. Realizar una regresión lineal que permita predecir la vida de la herramienta.....88

3.3. Desarrollo de las curvas usando una herramienta computacional MATLAB.....91

3.4. Presentación de tablas medidas en los experimentos realizados.....95

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1. Interpretación de las curvas y ecuaciones encontradas para cada herramienta ….....108

4.2. Comportamiento de cada una de las herramientas de corte…….……....112

4.3. Comportamiento de la pieza…….....114

4.3.1. Análisis del tipo de viruta obtenida……...……..…...114

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones……..……122

5.2. Recomendaciones……...……..…125

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

D	Diámetro de la pieza (mm)
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell C
IA1	Filo azul de la cuchilla 1 en posición invertida
IN1	Filo negro de la cuchilla 1 en posición invertida
IN2	Filo negro de la cuchilla 2 en posición invertida
IR2	Filo rojo de la cuchilla 2 en posición invertida
VN2	Filo negro de la cuchilla 2 en posición vertical
VR1	Filo rojo de la cuchilla 1 en posición vertical
VR2	Filo rojo de la cuchilla 2 en posición vertical
VR3	Filo rojo de la cuchilla 3 en posición vertical
VR4	Filo rojo de la cuchilla 4 en posición vertical
L	Longitud a maquinar (mm)
l_s	Longitud de plano de corte (mm)
ne	Numero de elementos
P	Profundidad (mm)
r	Relación de espesor de la viruta
R_{MR}	Razón de material removido
T	Tiempo (min)
Tm	Tiempo de maquinado (min)
Vc	Velocidad de corte (m/min)

SIMBOLOGÍA

γ	Ángulo de ataque
δ	Ángulo de fricción
α	Ángulo de incidencia
ø	Ángulo de plano de corte
β	Ángulo solido de la herramienta
f	Avance
μ	Coeficiente de fricción
C	Constante ecuación de Taylor
n	Constante ecuación de Taylor
Vb	Desgaste de flanco
Vbmax	Desgaste de flanco máximo
tc	Espesor de la viruta
ºC	Grado centígrados
π	Pi
to	Profundidad de corte
Kt	Profundidad de cráter
N	Revoluciones por minutos

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Variación de las propiedades del acero AISI 4340 con respecto a la temperatura	5
Figura 1.2. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 100X	6
Figura 1.3. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 200X	7
Figura 1.4. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 500X	7
Figura 1.5. Proceso de mecanizado	9
Figura 1.6. Trabajo realizado en el torno	10
Figura 1.7. Trabajo realizado en el torno	12
Figura 1.8. Modelo de corte ortogonal	14
Figura 1.9. Forma realista de la formación de viruta	16
Figura 1.10 (a) Viruta segmentada. (b) viruta continúa y (c) viruta continúa con acumulación en los bordes	18
Figura 1.11. Superficies de la herramienta de corte.	20
Figura 1.12. Ángulos característicos de una herramienta de corte	21
Figura 1.13. (a) Ángulo positivo, (b) ángulo cero, y (c) ángulo negativo	23
Figura 1.14. Comportamiento de la dureza del material a altas temperaturas	29
Figura 1.15. Comparación de propiedades para diferentes materiales de herramientas de corte	29
Figura 1.16. Clasificación de carburos cementados	32
Figura 1.17. Superficies típicas de desgaste	38
Figura 1.18. Efecto de diferentes parámetros en el tiempo de vida de la herramienta	40
Figura 1.19. Desgaste de una herramienta en función del tiempo	41

Figura 1.20. Efecto de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta con velocidades y tiempos hipotéticos. 43
Figura 1.21. Gráfico de velocidad de corte vs tiempo de maquinado en escalas logarítmicas 44
Figura 2.1. Probeta para medición de dureza 56
Figura 2.2. Áreas de aplicación de herramientas de corte según sus parámetros de corte 57
Figura 2.3. Designación básica de forma y ángulos según un proveedor local. 58
Figura 2.4. Dimensiones de portaherramientas PTGNR/L 2020K 16 60
Figura 2.5. Nomenclatura asignada a un herramienta de corte 62
Figura 2.6. Tipos de desgaste en herramientas (ASME B94.55M Fig. 8) 66
Figura 2.7. Desgaste en el flanco 68
Figura 2.8. Desgaste por craterización 69
Figura 2.9. Preparación del Torno CNC 72
Figura 2.10. Fijación de la herramienta entre puntos 73
Figura 2.11. Chequear que el material este refrentado 73
Figura 2.12. Posición de la herramienta junto al material 74
Figura 2.13. Programación de código CNC 74
Figura 2.14. Proceso de mecanizado 75
Figura 2.15. Revisión de desgaste en microscopio 76
Figura 3.1. Fotografía de herramienta TNMG 160408-PM GC 4225, después de alcanzar el límite de desgaste de flanco 77
Figura 3.2. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 280 m/min 78
Figura 3.3. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 265 m/min 79
Figura 3.4. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 250 m/min 79
Figura 3.5. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 224 m/min 80
Figura 3.6. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 400 m/min 81
Figura 3.7. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 380 m/min 82
Figura 3.8 Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min 82
Figura 3.9 Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 330 m/min 83

Figura 3.10. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, a velocidad de corte 360 m/min, con variación de profundidad de corte 84
Figura 3.11. Curva tiempo vs profundidad de corte que predice el tiempo de desgaste a diferentes profundidades de corte para herramienta TNMG160404-PF GC4215 con velocidad de corte de 360 m/min 85
Figura 3.12. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, a velocidad de corte 360 m/min, con variación de avance de corte 86
Figura 3.13. Curva tiempo vs avance de corte que predice el tiempo de desgaste a diferentes avances de corte para herramienta TNMG160404-PF GC4215 con velocidad de corte de 360 m/min 87
Figura 3.14. Curva Velocidad de corte vs tiempo de vida en escala logarítmica de ambos ejes para la herramienta TNMG160408-PM GC4225 en MATLAB 92
Figura 3.15. Curva Velocidad de corte vs tiempo de vida en escala logarítmica de ambos ejes para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 en MATLAB 94
Figura 4.1. Muestra el comportamiento de la herramienta TNMG160408-PM GC4225 con distintas velocidades de corte 109
Figura 4.2. Muestra el comportamiento de la herramienta TNMG160404-PF GC4215 con distintas velocidades de corte 110
Figura 4.3. Curvas de velocidad de corte vs tiempo de vida para las 2 herramientas experimentadas 111
Figura 4.4. Aumento de desgaste en la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a una velocidad de 265 m/min 112
Figura 4.5. Aumento de desgaste en la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a una velocidad de 360 m/min 113
Figura 4.6. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a distintas velocidades de corte 114
Figura 4.7. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintas velocidades de corte 115
Figura 4.8. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintas profundidades de corte 116

Figura 4.9. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintos avances 117
Figura 4.10. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160408-PM GC4225 variando la velocidad de corte 119
Figura 4.11. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando la velocidad de corte 120
Figura 4.12. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando el avance 120
Figura 4.13. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando la profundidad 121

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1.1. Composición química del acero AISI 4340	3
Tabla 1.2. Propiedades físicas del acero AISI 4340	4
Tabla 1.3. Características de los procesos de mecanizado por arranque de viruta	10
Tabla 1.4. Rango de ángulos de desprendimiento	24
Tabla 1.5. Valores de dureza y resistencia de varios materiales para herramientas a temperatura ambiente	28
Tabla 1.6.Elementos de aleación en aceros de alta velocidad y sus efectos sobre sus propiedades y procesamiento	30
Tabla 1.7. Tabla de clasificación de las herramientas de metal duro	35
Tabla 1.8. Significado del código de herramientas de metal duro	36
Tabla 2.1. Rango de dureza para aplicación de herramientas de corte	54
Tabla 2.2. Tabla de resultados de medición de dureza	55
Tabla 3.1. Tabla de cálculo de la regresión lineal para encontrar la ecuación de taylor de la herramienta TNMG160408-PM GC4225	88
Tabla 3.2. Tabla de cálculo de la regresión lineal para encontrar la ecuación de taylor de la herramienta TNMG160404-PF GC4215	90
Tabla 3.3. Datos de pruebas para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 280 m/min	95
Tabla 3.4. Datos de pruebas para Herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 265 m/min	96
Tabla 3.5. Datos de pruebas para Herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 250 m/min	96

Tabla 3.6. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4225, velocidad de corte 224 m/min 97
Tabla 3.7. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 400 m/min 98
Tabla 3.8. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 380 m/min 99
Tabla 3.9. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min 100
Tabla 3.10. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 330 m/min 101
Tabla 3.11. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y profundidad de corte de 1 mm 102
Tabla 3.12. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y profundidad de corte de 1.25 mm 103
Tabla 3.13. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y profundidad de corte de 1.5 mm 104
Tabla 3.14. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y avance de corte de 0.1 mm/rev 105
Tabla 3.15. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y profundidad de corte de 0.2 mm/rev 106
Tabla 3.16. Datos de pruebas para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min y profundidad de corte de 0.25 mm/rev 107

INTRODUCCIÓN

El proceso de mecanizado por arranque de viruta es frecuentemente usado en la elaboración de partes mecánicas. Para esto es necesario tener la herramienta de corte adecuada que cumpla los objetivos finales para el trabajo, buen acabado del producto, mayor producción con una herramienta de corte teniendo como resultado un beneficio económico y en tiempo de elaboración de las piezas mecánicas. Por tal motivo es necesario estimar el tiempo de vida de una herramienta de corte. El objetivo de este trabajo es hallar el tiempo de vida de dos herramientas de corte para el maquinado del acero AISI 4340 usado comúnmente en nuestra industria.

La selección de las 2 herramientas de corte se basa en los parámetros de corte, disponibilidad en el mercado local y las características del material a maquinar para lo cual se realiza una prueba de dureza. Las herramientas seleccionadas se diferencian en su dureza y geometría. En las pruebas se varía la velocidad de corte para ambas herramientas y se mantiene constante el avance y la profundidad hasta llegar al tiempo de desgaste de la herramienta, usándose como criterios de falla, el desgaste de flanco con un valor máximo de 0.3 mm. Para una de las herramientas se varía el avance y la profundidad de corte y se mantiene la velocidad de corte.

Con el uso del Torno CNC ubicado en el laboratorio de Mecanizado de la ESPOL se maquina el acero AISI 4340 con los parámetros establecidos de acuerdo a la dureza y geometría de cada herramienta de corte, y después de cada intervalo de tiempo se toman fotografías de la herramienta. En las fotografías se observa el proceso de desgaste de las herramientas al aumentar el tiempo de maquinado y con la ayuda de MATLAB se puede medir el desgaste del flanco claramente, se procede a tabular los resultados en un formato hecho para cada herramienta y presentar las curvas de desgaste vs tiempo de maquinado obtenidas de la experimentación.

Llegando al límite de desgaste establecido por el criterio de desgaste de flanco se realiza una regresión lineal donde se determina la ecuación de Taylor con la cual se puede predecir el tiempo de vida de las herramientas experimentadas. En este trabajo se presentan fotografías del proceso de desgaste de ambas herramientas y el acabado del material mecanizado. Los parámetros de corte y el procedimiento de las pruebas se basan en la norma de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) para pruebas de tiempo de vida de herramientas de corte usadas en procesos de torneado, ASME 94.55M.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Descripción y características técnicas del acero aleado AISI 4340

El acero AISI 4340 es un acero aleado al cromo – níquel – molibdeno cuya composición está alrededor de los porcentajes mostrados en la tabla 1.1.

TABLA 1.1.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 4340

Carbono	Silicio	Mn	Fósforo	Azufre	Níquel	Cromo	Mb
0.35-0.4	0.2-0.35	0.6–0.8	≤ 0.04	≤ 0.04	1.65-2	0.7-0.9	0.2-0.3

Principales propiedades físicas

La tabla 1.2. Presenta las principales propiedades físicas del acero AISI 4340.

TABLA 1.2.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO AISI 4340

Módulo de elasticidad	210	GPa
Dureza	270-330	HB (bonificado)
Densidad	7840	Kg/m3
Conductividad térmica	37.7	W/m.K
Capacidad específica de calor	0.46	J/g.K

Este acero es usado generalmente para transmisión de potencia y partes estructurales, debido a que se lo puede tratar térmicamente y mejorar sus propiedades obteniendo una gran resistencia a la flexión y torsión manteniendo su resistencia a la fatiga. Presenta buena maquinabilidad, especialmente cuando es normalizado o recocido. Puede ser soldado por fusión o por resistencia, siempre se debe precalentar y post calentar.

Los principales tratamientos térmicos que se pueden aplicar a este acero son: recocido, normalizado, temple, revenido, alivio de esfuerzos.

La variación de sus propiedades con respecto a la temperatura se presenta en la figura 1.1.

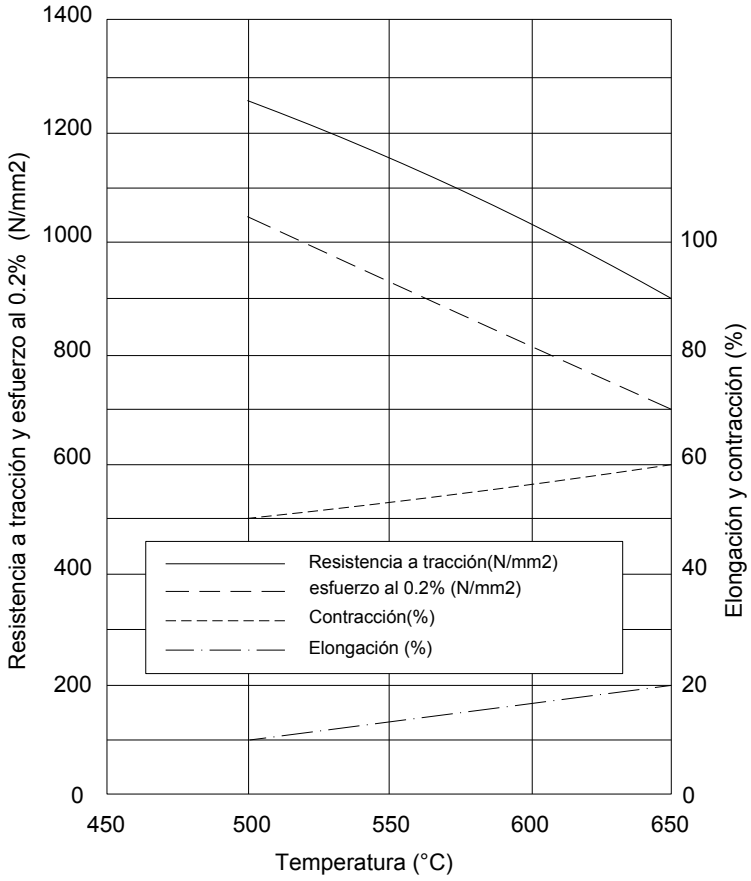


Figura 1.1 Variación de las propiedades del acero AISI 4340 con respecto a la temperatura

Las siguientes figuras muestran la estructura interna del acero AISI 4340. Por recomendaciones de la norma ASME B94.55M inciso 3.2 se debe tomar fotografías metalográficas del material a maquinar en un

rango de 100 a 500x, las fotografías mostradas fueron tomadas en el laboratorio LEMAT.

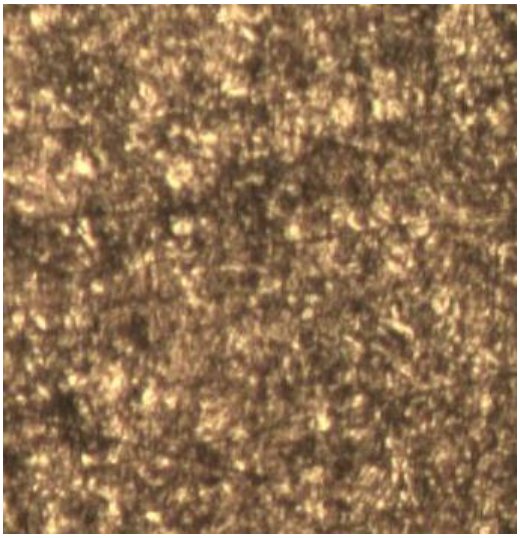


Figura 1.2. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 100X

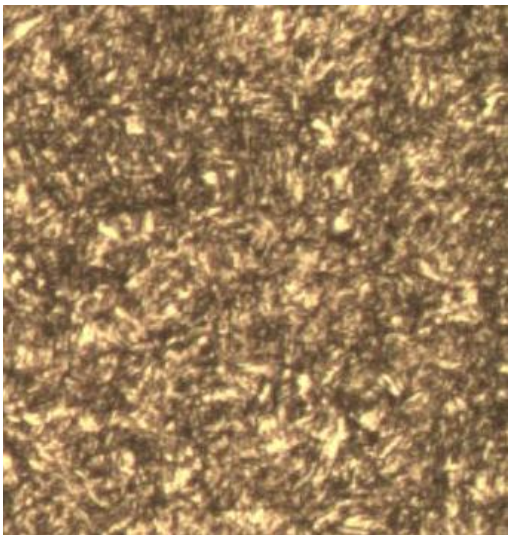


Figura 1.3. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 200X

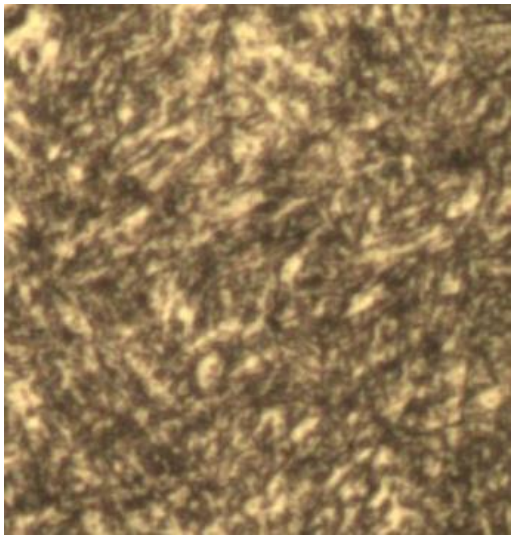


Figura 1.4. Fotografía del acero AISI 4340, aumento 500X

La gráfica a 500X de aumento nos muestra que el material está compuesto mayoritariamente por martensita. La martensita es una fase meta estable de estructura tetragonal. Se la puede observar en forma de agujas o fibras rectilíneas aún más finas orientadas en direcciones paralelas y separadas o no por una matriz de apariencia granular o vermicular. Con el análisis de dureza realizado en LEMAT se encuentra que este acero está constituido por martensita y posee una dureza de 27.5 HRC

1.2. Fundamentos del proceso de mecanizado

Los procesos de manufactura consisten en dar forma predeterminada a distinta clases de materiales.

Existen 4 procesos de manufactura:

- Mecanización por arranque de viruta
- Conformado y primeras transformaciones.
- Procesos por soldadura.
- Proceso de fundición

Esta tesina se enfoca en el proceso de mecanización por arranque de viruta.

Procesos de Mecanización por arranque de viruta

El proceso de mecanización por arranque de viruta consiste en remover material no necesario de alguna pieza mecánica hasta dejarlo en una forma determinada usando una herramienta de corte.

La herramienta de corte debe tener la geometría específica, así como propiedades como tenacidad, dureza y resistencia al desgaste.

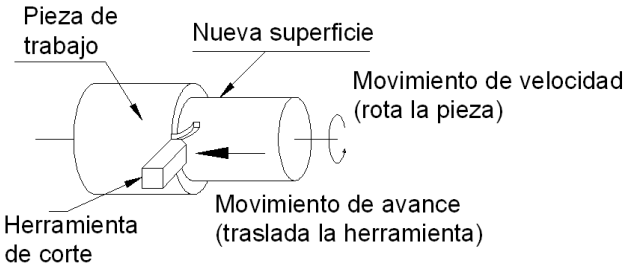


Figura 1.5. Proceso de mecanizado

El proceso de mecanizado usado para realizar las pruebas en esta tesina es el torneado.

Torneado

Consiste en arrancar viruta de una pieza mecánica por medio de una cuchilla que avanza longitudinal o radialmente mientras que la pieza gira sobre su propio eje accionado por el torno, figura 1.6.

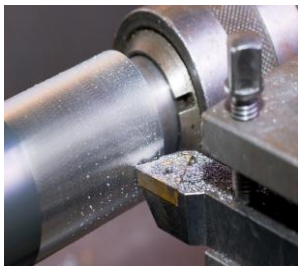


Figura 1.6 Trabajo realizado en el torno

La tabla 1.3 muestra las características que tienen los procesos de mecanizados en función de la herramienta de corte.

TABLA 1.3.
CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTA

	MOVIMIENTO		HERRAMIENTA	FUNCION	APLICACIÓN
	PIEZA	HERRAMIENTA			
TORNEADO	Gira alredeor de su eje	Avanza longitudinamente	Cuchilla	Dar forma cilindrica a piezas mecánicas, relizar agujeros internos.	Arboles para transmición
TALADRADO	No se mueve	Gira y se mueve en dirección de su eje	Broca	Realizar agujeros redondos	Agujeros redondos
RECTIFICADO	Se mueve longitudinalmente	Gira y se mueve en dirección de su eje	Piedra abrasiva	Dar acabado perfecto a piezas mecánicas	Block de motores, camisa de motores, cigueñales, etc

Condiciones de corte.

El arranque de viruta se realiza mediante la penetración de una herramienta, cuyo material es de mayor dureza que el de la pieza a cortar.

Este proceso de incrustación ocurre mientras se efectúa el movimiento relativo entre la pieza a trabajar y la herramienta de corte, Figura 1.5.

Este movimiento se da por 3 condiciones de corte muy importantes, que son las siguientes:

- Movimiento de corte.
- Movimiento de avance.
- Profundidad de corte.

Movimiento de corte.

Es el movimiento que permite que la herramienta penetre en el material, produciendo viruta. A la velocidad periférica de la pieza se la conoce como velocidad de corte, se la designa como V_C y mide la velocidad en m/min. Figura 1.7.

Movimiento de avance.

Es el movimiento longitudinal realizado por la herramienta de corte en dirección paralela al eje de rotación de la pieza a mecanizar. Este movimiento es designado como ***f*** y se mide en unidades de mm/rev. Figura 1.7.

Profundidad de corte.

Profundidad de corte es el espesor de material removido en una pasada de la herramienta de corte, depende de la posición relativa entre la herramienta y la pieza. Y se la representa con la letra ***p*** y es medida en mm**.** Figura 1.7.

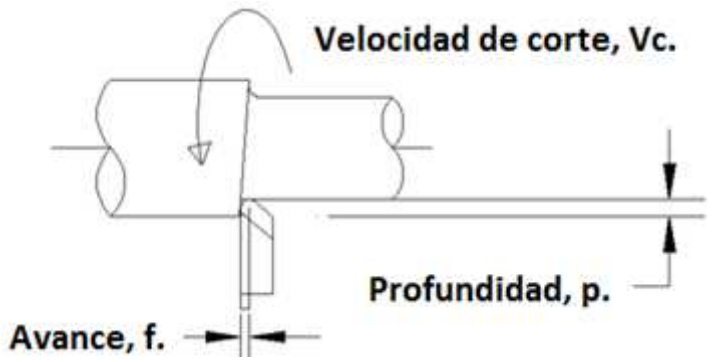


Figura 1.7. Condiciones de corte en el proceso de mecanizado.[1]

[1] Referencia "Fundamentos de manufactura moderna" Mikell Groover, Pag. 547

Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales

La formación de viruta se caracteriza como un fenómeno de transición de un estado de corte en la herramienta, que puede aumentar o disminuir la vida de una herramienta de corte. Por tal razón el primer paso de toda investigación relativa a la vida de la herramienta es el de analizar la mecánica de corte del metal y el mecanismo de formación de viruta.

No existe una teoría general para este proceso, debido a su complejidad y variedad de fenómenos que acompañan al corte de metal, como son la deformación del metal, efectos por temperatura, cambios de propiedades en materiales, y demás efectos físicos. Para esto se usa un modelo que simplifica muchas de estas complejidades, este modelo se lo llama *modelo de corte ortogonal*.

Modelo de corte ortogonal

El modelo ortogonal para formación de viruta usa una herramienta en forma de cuña para el corte. La formación de la viruta se da a lo largo de un plano, llamado ***plano de corte***, debido a la presión que el filo de la herramienta realiza sobre el material a mecanizar.

El plano de corte forma un ángulo con la superficie de trabajo, este ángulo es el ángulo de ataque, que lo se verá más adelante y se lo denota como $\boldsymbol{\gamma}$. La dimensión de éste ángulo va a regir la formación de la viruta. La figura 1.8 muestra el corte ortogonal de una pieza.

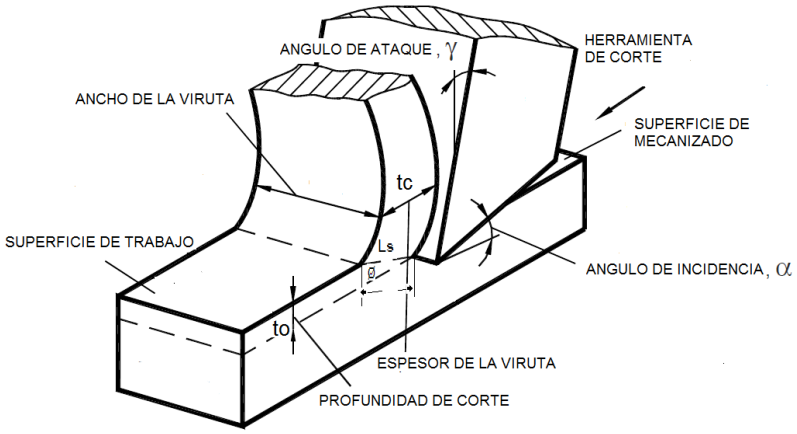


Figura 1.8 Modelo de corte ortogonal[2]

Donde el término $\boldsymbol{t_o}$ se refiere al espesor inicial de la viruta que es igual a la profundidad de corte, mientras que $\boldsymbol{t_c}$ se refiere a al espesor de la viruta después de ser mecanizada la pieza.

Estos espesores dan cabida a un nuevo término que se lo llama relación de espesor de viruta y se denota de la siguiente manera:

[2] "Fundamentos de manufactura moderna". Mikell Groover. Pag. 549

$$r = \frac{t_o}{t_c} \qquad \text{(Ec. 1.1)}$$

Otro término que nos muestra la figura es el ángulo ∅, éste ángulo es formado por la longitud del plano de corte denotada como $\boldsymbol{l_s}$ con el plano horizontal y se lo llama ángulo de plano de corte o de cizallamiento.

El modelo ortogonal nos ayuda a relacionar los tres parámetros, ángulo de desprendimiento, ángulo de plano de corte y el espesor de la viruta.

Usando componentes ortogonales se puede sustituir los espesores de la viruta, por una ecuación que relacione los parámetros antes mencionados:

$$t_0 = l_s sen\emptyset \qquad \text{(Ec. 1.2)}$$

$$t_c = l_s \cos(\emptyset - \propto) \qquad \text{(Ec. 1.3)}$$

Por lo tanto la relación de viruta:

$$r = \frac{l_s sen\emptyset}{l_s \cos(\emptyset - \propto)} \qquad \text{(Ec. 1.4)}$$

Usando identidades matemáticas, se puede obtener el ángulo de plano de corte∅, de la siguiente ecuación:

$$tan\emptyset = \frac{rcos\propto}{1-rsen\propto} \qquad \text{(Ec. 1.5)}$$

Formación real de viruta

La formación de la viruta realmente no se la realiza en un plano de corte como se supone en el modelo ortogonal, se realiza sobre una zona primaria llamada zona delgada de cizallamiento que no es exactamente un plano pero que por ser muy delgada y para efectos de estudio se la aproxima a un plano de corte. En la figura 1.9 se muestra la forma real que se forma la viruta.

El arranque de viruta produce otra zona de corte, esta es producida por el roce entre la viruta y la cara de la herramienta de corte cuando la viruta va saliendo. Esta zona se la conoce como zona secundaria de corte.

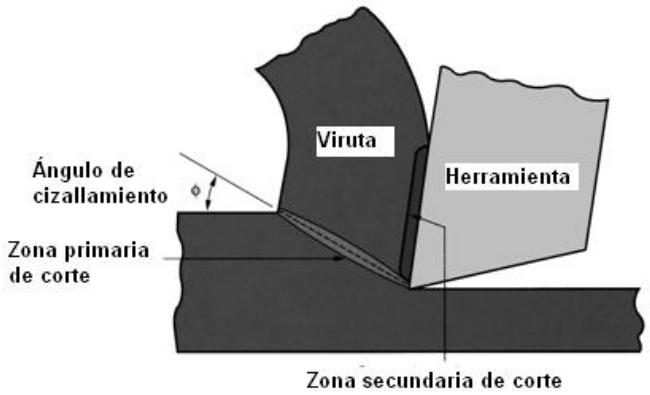


Figura 1.9 Forma realista de la formación de viruta

La forma o tipo de viruta obtenidas en un proceso de mecanizado depende muchos factores, pero muy especial del tipo de material a mecanizar, de las condiciones de movimiento que se le da y de la geometría de la herramienta de corte.

Existen 3 tipos de viruta, que son:

- Viruta continúa.
- Viruta discontinua.
- Viruta continúa con acumulación en el borde.

La viruta continua es de forma alargada como lo muestra la figura 1.10 (a) y se produce en materiales dúctiles a altas velocidades de corte pero a avances y profundidades pequeñas. Este tipo de virutas hace que haya más fricción entre las dos superficies, disminuyendo el tiempo de vida de la herramienta por el aumento de calor.

La viruta discontinua es de forma segmentada es decir desprende viruta corta en forma de conchitas, figura 1.10 (b). Esta viruta es producto del mecanizado en materiales frágiles a bajas velocidades de corte pero a avances y profundidades elevados. El tiempo de contacto es corto, así que el tiempo de vida de la herramienta va a ser mayor.

La viruta continua con acumulación en el borde, es producida mayoritariamente en materiales dúctiles mecanizados a velocidades cortas produciendo mayor fricción entre la viruta y la herramienta de corte adhiriendo parte de la viruta en el filo de la herramienta de corte y en la pieza mecanizada ocasionando que se forme asperezas, figura 1.10 (c).

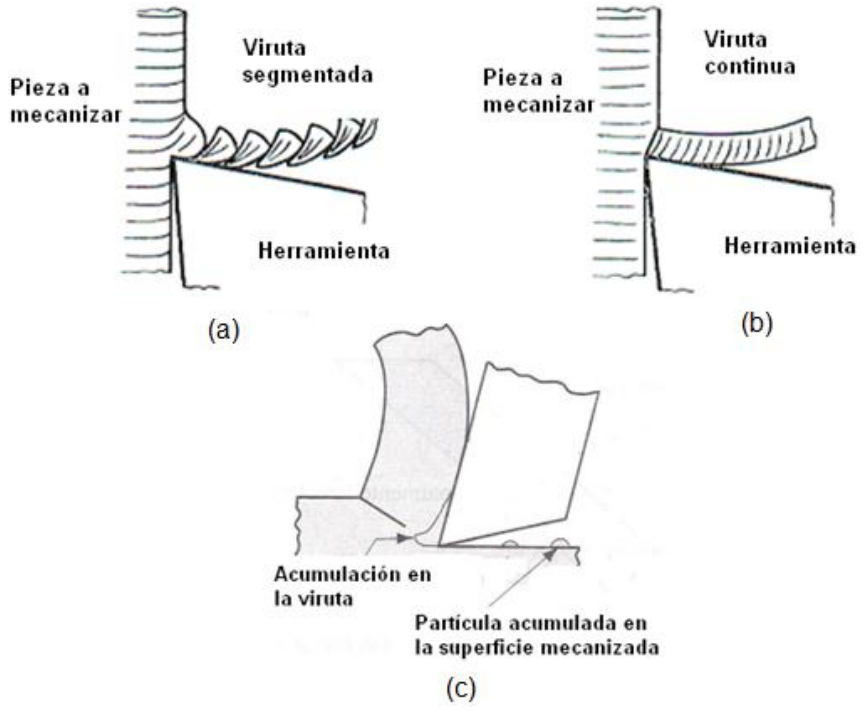


Figura 1.10. (a) Viruta discontinua. (b) viruta continúa y (c) viruta continúa con acumulación en el borde.

1.3. Definición y términos de la geometría de las herramientas de corte

La herramienta de corte es el elemento que entra en contacto directo con la pieza y produce la eliminación del material sobrante de la pieza.

Geometría de las herramientas de corte

Las herramientas de corte se pueden dividir en dos categorías: de punta sencilla y de bordes o filos múltiples. Las herramientas para torneado representan el primer tipo, mientras que las brocas y las fresas representan el segundo. En este caso se analiza la geometría de las herramientas de primer tipo.

1.3.1. Ángulos característicos

Una herramienta sencilla de corte está constituida por dos superficies planas que se interceptan en el filo de ataque o de corte, y está limitada por otras dos superficies laterales y opuestas que no tienen relación directa con el corte pero que sirven para definir la herramienta. La figura 1.11 muestra las superficies que componen una herramienta de corte

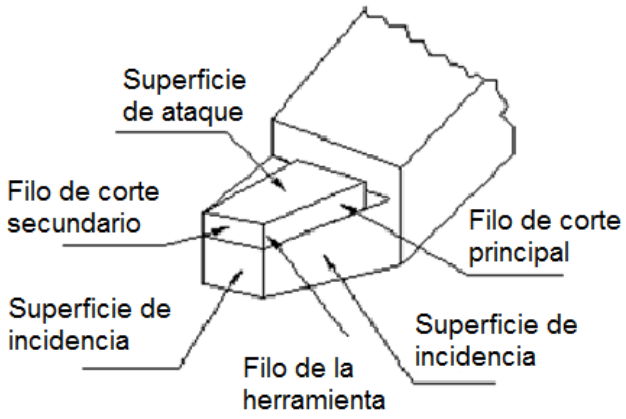


Figura 1.11 Superficies de la herramienta de corte.

La superficie de ataque es por donde fluye la viruta separada de la pieza. ***La superficie de incidencia*** es aquella que queda siempre frente a la superficie mecanizada. ***Las superficies laterales*** como se indico antes no tienen relación directa con el corte, pero dan forma y robustez a la herramienta.

1.3.2. Influencia de los ángulos

Las superficies de ataque y de incidencia forman respectivamente con el plano normal a la superficie de la pieza y con el plano coincidente o tangente a dicha superficie que contiene al filo de corte, tres ángulos: Ángulo de ataque ($\boldsymbol{\gamma}$), Ángulo de incidencia (α) y Ángulo sólido de la herramienta (β) que se muestra la figura 1.12.

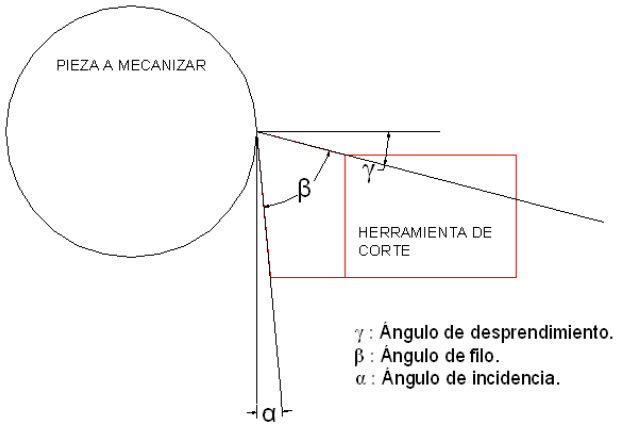


Figura 1.12 Ángulos característicos de una herramienta de corte

Ángulo de desprendimiento o de ataque.

Esta formado entre la superficie de desprendimiento y la normal a la superficie de la pieza. Este ángulo influye notablemente en los esfuerzos y potencia de corte así como en el tipo de viruta.

Con ángulos de desprendimiento grandes se disminuye el esfuerzo y potencia de corte debido a que el área de corte es menor, pero se aumenta el contacto entre la viruta y la herramienta haciendo que haya más fricción y por ende más calor. Además, ángulos grandes hacen debilitar a la herramienta corriendo peligro de fracturarse, figura 1.13 (a).

La relación de Merchant nos ayuda a entender de manera matemática la relación que existe entre el ángulo de ataque $\boldsymbol{\gamma}$, el ángulo de plano de corte $\emptyset$ y el ángulo de fricción $\boldsymbol{\delta}$ mediante la siguiente ecuación:

$$\emptyset = 45 + \frac{\alpha}{2} + \frac{\delta}{2} \qquad \text{(Ec. 1.5)}$$

Donde el ángulo de fricción se lo puede relacionar con el coeficiente de fricción de la herramienta como sigue:

$$\mu = \tan(\delta) \qquad \text{(Ec. 1.6)}$$

Mientras que en ángulos pequeños la herramienta se hace más robusta y el contacto entre la viruta y superficie de la herramienta es pequeño por lo tanto habrá menos fricción.

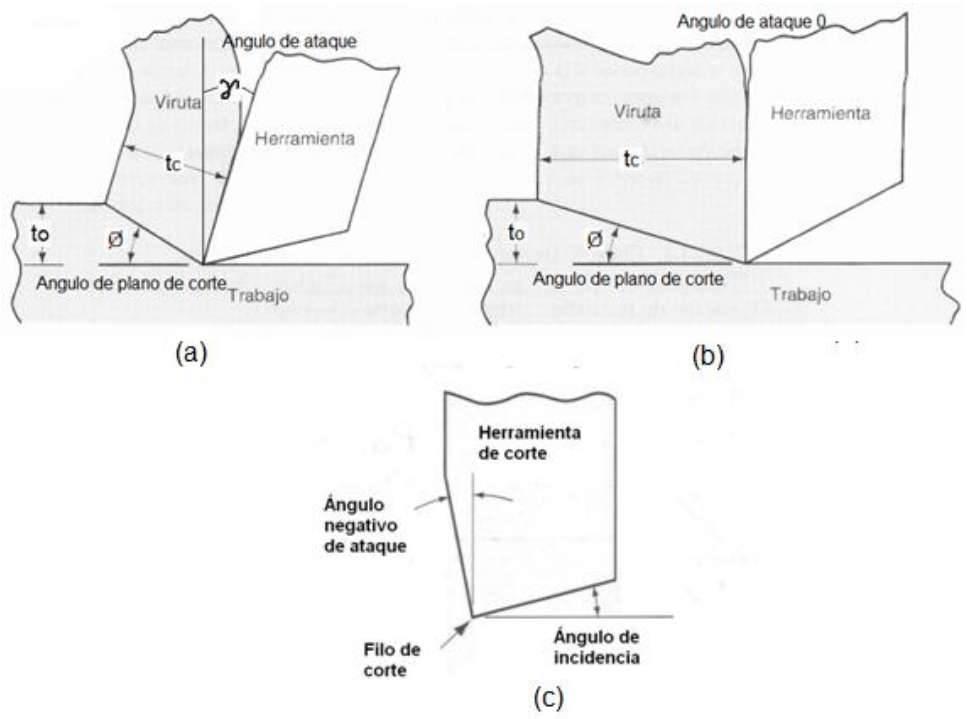


Figura 1.13. (a) Ángulo positivo, (b) ángulo cero, y (c) ángulo negativo

Existen también herramientas de corte con ángulos negativos, figura 1.13 (c), donde estas herramientas trabajan a presión y son usadas para materiales duros y de cortes interrumpidos. El ángulo negativo hace que se deforme más la viruta a la hora de ser mecanizada.

La tabla 1.4 muestra los rangos de ángulos según el material y la viruta.

TABLA 1.4.

RANGO DE ÁNGULOS DE DESPRENDIMIENTO

ÁNGULO	MATERIAL	VIRUTA	HERRAMINETA
Positivo 10 - 40	Dúctil	Continua	HSS
Positivo 0º - 10º	Frágil	Fragmentada	Metal duro
Negativo 0 - -8º	Frágil	Mas fragmentada	Metal duro

Ángulo de incidencia.

Es el ángulo formado entre el dorso de la herramienta y la superficie trabajada de la pieza. Evita el roce entre el talón de la herramienta y la parte de la pieza ya mecanizada.

El valor de los ángulos debe ser lo menor posible pero siempre mayor a 0º.

Ángulo sólido de la herramienta.

Es el ángulo que forma la superficie de desprendimiento con la superficie de incidencia. Este ángulo es de vital importancia ya que da robustez a la herramienta. Una herramienta con ángulo sólido bajo penetra con mayor facilidad el material pero lo hace débil.

1.4. Materiales de las herramientas de corte

Existe una variedad de materiales para herramientas de corte, que van desde los aceros de alto carbono hasta las cerámicas y diamantes; y ahora existen con las nuevas aleaciones materiales más resistentes, como es el nitruro de boro cúbico, que se utiliza en procesos de mecanizado de materiales duros de más de 48 RC y trabaja a altas temperaturas 2000 C.

Es por esto que se debe tener en cuenta la diferencia que existe en cada tipo de materiales para su correcta selección.

1.4.1. Propiedades

Una herramienta de corte debe tener 3 propiedades principales, que son:

- Dureza.
- Resistencia.
- Tenacidad.

Dureza.

Se define como dureza, a la resistencia que tiene el material a la penetración. También es importante la dureza en caliente, que es capaz de mantener sus propiedades de dureza a altas temperaturas.

Resistencia al desgaste.

Esta propiedad con lleva la propiedad anterior, dureza. Ya que la dureza ayuda a resistir el desgaste abrasivo que da lugar entre la superficie de ataque y la viruta. Mientras mayor resistencia al desgaste tenga la herramienta, mas durará la herramienta sin tener que cambiarla.

Tenacidad

Quizás sea la propiedad más importante de las tres. Es la capacidad que tiene el material para absorber energía ante un impacto sin que el material se fracture. Esta propiedad es muy importante al inicio de cada mecanizado, o cuando hay corte intermitentes.

1.4.2. Tipos de herramientas de corte

Hoy en día la tecnología nos permite crear materiales más resistentes y de mayor dureza, dependiendo los diferentes tipos de aleaciones. En esta tesina se menciona los siguientes materiales de herramienta:

- Acero rápido HSS.
- Carburos cementados.
- Carburo cementado recubierto.
- Cermets.
- Cerámicos.
- Súper-herramientas.

La tabla 1.5 analiza la dureza y resistencia de algunos materiales para herramientas de corte, mientras la figura 1.19 y 1.20 muestra

las propiedades de los materiales usados para la fabricación de herramientas de corte.

TABLA 1.5.

VALORES DE DUREZA Y RESISTENCIA DE VARIOS MATERIALES PARA HERRAMIENTAS A TEMPERATURA AMBIENTE[3]

Material	**Resistencia a la ruptura transversal**	
	Dureza	**Esfuerzo lb/pulg^2**
Acero al carbono	60HRC	750000
Acero de alta velocidad (HSS)	65HRC	600000
Carburo cementado (WC) con bajo contenido de Co	93HRA, 1800 HK	200000
Carburo cementado (WC) con a alto contenido de Co	90HRA, 1700 HK	350000
Cermet (TiC)	2400 HK	250000
Alúmina (Al_2O_3)	2100 HK	60000
Nitruro cúbico de boro	5000 HK	100000
Diamante poli cristalino	6000 HK	150000

[3] Referencia "Fundamentos de manufactura moderna" Mikell Groover. Pag 577

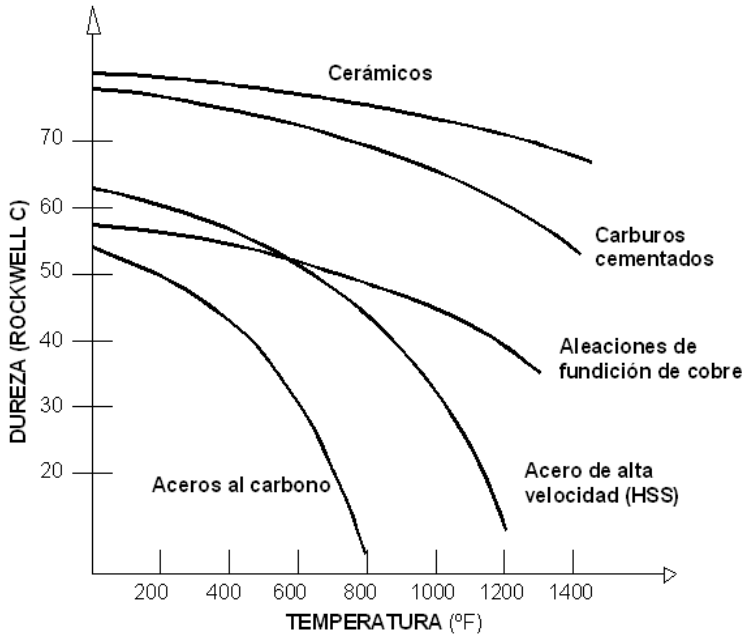


Figura 1.14 Comportamiento de la dureza del material a altas temperaturas

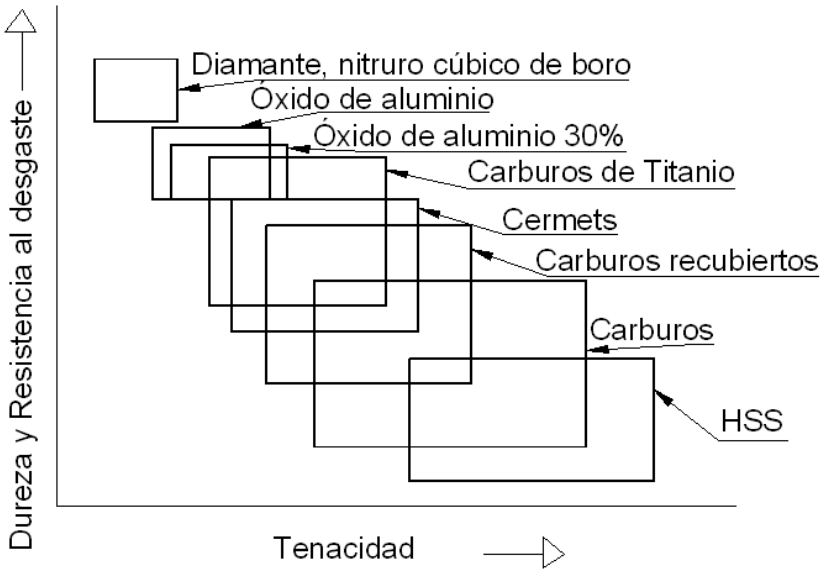


Figura 1.15 Comparación de propiedades para diferentes materiales de herramientas de corte

Acero rápido

El acero de alta velocidad (también llamado HSS) es una aleación de metales que contiene alrededor de 20 % de partículas duras. Los componentes principales son el molibdeno (Mb) y el tungsteno (W), aunque puede llevar en pequeño porcentaje cromo (Cr), Vanadio (V). En la tabla 1.6. se puede ver el efecto de la aleación

TABLA 1.6. ELEMENTOS DE ALEACIÓN EN ACEROS DE ALTA VELOCIDAD Y SUS EFECTOS SOBRE SUS PROPIEDADES

Elemento de aleación	Funciones en el acero de alta velocidad
Tungsteno	Incrementa la dureza en caliente
	Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros
Molibdeno	Incrementa la dureza en caliente
	Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros
Cromo	Profundiza la templabilidad durante el tratamiento térmico
	Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros
	Resistencia a la corrosión (efecto menor)
Vanadio	Se combina con el carbono para resistencia al desgaste
	Retarda el crecimiento de los granos para mejor tenacidad
Cobalto	Incrementa la dureza en caliente
Carbono	Elemento principal de endurecimiento del acero
	Proporciona carbono disponible para formar carburos con otros elementos de aleación e incrementa la resistencia al desgaste.

Carburo cementado

Son hechos de partículas de carburos unidas por un aglomerante a través de un proceso de sinterizado. Los carburos más usados son el carburo de Tungsteno (WC), carburo de Titanio (TiC), carburo de Tantalio (TaC), carburo de Niobio (NbC), mientras que el aglomerante más usado es el cobalto (Co). Las herramientas hechas de carburo cementado son adecuadas para mecanizar materiales como el aluminio y silicio, para el acero no es recomendable debido al desgate en cráter formado en la interfase herramienta –viruta. Tiene una dureza mayor a los 90 HRA, buena resistencia en caliente, alta resistencia al desgaste, pero una tenacidad inferior que los aceros de alta velocidad (figura 1.15).

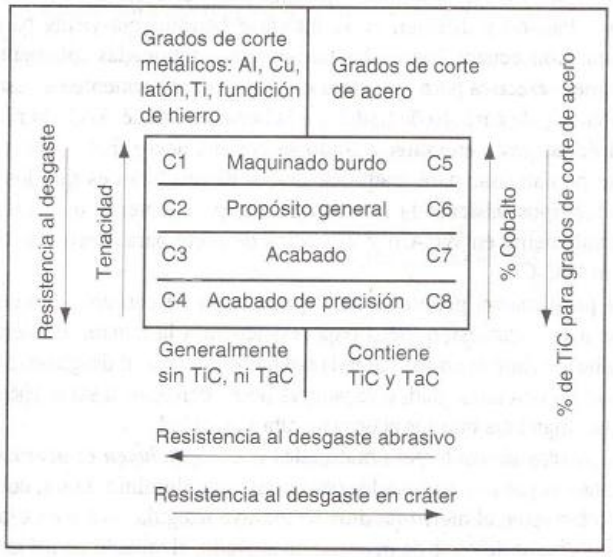


Figura 1.16. Clasificación de carburos cementados (1)

Carburo cementado recubierto.

La base de carburo cementado es recubierto por materiales más resistentes al desgaste como son carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), óxido de aluminio (Al_2O_3), nitruro de titanio y carbono (TiCN) y nitruro de titanio y aluminio (TiAlN). La adhesión del recubrimiento será mediante deposición química por vapor (CDV), por deposición física por vapor (PVD) o por deposición química por vapor a temperatura media. Son usados para maquinar fundiciones de hierro y aceros, debido a su buen equilibrio entre tenacidad y resistencia al desgaste.

Cermets.

Están en el grupo de los carburos cementados, pero a diferencia de ellos las partículas bases son el carburo de titanio, nitruro de titanio y carbonitruro de titanio en vez de carburo de tungsteno.

Así mismo el aglutinante ahora es el níquel. Son usados en trabajos a altas velocidades de corte, tienen buena resistencia al desgaste, gran dureza en caliente, estabilidad química con los materiales mecanizados y baja tendencia a la oxidación.

Se aplican mejor a materiales dúctiles, aceros y a las fundiciones dúctiles.

Cerámicos.

Los cerámicos usados como herramientas de corte están basados en óxido de aluminio que es prensado y sinterizado a altas presiones y temperaturas sin aglutinante. Son duros, con alta dureza en caliente, y no reaccionan químicamente con el material de la pieza. Sin embargo son muy frágiles por lo cual no se le recomienda para operaciones interrumpidas.

Son usadas para maquinar fundiciones de hierro y aceros, además puede ser usado como un abrasivo en el esmerilado.

Súper herramientas.

Por último se tiene las súper herramientas, son los materiales más duros existentes para usar como herramientas de corte. El nitruro de boro cúbico es un material muy duro, tiene dureza extrema en caliente, excelente resistencia al desgaste y en general buena estabilidad química durante el mecanizado. Entre sus desventajas esta su fragilidad, aunque es más tenaz que las cerámicas.

Otro material duro y quizás el más duro hasta ahora es el diamante poli cristalino que es casi tan duro como un diamante natural, tiene una increíble resistencia al desgaste y baja conductividad térmica. Sin embargo son muy frágiles y no puede llegar a temperaturas de corte mayor a 600 ºC. Es perfecto para mecanizar a alta velocidad materiales no ferrosos y abrasivos no metálicos como fibra de vidrio y grafito. En acero y otros metales ferrosos no es práctico usar el diamante como herramienta de corte debido a la afinidad química que existe entre los metales y el carbono.

Grados de metal duro y sus aplicaciones

Las normas ISO han clasificado y codificado las herramientas de metal duro según su aplicación de acuerdo a la tabla 1.7.

El grado de la herramienta indica su tenacidad o dureza, a mayor grado mayor tenacidad y a menor grado mayor dureza.

TABLA 1.7.

TABLA DE CLASIFICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE METAL DURO

Código ISO	Grados	Color	Características y aplicación
P	01, 10, 20, 30, 40, 50		Se usan para el mecanizado de acero de viruta larga, aceros al carbono y de baja aleación(hasta 5% de aleantes) con dureza hasta 400HB
M	10, 20, 30, 40		Se usan para maquinar acero inoxidable, ferrítico y martensítico, acero fundido, acero al manganeso, fundición aleada, fundición maleable y acero de fácil mecanización.
K	01, 10, 20, 30		Se usan para el maquinado de fundiciones de hierro de viruta corta.
N	01, 10. 20, 30		Ideal para maquinar metales no ferrosos con durezas hasta 130HB, aleaciones de aluminio con menos de 12% de silicio
S			Se usan para el mecanizado de aleaciones termo resistentes y súper aleaciones. Pueden ser de base de níquel, de base de titanio, base de cobalto.
H	01, 10, 20, 30		Se usan para el maquinado de aceros endurecidos y templados con durezas entre 45RC y 68RC

Código de formatos de las plaquitas de metal duro

Se ha normalizado el código para denominar las herramientas de corte, definir su geometría y composición, este código se compone de 4 letras y 6 números, en la tabla 1.8. se define que determina cada uno de estos.

TABLA 1.8. CÓDIGO DE HERRAMIENTAS DE METAL DURO

Primera letra	Forma geométrica	Segunda letra	Ángulo de incidencia	Tercera letra	Tolerancia dimensional	Cuarta letra	Tipo de sujeción
C	Rómbica 80º	A	3º	J		A	Agujero sin avellanar
D	Rómbica 55º	B	5º	K	Menor	G	Agujero con rompevirutas en dos caras
L	Rectangular	C	7º	L		M	Agujero con rompevirutas en una cara
R	Redonda	D	15º	M		N	Sin agujero ni rompevirutas
S	Cuadrada	E	20º	N		W	Agujero avellanado en una cara
T	Triangular	F	25º	U		T	Agujero avellanado y rompevirutas en una cara
V	Rómbica 35º	G	30º		Mayor	N	Sin agujero y con rompevirutas en una cara
W	Hexagonal 80º	N	0º			X	No estándar
		P	11º				

Los fabricantes de las herramientas suelen agregar dígitos para explicar características especiales. Las dos primeras cifras indican en milímetros la longitud de la arista de corte de la plaquita, las dos cifras siguientes indican en milímetros el espesor de la plaquita, mientras que las dos últimas cifras indican en décimas de milímetro el radio de punta de la plaquita.

1.5. Mecanismos de desgaste

Debido a las elevadas fuerzas necesarias para producir el arranque de viruta y al movimiento friccionante entre la viruta y la herramienta se produce el desgaste de esta, agravado por el aumento de temperatura en la zona de corte. La figura 1.16 muestra el lugar donde se produce el desgaste.

Los mecanismos de desgaste se pueden clasificar en 4 categorías:

- Desgaste abrasivo.
- Adhesión.
- Deformación plástica.
- Difusión.

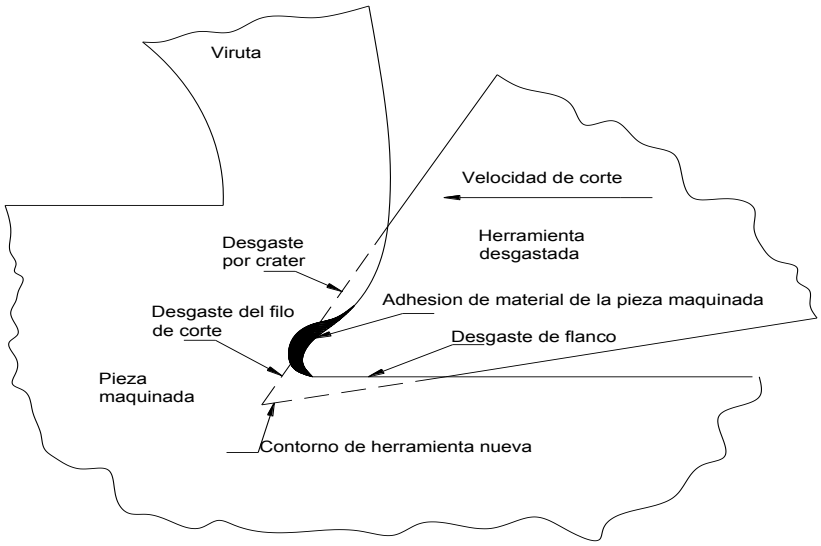


Figura 1.17 Superficies típicas de desgaste[4]

Desgaste abrasivo

Ocurre cuando partículas muy duras del material cortado chocan con la superficie de la herramienta y causan grietas o ralladuras sobre esta.

Adhesión

Partículas del material cortado se adhieren a la herramienta de corte debido a las altas presiones y temperaturas que luego son separadas por las mismas fuerzas involucradas, causando desprendimiento de material de la herramienta.

[4] Referencia "ASM HANDBOOK VOL. 16" Tool wear and tool life fig. 2

Deformación plástica

Al momento de cortar se producen presiones muy elevadas que causan deformación plástica en el borde de la herramienta, lo cual disminuye la vida de la herramienta debido al desprendimiento o desgaste del filo de corte.

Difusión

Debido al calor generado y a la cercanía entre la viruta y la herramienta se puede alcanzar una temperatura crítica en la cual se produce el intercambio de partículas variando las propiedades de la herramienta, endureciendo la viruta y favoreciendo la adhesión y abrasión.

Cuando se usa velocidades de corte muy elevadas la temperatura en la zona de corte también es elevada causando perdida de la dureza en la herramienta lo cual produce un aceleramiento en el desgaste de la herramienta de corte.

Cuando no se selecciona correctamente los parámetros de corte se puede ocasionar excesos en las fuerzas involucradas causando la fractura de la herramienta.

Otro acelerador del desgaste o causa de falla de la herramienta de corte es el mal estado de la máquina herramienta, la cual puede generar vibraciones que disminuirán el tiempo de vida de las herramientas. La figura 1.18 indica los diferentes parámetros que pueden incidir en el desgaste de la herramienta.

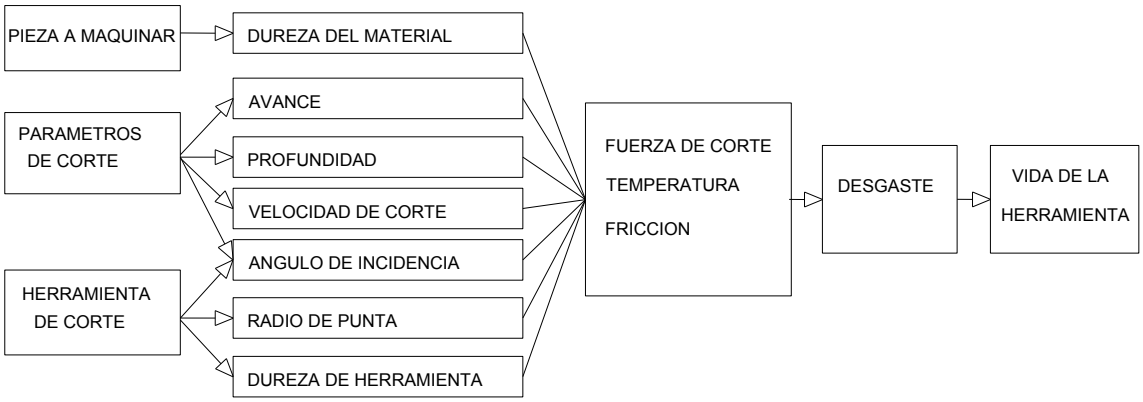


Figura 1.18 Efecto de diferentes parámetros en el tiempo de vida de la herramienta

1.6. Formulación de Taylor para obtener el tiempo de vida del material.

A medida que se usa una herramienta de corte actúan varios mecanismos de desgaste. Como se ha visto, este desgaste depende de los parámetros de corte y del material de herramienta de corte y de la pieza a maquinar, por lo tanto existe una relación entre el desgaste y el tiempo de uso de la herramienta de la siguiente forma. Gráficamente esta relación se la puede observar en la figura 1.19.

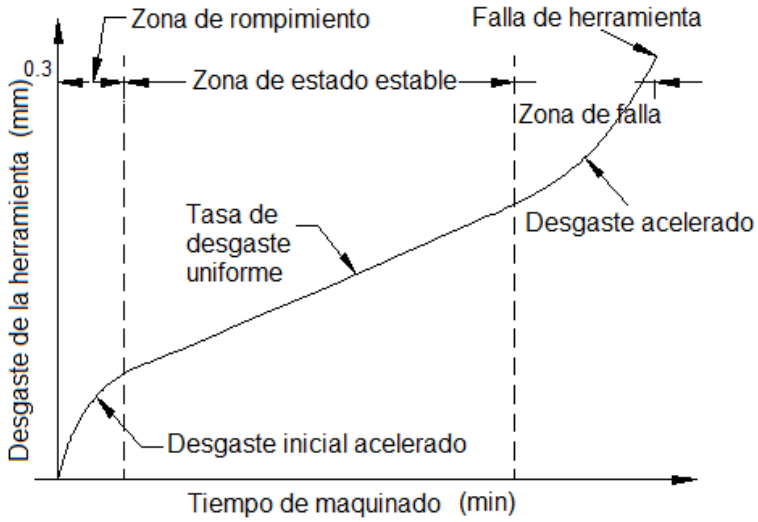


Figura 1.19. Desgaste de una herramienta en función del tiempo[5]

[5] Referencia "Fundamentos de manufactura moderna" Mikell Groover. Pag 572

En esta curva se diferencian 3 zonas: la primera se la conoce como zona de rompimiento y se produce un desgaste acelerado del filo de corte durante los primeros minutos de operación, en la segunda etapa o de estado estable se produce un desgaste uniforme y finalmente está la zona de falla en la cual se acelera el desgaste y se aumenta la fricción y por lo tanto la temperatura lo cual perjudica tanto a la herramienta como a la pieza maquinada.

Generalmente se considera que una herramienta no sirve cuando no realiza un trabajo eficiente y de buena calidad. En este caso el desgaste del flanco es una medida representativa de este proceso. La figura 1.20 muestra la forma que se produce el desgaste a distintas velocidades de corte tomando como criterio que la herramienta se desgasta en 0.3 en el flanco.

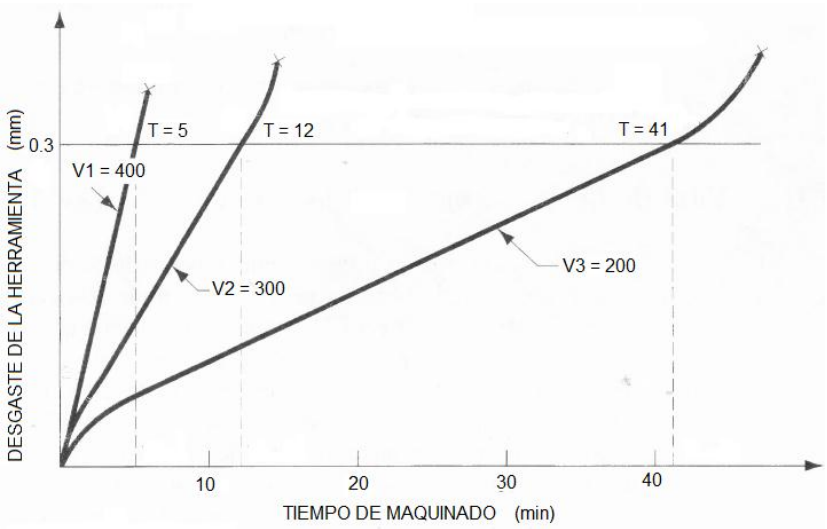


Figura 1.20.Efecto de la velocidad de corte en el desgaste de la herramienta con velocidades y tiempos hipotéticos.[6]

Cuando se grafica en una escala logarítmica las velocidades de corte versus el tiempo de vida de la herramienta, figura 1.21, se encuentra una relación lineal conocida como la ecuación de Taylor:

$$V.T^n = C \qquad \text{(Ec. 1.6)}$$

Donde, ***V*** es la velocidad de corte (m/min), ***T*** el tiempo de vida de la herramienta (min), ***n*** y ***C*** son constantes determinadas experimentalmente y dependen de los parámetros de corte, de los materiales involucrados y del criterio de desgaste de la herramienta.

[6] Referencia "Fundamentos de manufactura moderna" Mikell Groover. Pag 572

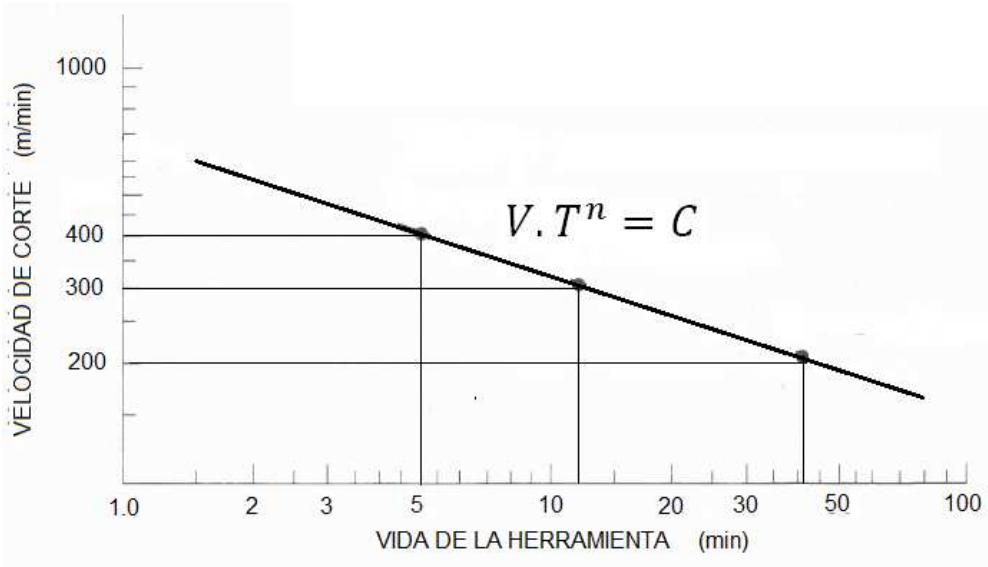


Figura 1.21.Gráfico de velocidad de corte vs tiempo de maquinado en escalas logarítmicas

Para incluir los parámetros de corte y las características del material a maquinar se ha formulado la siguiente ecuación:

$$V.T^n.f^a.p^b = K \qquad \text{(Ec. 1.7)}$$

Donde, V y T son los mismos parámetros usados para la ecuación 1.6, mientras que ***f*** es la velocidad de avance (mm/rev); ***p*** es la profundidad de corte (mm); ***n, a, b*** y ***C*** son constantes determinadas experimentalmente y dependen de los condiciones de corte, se ha determinado que la velocidad de corte es el factor más incidente ya que su exponente es 1 y tanto a, b como d son menores que 1.

1.7. Proceso de mecanizado en TORNO CNC

Las máquinas herramienta son equipos utilizados para la producción de máquinas, instrumentos, herramientas y todo tipo de piezas de repuesto, por ello la importancia de su estudio. Para este estudio se usa un torno de control numérico o torno CNC.

El torneado es un proceso en el cual una herramienta con un punto de contacto remueve el material de una pieza giratoria. Los tornos se emplean para el torneado exterior cilíndrico, cónico o superficies de contorno; perforados cilíndricos o cónicos, superficies de mecanizado cara, roscados internos y externos, moleteados, centrar, avellanar, refrentar, escariado de agujeros, cortar, y otras operaciones.

En un torno de control numérico (CNC) una computadora controla la velocidad de rotación de la pieza, la posición y velocidad de la herramienta de corte. Estas órdenes se dan en códigos numéricos a través del computador.

Condiciones de corte en tornos

En el torno el movimiento de corte lo realiza la pieza a maquinar y la velocidad de corte Vc viene dada por la relación

$$V = \pi . D . N \qquad \text{(Ec. 1.8)}$$

Donde, V es velocidad de corte (m/min), D es el diámetro inicial de la pieza a maquinar (m), N es la velocidad rotacional (rev/min)

El movimiento de avance lo realiza la herramienta y la velocidad de avance, viene dado en mm/rev, de esta velocidad dependerá el tiempo de maquinado, el acabado superficial de la pieza, las fuerzas involucradas en el proceso y por lo tanto el desgaste de la herramienta.

La profundidad de corte es efectuado por la herramienta, esta define el diámetro final de la pieza y depende de la potencia del torno, de las propiedades físicas del material a maquinar y de la resistencia de la herramienta de corte, ya que si la profundidad de corte es mayor, las fuerzas serán más grandes.

El tiempo de maquinado para una pieza cilíndrica viene dado por:

$$Tm = \frac{\pi DL}{f.V} \qquad \text{(Ec. 1.9)}$$

Donde, ***Tm*** es el tiempo de maquinado (min); ***L*** la longitud a maquinar (mm); ***f*** la velocidad de avance (mm/rev); ***V*** la velocidad de corte (mm/min)

La razón volumétrica de material removido está dada por

$$R_{MR} = V.Va.p \quad \text{(Ec. 1.9)}$$

Donde, $\boldsymbol{R_{MR}}$ es la razón de material removido (mm3/min); ***f*** la velocidad de avance (mm/rev); ***V*** la velocidad de corte (mm/min); p es la profundidad de corte (mm).

Estos parámetros anteriormente mencionados son importantes para calcular la velocidad más eficiente de corte y minimizar los tiempos de producción.

Programación de tornos CNC

Existen varias formas de programar una máquina CNC dependiendo de los fabricantes. Actualmente se ha normalizado estos códigos de programación siendo la norma más usada la DIN 66024 y DIN 66025, en las cuales se establecen los siguientes:

- N: es la dirección correspondiente al número de bloque o secuencia. Esta dirección va seguida normalmente de un número de tres o cuatro cifras. En el caso del formato N03, el número máximo de bloques que pueden programarse es 1000 (N000 hasta N999).
- X, Y, Z: son las direcciones correspondientes a las cotas según los ejes X, Y, Z de la máquina herramienta. Dichas cotas se pueden programar en forma absoluta o relativa, es decir, con respecto al cero de la pieza o con respecto a la última cota respectivamente.
- G: es la dirección correspondiente a las funciones preparatorias. Se utilizan para informar al control de las características de las funciones de mecanizado, como la forma de la trayectoria, tipo de corrección de herramienta, parada temporizada, ciclos automáticos, programación absoluta y relativa, etc. La función G va seguida de un

número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones preparatorias diferentes.

- M: es la dirección correspondiente a las funciones auxiliares o complementarias. Se usan para indicar a la máquina herramienta que se deben realizar operaciones tales como parada programada, rotación del husillo a derechas o a izquierdas, cambio de útil, etc. La dirección m va seguida de un número de dos cifras que permite programar hasta 100 funciones auxiliares diferentes.
- F: es la dirección correspondiente a la velocidad de avance. Va seguida de un número de cuatro cifras que indica la velocidad de avance en mm/rev.
- S: es la dirección correspondiente a la velocidad de rotación del husillo principal. Se programa directamente en revoluciones por minuto, usando cuatro dígitos.
- I, J, K: son direcciones utilizadas para programar arcos de circunferencia. Cuando la interpolación se realiza en el plano X-Y, se utilizan las direcciones I y J. Análogamente, en el plano X-Z, se utilizan las direcciones I y K, y en el plano Y-Z, las direcciones J y K.
- T: es la dirección correspondiente al número de herramienta. Va seguido de un número de cuatro cifras en el cual los dos primeros

indican el número de herramienta y los dos últimos el número de corrección de las mismas.

Para esta tesina se creó un código CNC para llevar a cabo la operación de maquinado, el código es el siguiente:

```
N10  M03  S1657;
N20  G00  U-2;
N30  G01  W-174  F0.1;
N40  G00  U1  W174;
N50  M30;
```

Normas de seguridad para operación de torno

- Utilizar equipo de seguridad: gafas de seguridad, caretas para proteger los ojos.
- No utilizar ropa holgada o muy suelta. Se recomiendan las mangas cortas.
- Utilizar ropa de algodón.
- Utilizar calzado de seguridad.
- Mantener el lugar siempre limpio.
- Si se mecanizan piezas pesadas utilizar polipastos adecuados para cargar y descargar las piezas de la máquina.
- Es preferible llevar el pelo corto. Si es largo no debe estar suelto sino recogido.
- No vestir joyería, como collares, pulseras o anillos.
- Siempre se deben conocer los controles y funcionamiento del torno. Se debe saber cómo detener su operación.
- Es muy recomendable trabajar en un área bien iluminada que ayude al operador, pero la iluminación no debe ser excesiva para que no cause demasiado resplandor.

CAPÍTULO 2

2. PARÁMETROS A ANALIZAR

2.1. Selección de la herramienta de corte basado en criterios de selección y recomendaciones del fabricante de las herramientas.

Las herramientas de corte deben tener la capacidad de satisfacer las crecientes demandas de productividad y economía. Para esto se debe realizar una adecuada selección de la herramienta de corte, la cual determinara el éxito o fracaso del mecanizado.

Factores de selección

Se debe tomar en cuenta algunos factores para la selección, como son, las propiedades del material a mecanizar, los parámetros de trabajo y el acabado requerido en el proceso.

Propiedades del material

La selección de la herramienta de corte depende mucho del material a mecanizar. Los materiales tienen distintas propiedades que afectan directamente a la herramienta de corte.

Un material con excesiva dureza produce un desgaste abrasivo mayor en la herramienta, de igual manera un material con dureza baja lo hace demasiado dúctil para el maquinado produciendo un pobre acabado y problemas en la eliminación de la viruta.

De igual manera un material con alta resistencia de mecanizado produce altas temperaturas, incrementa las fuerzas de corte y por ende hace más difícil el maquinado.

El carbono forma un papel fundamental en el desempeño del material al ser maquinado. A mayor cantidad de carbono incrementa su dureza y resistencia haciendo más difícil maquinarlo. En estos casos al carbono se le añaden ciertos elementos como fosforo, plomo y azufre, que reducen el coeficiente de fricción entre la viruta y la pieza, la tabla 1.1 muestra la composición del material para esta investigación.

Para la selección de la herramienta es necesario conocer el grado de dureza que tiene el material. La tabla 2.1 muestra la dureza de los diferentes materiales de herramientas.

TABLA 2.1.

RANGO DE DUREZA PARA APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE CORTE

Material de herramienta	Rango de aplicación	
	Dureza mínima del material (RC)	Dureza máxima del material (RC)
Acero rápido	**0**	**35**
Metal Duro	**35**	**50**
Cerámicas	**45**	**60**

Para obtener la dureza del material AISI 4340, se usa un durómetro ubicado en el laboratorio LEMAT de las siguientes características:

MARCA: ROCKWELL WILSON

MODELO: 3YR.

SERIE: 752

CODIGO ESPOL: 2910

Los datos que se obtuvieron en la prueba de dureza (figura 2.1) se la muestra en la tabla 2.2

TABLA 2.2. TABLA DE RESULTADOS DE MEDICIÓN DE DUREZA

PUNTO	MEDIDA
0	27.5 HRC
1 A	26.5 HRC
2 A	27.8 HRC
3 A	28.5 HRC
4 A	29.0 HRC
5 A	27.1 HRC
1 N	26.5 HRC
2 N	27.0 HRC
3 N	28.1 HRC
4 N	27.5 HRC
5 N	27.0 HRC
1 R	26.0 HRC
2 R	26.0 HRC
3 R	27.5 HRC
4 R	29.0 HRC
5 R	27.0 HRC

De los 16 puntos obtenidos en la prueba de dureza, el promedio de dureza para el acero AISI 4340 es de 27.4 HRC equivalente a 267.5HRB.

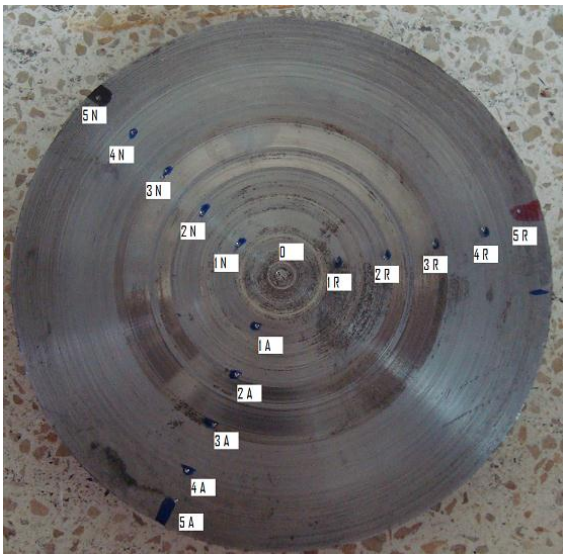


Figura 2.1 Probeta para medición de dureza

Parámetros de trabajo

Los parámetros de corte a usar son otro factor de selección de herramienta de corte. A velocidades y profundidades altas de corte las herramientas con mayor dureza como las cerámicas tienden a fracturarse. Las herramientas como carburos cementados, cerámicos y diamantes son usados en mecanizados a mayores velocidades con respecto a las herramientas de acero rápido, las cuales poseen mayor tenacidad, figura 2.2. Otro factor importante, en el cual influyen los parámetros de corte, es la geometría de la herramienta, especialmente los ángulos característicos así como el radio de punta de la herramienta de corte.

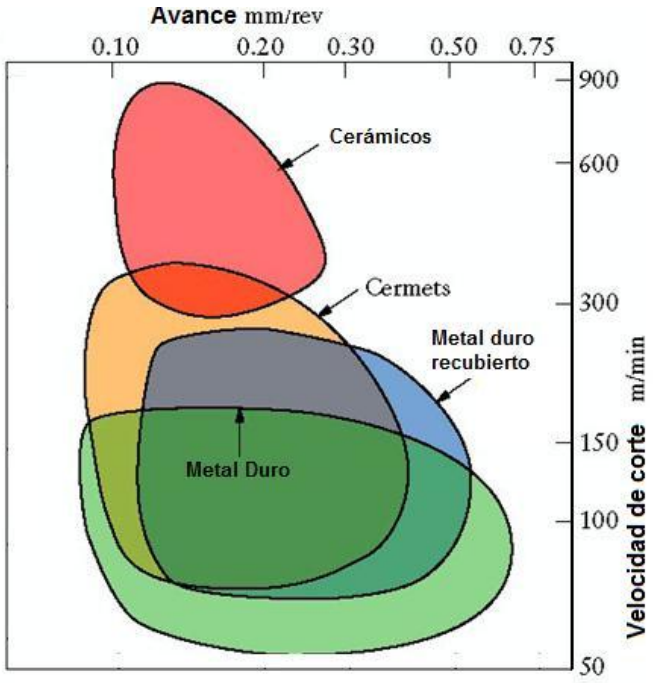


Figura 2.2. Áreas de aplicación de herramientas de corte según sus parámetros de corte

Acabado requerido

Hay herramientas que se requieren para remover material sin importar el acabado pero hay otras herramientas como los metales duros y cerámicos que a mas de ser usados para desbastar también son usados para obtener mejores acabados superficiales, esto se logra a velocidades de corte bajas.

Designación básica de forma y ángulos	R	S 90°	C 80°	W 80°	T 60°	D 55°	V 35°
Desbaste	●	●	●	○	○		
Desbaste ligero/semi-acabado		○	●	●	●	●	
Acabado			○	○	●	●	●
Torneado longitudinal direccion de avance			●	○	○	●	●
Torneado de contornos			○	○	○	●	●
Refrentado	○	●	●	●	○	○	
Operación versatil	○		●	○	○	●	○
Potencia de maquina limitada			○	○	●	●	●
Tendencia de vibraciones				○	●	●	●
Materiales duros	●	●					
Maquinado intermitente	●	●	○	○	○		
Angulos grandes de entrada			●	●	●	●	
Angulos pequeños de entrada	●	●		●	●		

● Más aproiada ○ Apropiada

Figura 2.3. Designación básica de forma y ángulos según un proveedor local.

Selección de las herramientas de corte para el maquinado del acero AISI 4340 basado en recomendaciones del fabricante de la herramienta de corte.

El material a maquinar es el acero AISI 4340, de las pruebas realizadas se obtuvo que la dureza del material sea 267HB, de acuerdo a su composición química se trata de un acero de baja aleación.

Por el grado de dureza de este material y su buena maquinabilidad es recomendable usar insertos de metal duro que demuestran buena eficiencia.

De acuerdo a la tabla 1.7 la herramienta a seleccionar está dentro del tipo P de la nomenclatura de los grados ISO para herramientas de metal duro, ya que es un material de baja aleación y una dureza inferior a los 400 HB.

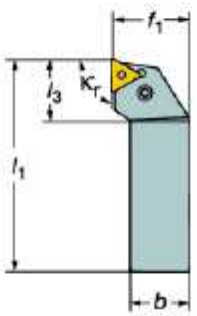
Debido a que el material a maquinar no posee imperfecciones ni discontinuidades y el acero AISI 4340 debido a su tratamiento térmico posee una dureza relativamente alta, se selecciona un grado bajo como el P20.

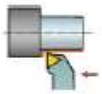
En estas pruebas se realiza desbastes con una profundidad de corte de 2.5 mm si el radio de punta es 0.8mm y profundidad de 1mm cuando el radio de punta es 0.4mm de acuerdo a la norma ASME B94.55M. Tabla 2 del inciso 6.1.

En el laboratorio de ensayos mecánicos se dispone de un portaherramientas, figura 2.4 cuyo código es PTGNR/L 2020K 16 en la cual solo se puede usar insertos de forma triangular.

PTGNR/L

κ_r 91°



κ_r	Aplicación principal		Código de pedido	Dimensiones, mm							
				b	f_1	h	h_1	l_1	l_3	γ[1]	λ_s[2]
91°		16	PTGNR/L 2020K 16	20.0	25.0	20.0	20.0	125.0	20.2	-6°	-6°

1) γ = Ángulo de desprendimiento (válido con plaquita lisa).
2) λ_s = Ángulo de inclinación

Figura 2.4. Dimensiones de portaherramientas PTGNR/L 2020K 16

Por lo anteriormente mencionado y debido a la disponibilidad de las herramientas en el mercado local, se selecciona la primera herramienta TNMG160408-PM GC4225 la cual tiene las siguientes características:

Forma triangular (T), con un ángulo de incidencia de 0° (N), con una tolerancia dimensional ±0.13 para el espesor y ±0.05 para el diámetro del círculo inscrito (M), tiene rompeviruta en ambos lados (G), la longitud de la arista de corte es 16 mm, el espesor del inserto es 4.76mm, tiene un radio de punta de 0.8 mm, y es una herramienta para mecanizado

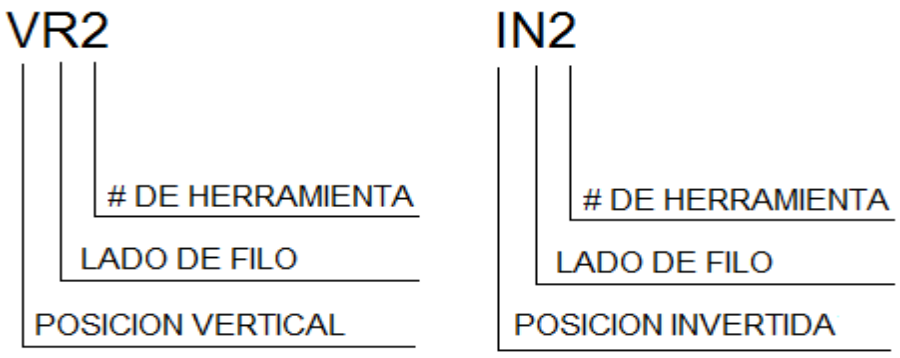
medio, para materiales del tipo P, el grado GC4225 es equivalente a P25 en la escala ISO, con la cual el fabricante recomienda trabajar con profundidades entre 0.5mm y 5mm con un avance entre 0.15mm/rev a 0.5mm/rev.

La segunda herramienta a ser usada en las pruebas es la TNMG160404-PF GC4215, la cual se diferencia de la anterior en que el radio de punta de esta es 0.4mm y además varía el grado. El grado GC4215 es equivalente a P15 en la escala ISO. Para esta herramienta el fabricante recomienda trabajar con profundidades entre 0.25mm y 1.5mm con un avance entre 0.07mm/rev a 0.30mm/rev.

Al escoger 2 grados diferentes se busca obtener cual tiene mayor tiempo de vida para el mecanizado del AISI 4340, ya que el grado ISO P15 presenta mayor dureza y resistencia al desgaste, pero menor tenacidad que el grado ISO P25.

Nomenclatura usada para identificar los filos de las cuchillas.

Las herramientas de corte seleccionadas tienen 6 filos de corte, para la realización de las pruebas se están asignando códigos para cada filo con la siguiente nomenclatura:



La numeración 1, 2, 3, indica el numero de la herramienta usada. Mientras que en el lado de filo se asigno tres letras del abecedario aleatorias R, N, A, y por último la primera letra indica la posición de la herramienta, sea vertical (V) o invertida (I). Esta nomenclatura es usada para ambas herramientas. Ver figura 2.5

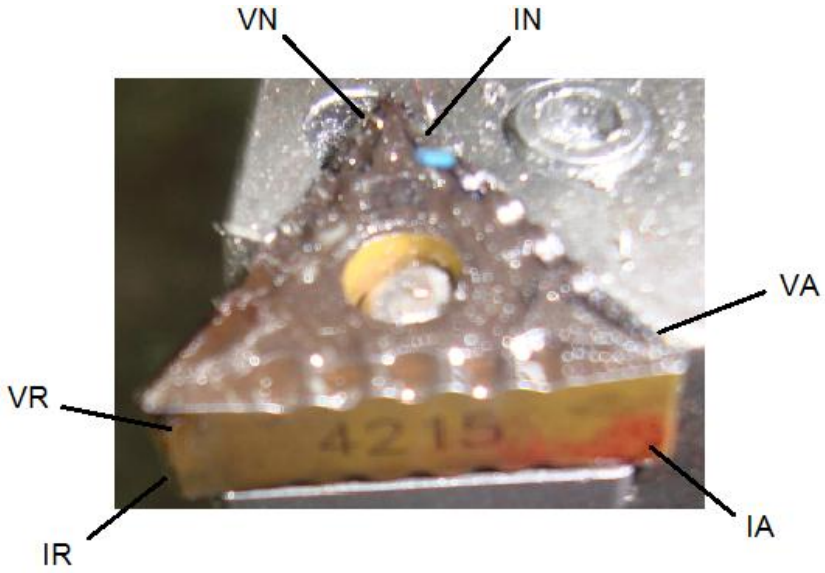


Figura 2.5 Nomenclatura asignada a un herramienta de corte

2.2. Parámetros de corte a analizar.

Velocidad de corte.

De acuerdo a la norma ASME B94.55M 6.1 tabla 2, dos condiciones estándar para las pruebas de las herramientas variando la velocidad de corte son:

- Radio de punta de la herramienta 0.8mm, profundidad de corte 2.5mm y el avance 0.25mm/rev.
- Radio de punta de la herramienta 0.4mm, profundidad de corte 1mm y el avance 0.1mm/rev.

Para estas condiciones estándar, se varia la velocidad de corte con intervalos de acuerdo a la serie recomendada por la norma ASME 94.55M 6.3, tabla 4.

Las velocidades de corte de prueba para la herramienta TNMG160404-PM GC4225 son 224, 250, 265 y 280 m/min y para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 son 330, 360, 380 y 400 m/min.

Avance.

Para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 la velocidad de corte y la profundidad se mantienen constantes en 360 m/min y 1 mm respectivamente, variando las pruebas para los siguientes avances 0.1, 0.2, 0.25 mm/rev, con el fin de conocer el efecto del avance en el proceso de corte del AISI 4340.

Profundidad de corte.

Para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 la velocidad de corte y el avance permanecen constantes en 360 m/min y 0.1mm/rev respectivamente, variando las pruebas para los siguientes profundidades 1, 1.25, 1.5 mm, con el fin de conocer el efecto de la profundidad de corte en el proceso de mecanizado del AISI 4340.

2.3. Criterios de desgaste.

Existen varios criterios que se usan para predecir el tiempo de utilidad de la herramienta, y se los detallan a continuación:

- Falla completa del filo de corte.
- Variación de sonido en la máquina herramienta debido al maquinado.
- Cambios en la formación de la viruta.
- Degradación en el acabado superficial en la pieza trabajada.
- Cambio en la potencia de la máquina herramienta.
- Agrietamiento en la superficie de desprendimiento, también llamado craterización.
- Desgaste en la superficie de incidencia.
- Tiempo acumulado de corte.
- Aumento de la vibración.

De acuerdo a la norma ASME B94.55M inciso 7.1.2 y al fabricante de las herramientas, los principales criterios de desgaste para herramientas de metal duro y de acero rápido son:

- Desgaste en el flanco.
- Desgaste por craterización.

Para estudio de esta tesina se va a tomar como criterios de desgastes los dos últimos mencionados.

2.3.1. Desgaste del flanco V_B

El promedio del ancho de desgaste del flanco o filo de corte (V_B) debe ser igual a 0.3 mm, siempre que se mida el desgaste regular en la zona B como se muestra en la figura 2.5.

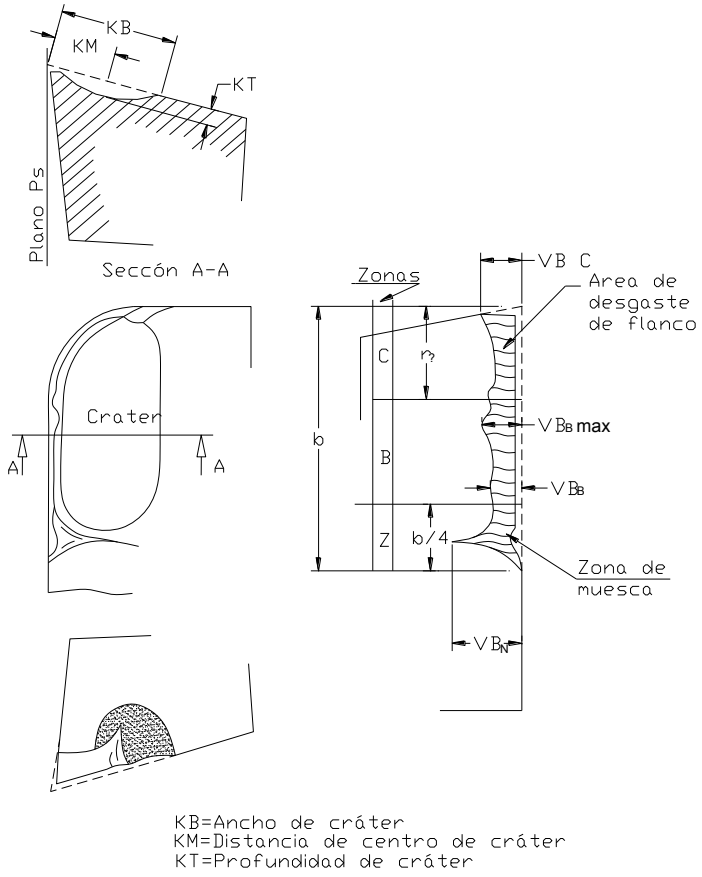


Figura 2.6 Tipos de desgaste en herramientas[7]

[7] Referencia "ASME B94.55M Fig. 8"

Según la misma norma para estos 2 tipos de herramienta otro limitante del tiempo de vida de la herramienta es el máximo ancho de desgaste en el flanco (V_{Bmax}), mediante el cual se considera desgastada la herramienta cuando es igual o mayor a 0.6mm, siempre que el desgaste no sea regular en la zona B.

2.3.2. Profundidad de cráter

Para las herramientas de metal duro la profundidad de cráter (KT) es otro criterio recomendado, en el cual no debe exceder el límite dado en la ecuación siguiente:

$$KT = 0.06 + 0.3 * f \qquad \text{(Ec. 2.1)}$$

Donde KT es la profundidad de cráter (mm), f es la velocidad de avance (mm/rev).

2.4. Medición y evaluación de los criterios de desgaste

2.4.1. Medición del desgaste en el flanco usando un microscopio

La formación de desgaste resulta en la superficie de incidencia y es debida al rozamiento entre la superficie de la pieza ya mecanizada y la cara de incidencia adyacente al borde de corte. Este desgaste se lo mide por el ancho de la banda de desgaste y se lo puede medir con un micrómetro o con un microscopio como es el caso para esta tesina, donde se usó un microscopio

metalografico modelo OLYMPUS con aumento de 32X situado en el Laboratorio de Materiales de la ESPOL. Se toman fotografías del filo desgastado con una cámara digital con una resolución de 7 mega pixeles, para luego ser medidas en una computadora con la ayuda de un programa desarrollado en Matlab. La figura 2.7 muestra un ejemplo de la forma de desgaste en el flanco.

Figura 2.7 Desgaste en el flanco.

2.4.2. Medición de la profundidad de cráter usando un palpador

Esta resulta de la fricción que hay entre la viruta y la herramienta en la superficie de ataque en el momento que la viruta se desliza sobre la superficie. Este desgaste forma un pequeño cráter sobre la superficie, figura 2.8, que puede ser medido ya sea por el área o por la profundidad del mismo. Para la medición de profundidad se usó un palpador, marca SIGMA, modelo 201-03.

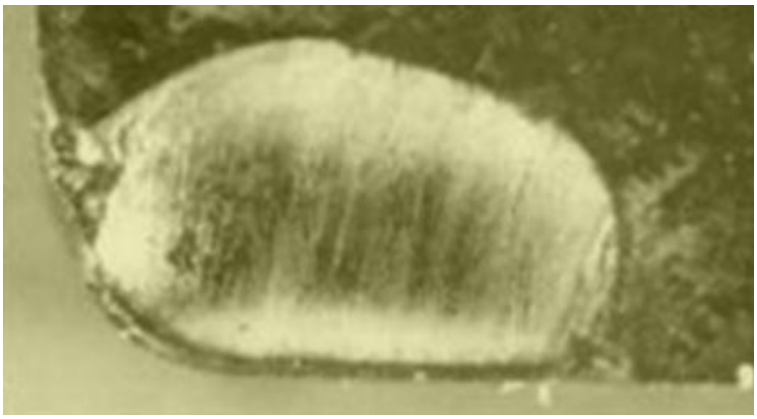


Figura 2.8 Desgaste por craterización

2.4.3. Evaluación experimental

Para el experimento se usa barra cilíndrica de acero aleado AISI 4340 de diámetro 101 mm. Se mide la dureza del material usando un durómetro, las mediciones se realizan en una probeta de 2cm de longitud en varios diámetros del material y a varios ángulos (figura 2.1), además de tomar microfotografías del material en el rango de 100 a 500x con un microscopio (figura 1.4).

Para el maquinado se usa un torno CNC, marca Dalian Machine Tool Group, modelo DMTG:CKE6136Z, serie HG00876.

Se procede a mecanizar el acero AISI 4340 con las 2 herramientas seleccionadas para la experimentación de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de las herramientas de corte y a la

disponibilidad en el mercado local, buscando la geometría y material que demuestre mayor tiempo de vida y de acuerdo a los criterios de selección debería reemplazar a las herramientas tradicionales.

En esta experimentación se varía la velocidad de corte, el cual se ha demostrado ser el más influyente en el desgaste de la herramienta, el avance y la profundidad de corte se mantendrán constantes durante las pruebas, se tomarán al menos 4 mediciones para cada herramienta de acuerdo a la norma ASME B94.55M 9.

Para el maquinado se usan barras cilíndricas de 40cm de largo y 10cm de diámetro, con lo cual se cumple el requerimiento de la norma ASME 94.55M 3.2 el cuál limita la relación longitud/diámetro con un máximo valor de 10 para obtener buenos resultados.

Se debe tener cuidado al momento de realizar las mediciones de desgaste, debido a que partículas de material se pueden adherir a la superficie de la herramienta las cuales pueden aparentar un mayor desgaste o incrustarse en los cráteres resultando en menores valores de KT.

Se considera la zona B como la zona fuera de la curvatura de la herramienta (zona C) y fuera de la cuarta parte de la longitud de zona desgastada más lejana de la esquina de la herramienta (zona N), como se muestra en la figura 2.5 y se medirá el desgaste de flanco desde el filo original de la herramienta en el plano Ps (ver figura 2.5) y la profundidad de cráter debe ser medida desde la cara original de la herramienta, hasta el fondo del cráter.

Se debe crear un código para programar el torno CNC de tal manera que en cada herramienta probada se mantengan los parámetros de corte especificados en el inciso 2.2.

Para acelerar el proceso de desgaste y poder tomar la mayor cantidad de datos las pruebas se realizan sin usar lubricantes como es recomendado por la norma ASME B94.55M inciso 5.1.2, ya que es una operación simple de cilindrado y se puede evitar el uso de líquidos lubro-refrigerantes debido a que no son reciclables y tienen un costo adicional. Se mide y se registra el tiempo de cada desbaste y se acumula si se trata de una misma herramienta.

Cada vez que se toma la medición del desgaste de la herramienta también se debe medir el diámetro exterior de la pieza maquinada,

además de tomar una fotografía de la herramienta para evidenciar el proceso de desgaste.

Se toma muestra de la viruta obtenida en cada pasada para evaluarla y evidenciarla fotográficamente, ya que esto es un indicativo de cuán efectiva es la herramienta de corte y debido a su color se puede identificar a qué nivel de temperatura están sometidas las herramientas.

2.4.4. Procedimiento experimental

1. Comprobar que la máquina funciona correctamente y se encuentra dentro de los límites recomendados.

Figura 2.9 Preparación del Torno CNC

2. Fijar correctamente la pieza, evitando ocasionar deflexión en la barra, para lo cual se debe refrentar y hacer un agujero (centro) en ambas caras de la pieza para poder fijarla entre puntos.

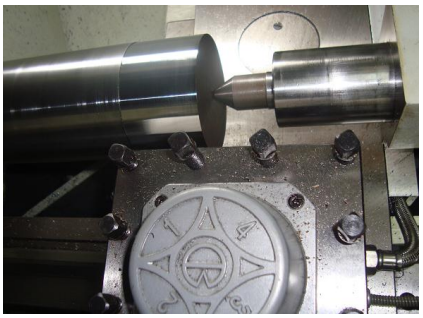


Figura 2.10 Fijación de la herramienta entre puntos.

3. Revisar que la superficie del material a maquinar no contenga imperfecciones y realizar un pre-maquinado de limpieza con una herramienta que no se usará en las pruebas, identificar un filo de corte de la herramienta para cada velocidad de corte. Tomar imagen de referencia del filo de corte de la herramienta antes de comenzar el maquinado.

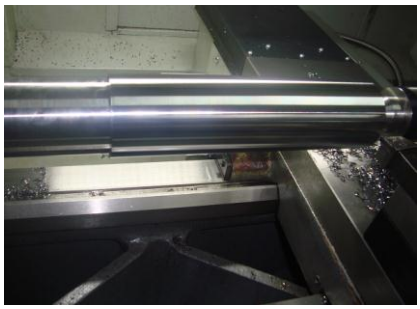


Figura 2.11 Chequear que el material este sin imperfecciones

4. Montar correctamente el inserto en el portaherramientas y luego comprobar el adecuado posicionamiento de la herramienta, es decir se debe hacer que la esquina de la herramienta de corte coincida con el centro de la pieza y luego comprobar que el portaherramientas se encuentre perpendicular con el centro de rotación de la pieza a maquinar.

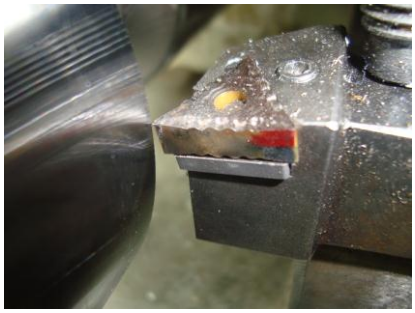


Figura 2.12 Posición de la herramienta junto al material.

5. Digitar el programa en el torno CNC correspondiente para las dimensiones de la pieza a maquinar y a los parámetros de corte a evaluar.

Figura 2.13. Programación de código CNC

6. Preparar y comprobar que el cronómetro se encuentre encerado para cada prueba.
7. Empezar el maquinado y tomar el tiempo mientras la cuchilla se encuentra en contacto con la pieza, y registrar los valores en la hoja de datos.

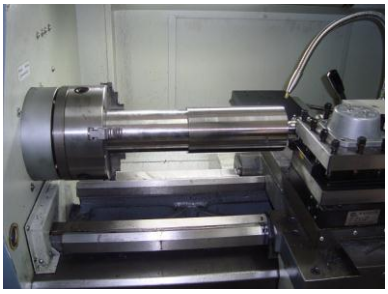


Figura 2.14. Proceso de mecanizado.

8. Desmontar la herramienta, limpiarla y medir el desgaste del flanco con el microscopio así como la profundidad de cráter con el palpador, medir las dimensiones de la pieza maquinada con un micrómetro y registrar estos valores en la hoja de datos, tomar fotografía de la pieza , de la viruta obtenida y de la herramienta de corte.

Figura 2.15. Revisión de desgaste en microscopio.

9. Realizar los pasos del 4 al 8 hasta que se sobrepase el límite de los criterios de desgaste, tomando en consideración que cuando se llegue a una relación longitud/diámetro de 10 de la pieza se deberá repetir los pasos 2 y 3.
10. Cuando se sobrepase el límite de los criterios usados, se deberá cambiar por una nueva herramienta, y fijar nuevos parámetros de corte y repetir los pasos del 4 al 9.
11. Realizar los pasos del 2 al 10 para la segunda herramienta de corte seleccionada.

CAPÍTULO 3

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Presentación de las curvas de pruebas obtenidas, desgaste vs tiempo, tiempo de vida de herramienta vs velocidad de corte, para ambas herramientas

A continuación se presentan los datos y curvas obtenidas de las pruebas realizadas, en las que se tomaron medidas de desgaste del flanco, no fue posible tomar las mediciones de profundidad de cráter debido a que las herramientas no presentan cráteres durante el tiempo de maquinado, como se puede observar en la figura 3.1.

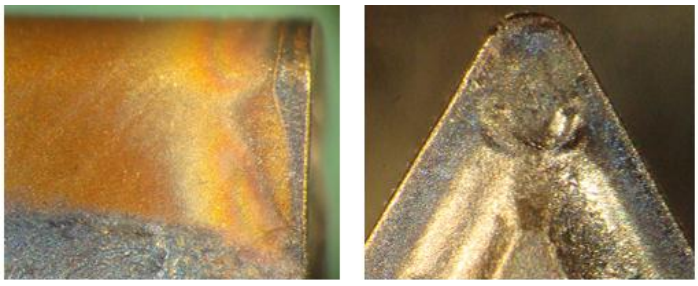


Figura 3.1 Fotografía de herramienta TNMG 160408-PM GC 4225, después de alcanzar el límite de desgaste de flanco

3.1.1. Variación de la velocidad de corte para la herramienta TNMG160408-PM GC4225

Manteniendo constante el avance de corte y la profundidad de corte se presentan las curvas de desgaste vs tiempo para Herramienta TNMG160408-PM GC4225

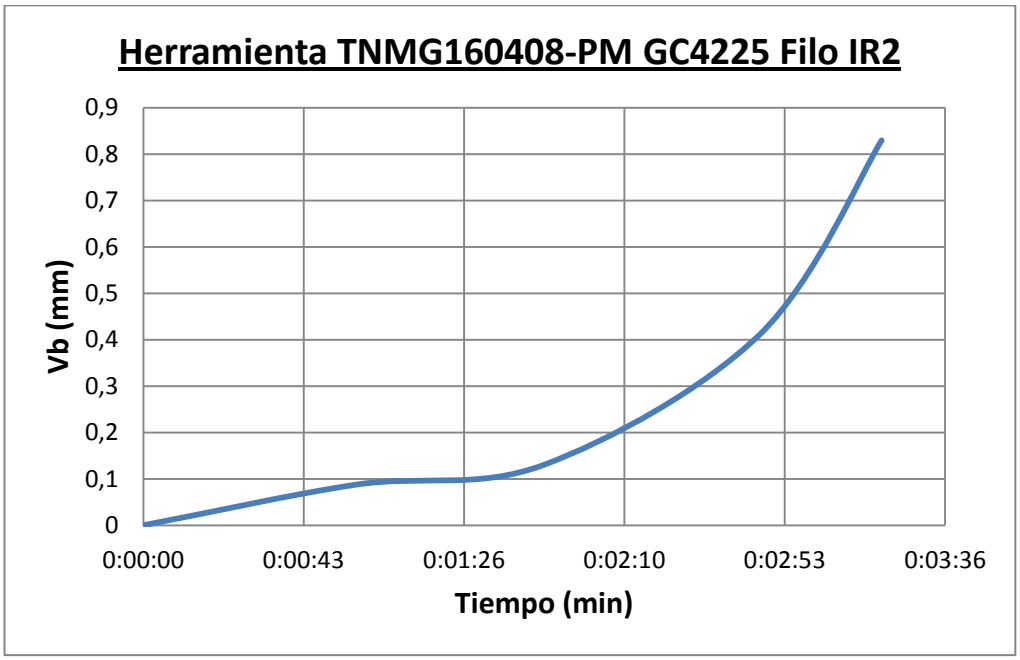


Figura 3.2. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 280 m/min

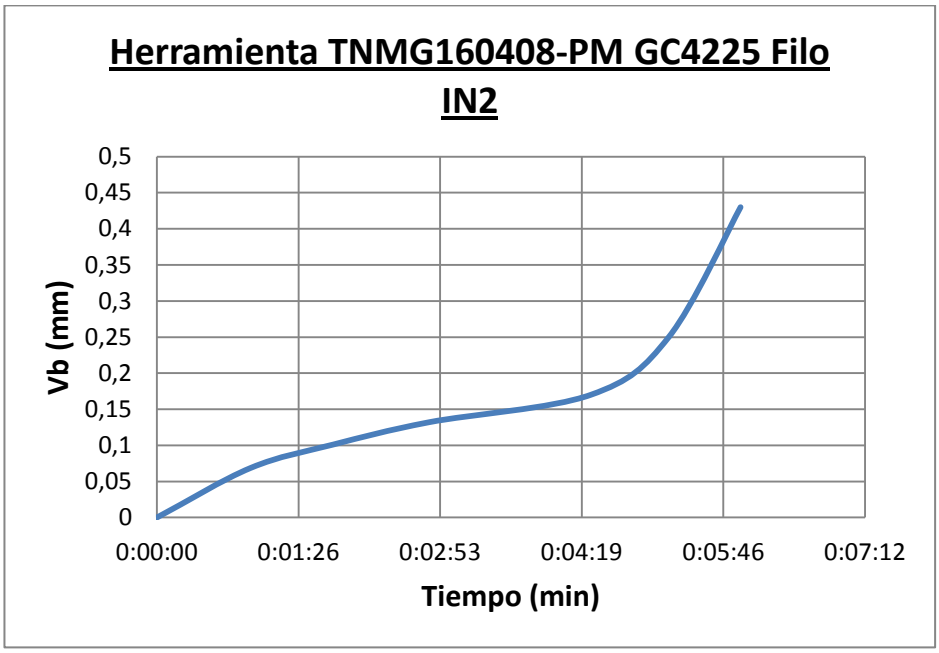


Figura 3.3. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 265 m/min

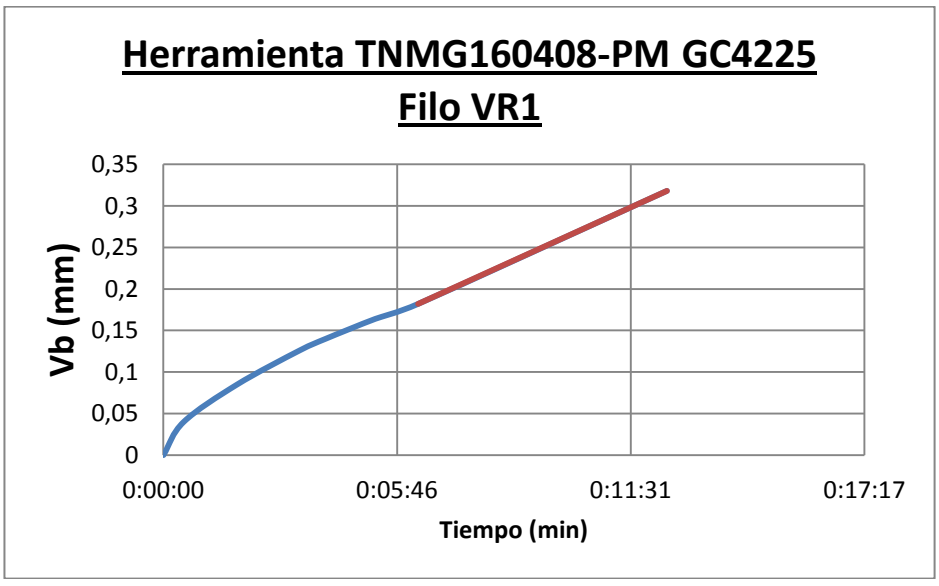


Figura 3.4. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 250 m/min

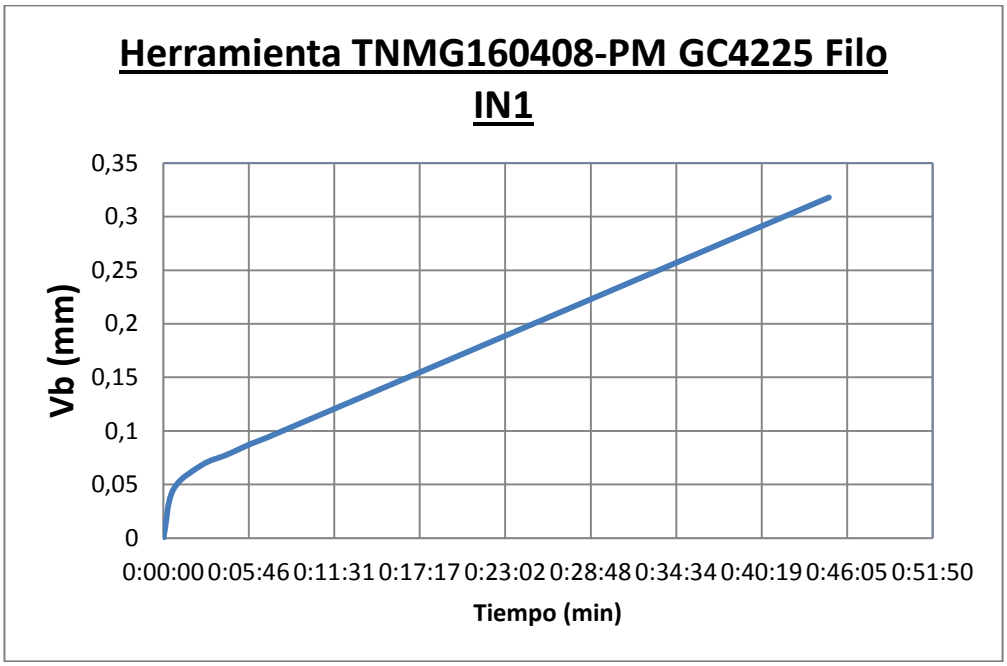


Figura 3.5. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160408-PM GC4225, velocidad de corte 224 m/min

3.1.2. Variación de la velocidad de corte para la herramienta TNMG160404-PF GC4215

Se presentan las curvas de desgaste vs tiempo para Herramienta TNMG160404-PF GC4215

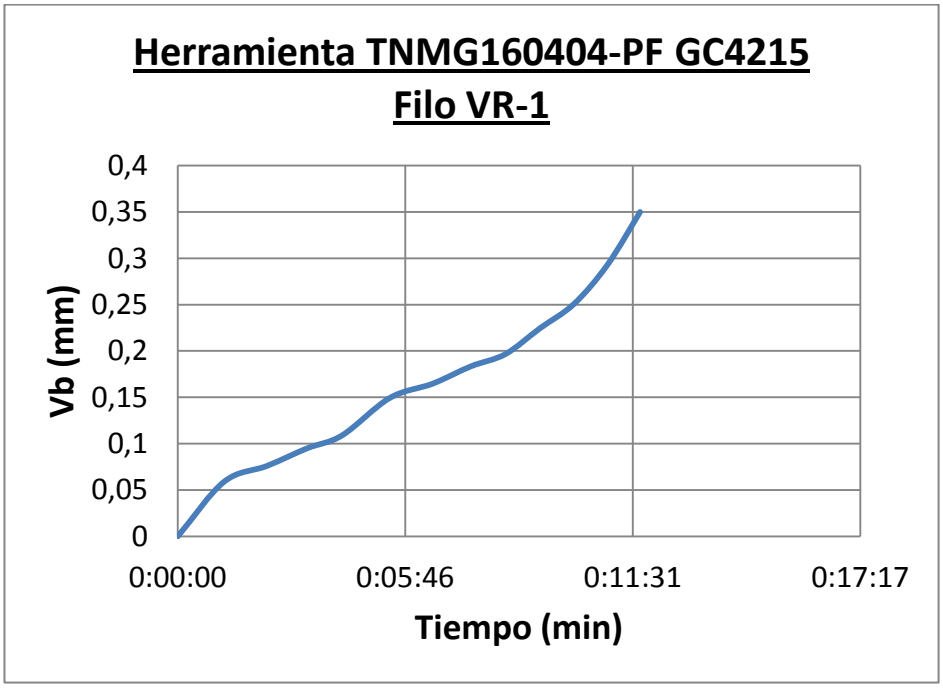


Figura 3.6. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 400 m/min

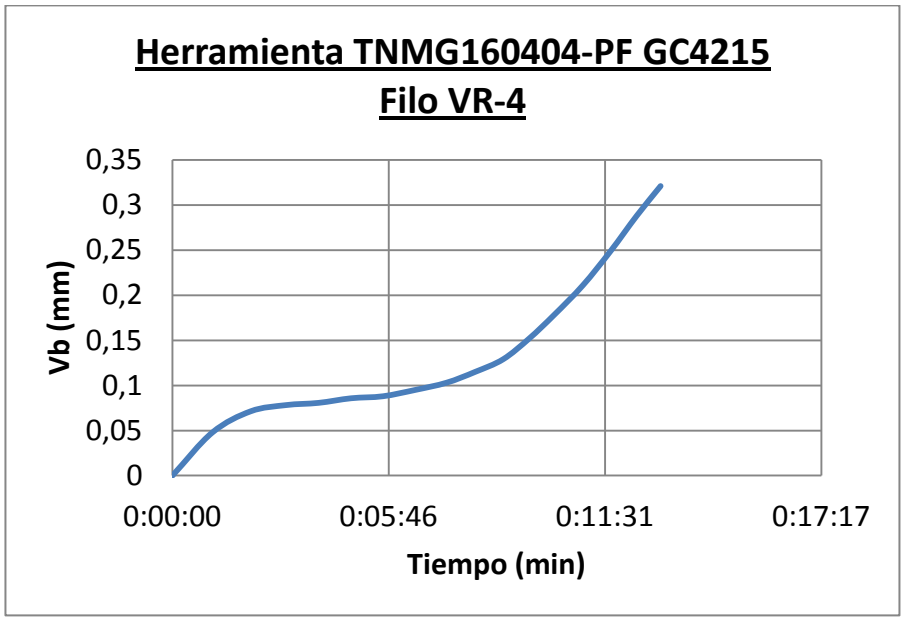


Figura 3.7. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 380 m/min

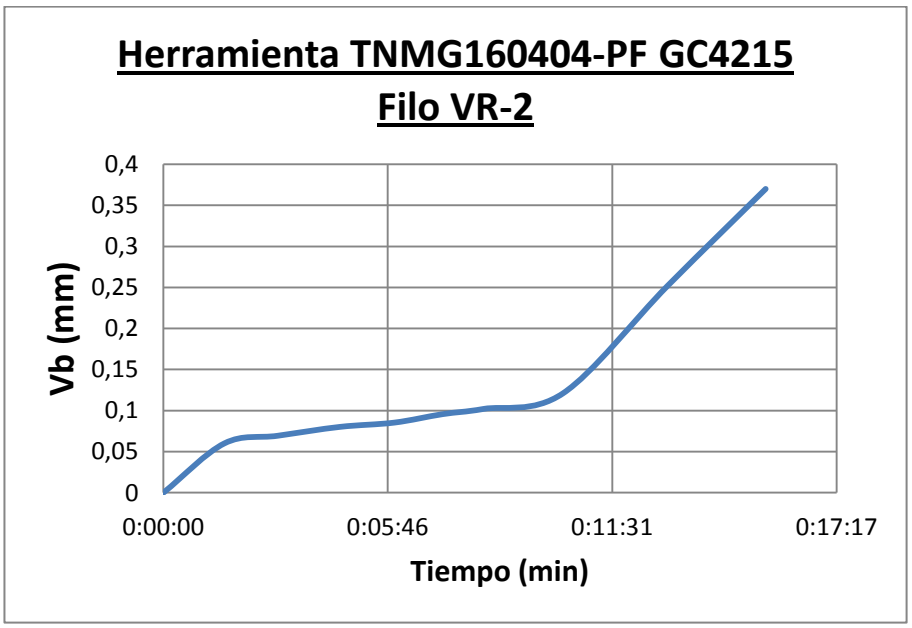


Figura 3.8 Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 360 m/min

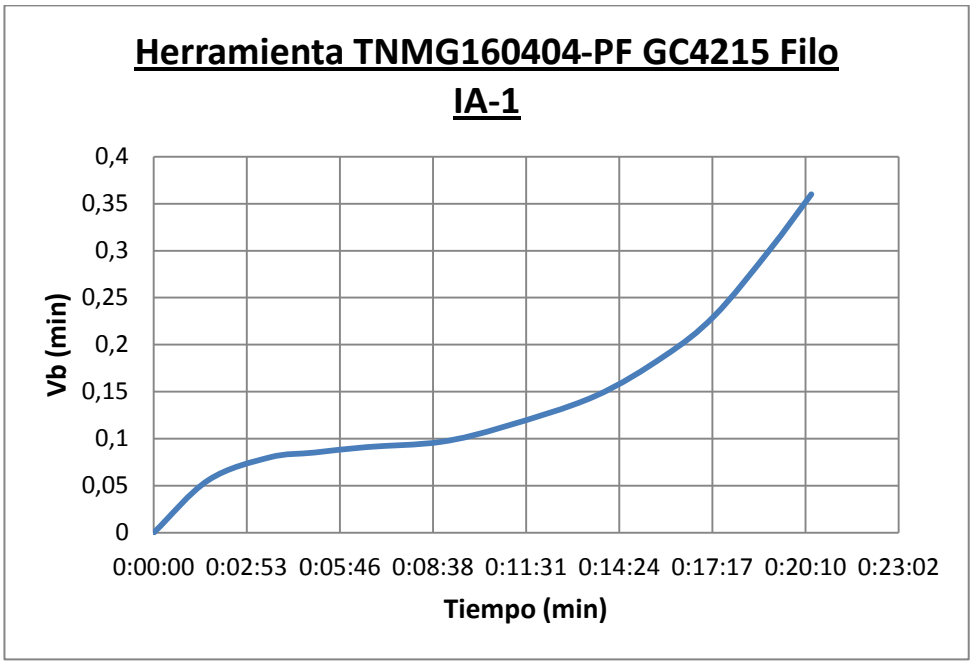


Figura 3.9 Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, velocidad de corte 330 m/min

3.1.3. Variación de la profundidad de corte para la herramienta TNMG160404-PF GC4215

Se presentan la curva de desgaste vs tiempo para Herramienta TNMG160404-PF GC4215, variando la profundidad de corte.

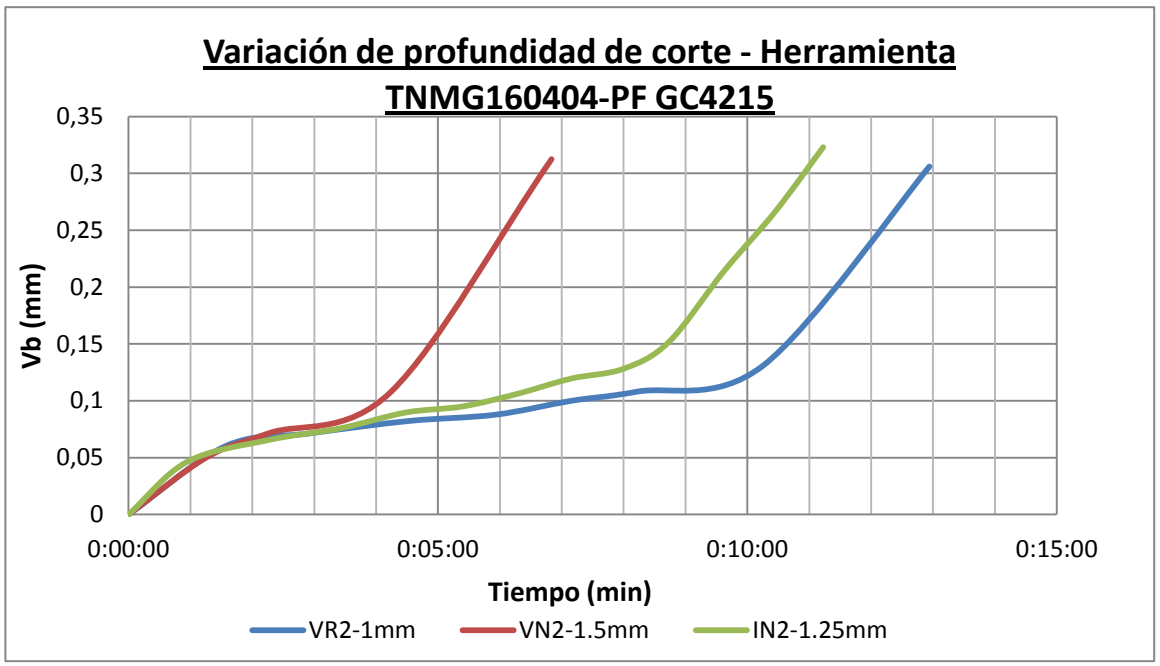


Figura 3.10. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, a velocidad de corte 360 m/min, con variación de profundidad de corte

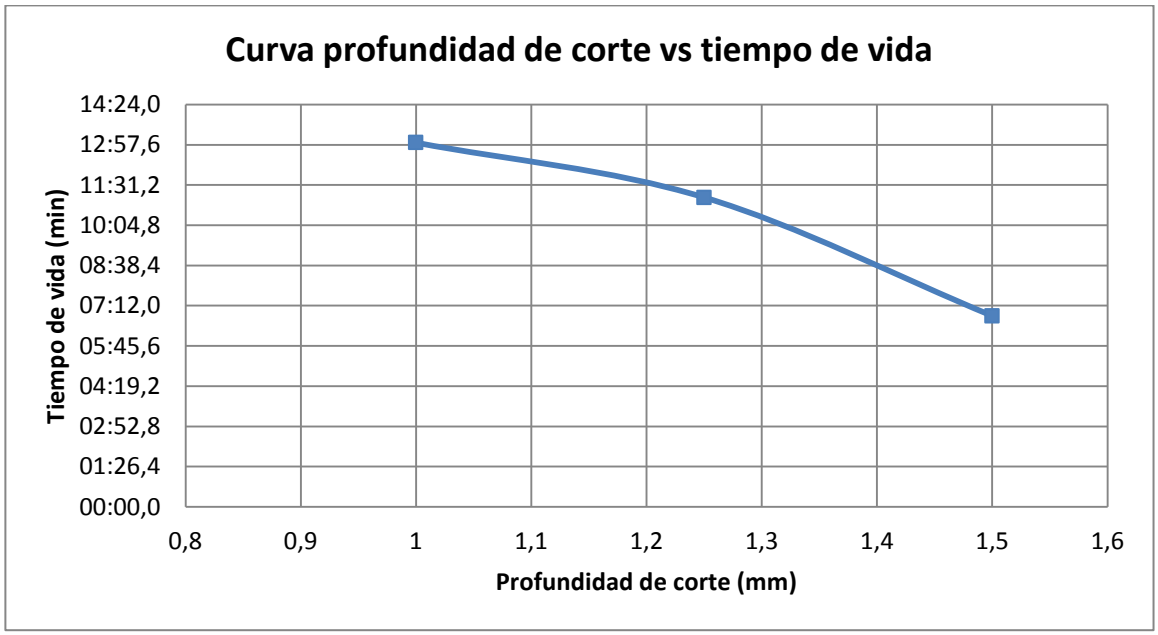


Figura 3.11. Curva tiempo vs profundidad de corte que predice el tiempo de desgaste a diferentes profundidades de corte para herramienta TNMG160404-PF GC4215 con velocidad de corte de 360 m/min

3.1.4. Variación del avance para la herramienta TNMG160404-PF GC4215

Variando el avance y manteniendo constante la profundidad de corte y la velocidad de corte se obtiene la siguiente curva de desgaste vs tiempo para Herramienta TNMG160404-PF GC4215.

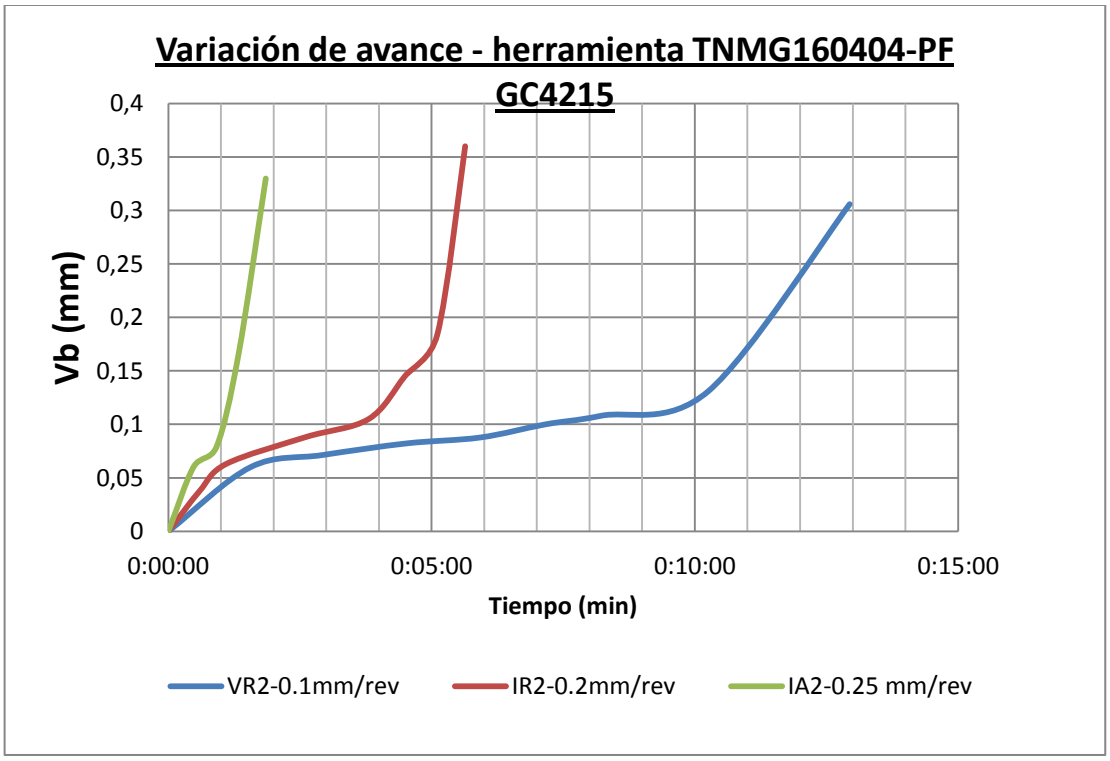


Figura 3.12. Curva tiempo vs desgaste de flanco para herramienta TNMG160404-PF GC4215, a velocidad de corte 360 m/min, con variación de avance de corte

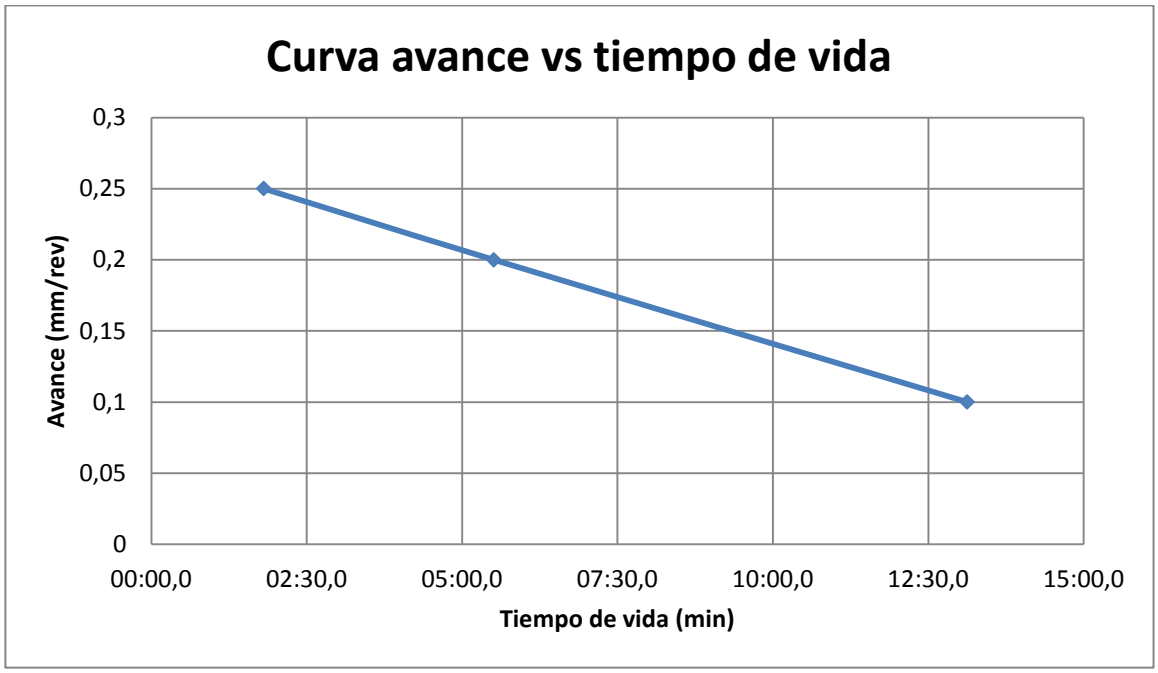


Figura 3.13. Curva tiempo vs avance de corte que predice el tiempo de desgaste a diferentes avances de corte para herramienta TNMG160404-PF GC4215 con velocidad de corte de 360 m/min

3.2. Realizar una regresión lineal que permita predecir la vida de la herramienta

Se realiza regresión lineal para predecir la vida de la herramienta de corte TNMG160408-PM GC4225, ajustando los datos experimentales a la ecuación de Taylor.

Si se aplica logaritmo a ambos miembros de la ecuación de Taylor se obtiene la ecuación de una recta, por lo que se puede aplicar una regresión lineal para encontrar el valor de las constantes.

$$VT^n = C$$

$$Log\ V + n.logR = logC$$

$$Si, y = logT;\ \ x = logV;\ \ k = -1/n$$

$$y = a + k(x - \bar{x})$$

TABLA 3.1.

TABLA DE CÁLCULO DE LA REGRESIÓN LINEAL PARA HALLAR LA ECUACIÓN DE TAYLOR DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225

Filo	Velocidad corte (V)	Tiempo de vida (T)	x=logV	y=logT		xy	x^2	y^2
IN1	224	44,80	2,350	1,651		3,881	5,524	2,727
VR1	250	12,40	2,398	1,093		2,622	5,750	1,196
IN2	265	5,55	2,423	0,744		1,804	5,872	0,554
IR2	280	2,57	2,447	0,410		1,002	5,989	0,168
		ΣX	9,619	ΣY	3,899	9,309	23,134	4,644
ne	4	$(\Sigma X)^2$	92,517	ΣX.ΣY	37,499			
		$(\Sigma X)^2/ne$	23,129	(ΣX.ΣY)/ne	9,375			

Procedimiento de cálculo de la regresión lineal:

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{ne} = 2.405$$

$$a = \bar{y} = \frac{\Sigma y}{ne} = 0.975$$

$$k = \frac{\Sigma xy - \Sigma x.\Sigma y/ne}{\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/ne} = -12.78$$

$$n = -\frac{1}{k} = 0.078$$

$$logC = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{k} = 2.481$$

$$C = 302.63$$

La ecuación para predecir el tiempo de vida de la herramienta TNMG160408-PM GC4225 es: $VT^{0.078}$=302.63

Para predecir la vida de la herramienta de corte TNMG160404-PF GC4215, ajustando los datos experimentales a la ecuación de Taylor, se realiza el mismo procedimiento anterior obteniendo los resultados mostrados en la tabla 3.2.

TABLA 3.2

TABLA DE CÁLCULO DE LA REGRESIÓN LINEAL PARA HALLAR LA ECUACIÓN DE TAYLOR DE LA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215

Filo	Velocidad corte (V)	Tiempo de vida (T)	x=logV	y=logT		xy	x^2	y^2
VR3	400	11.15	2.602	1.047		2.725	6.771	1.097
VR4	380	12.79	2.580	1.107		2.855	6.655	1.225
VR2	360	14.22	2.556	1.153		2.947	6.535	1.329
IA-1	330	19.29	2.519	1.285		3.237	6.343	1.652
		ΣX	10.257	ΣY	4.592	11.765	26.304	5.303
ne	4	$(\Sigma X)^2$	105.199	ΣX.ΣY	47.104			
		$(\Sigma X)^2/ne$	26.300	(ΣX.ΣY)/ne	11.776			

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x}{ne} = 2.564$$

$$a = \bar{y} = \frac{\Sigma y}{ne} = 1.148$$

$$k = \frac{\Sigma xy - \Sigma x.\Sigma y/ne}{\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/ne} = -2.813$$

$$n = -\frac{1}{k} = 0.355$$

$$logC = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{k} = 2.972$$

$$C = 938.17$$

La ecuación para predecir el tiempo de vida de la herramienta TNMG160404-PF GC4215 es: $VT^{0.355}=938.17$

3.3. Desarrollo de las curvas usando una herramienta computacional MATLAB

Se crea un código en MATLAB para realizar la curva tiempo de vida vs velocidad de corte para la herramienta TNMG160408-PM GC4225:

```
V=[400 380 360 330];
T=[11.15 12.79 14.22 19.29];
c = polyfit(log(V),log(T),1);
c1=log(V);
c2 = polyval(c,c1);
loglog(exp(c1),exp(c2))
hold on
loglog(V,T,'--bo')
TITLE(''),xlabel('Velocidad de Corte (m/min)'), ylabel('Tiempo de Vida (min)')
grid
```

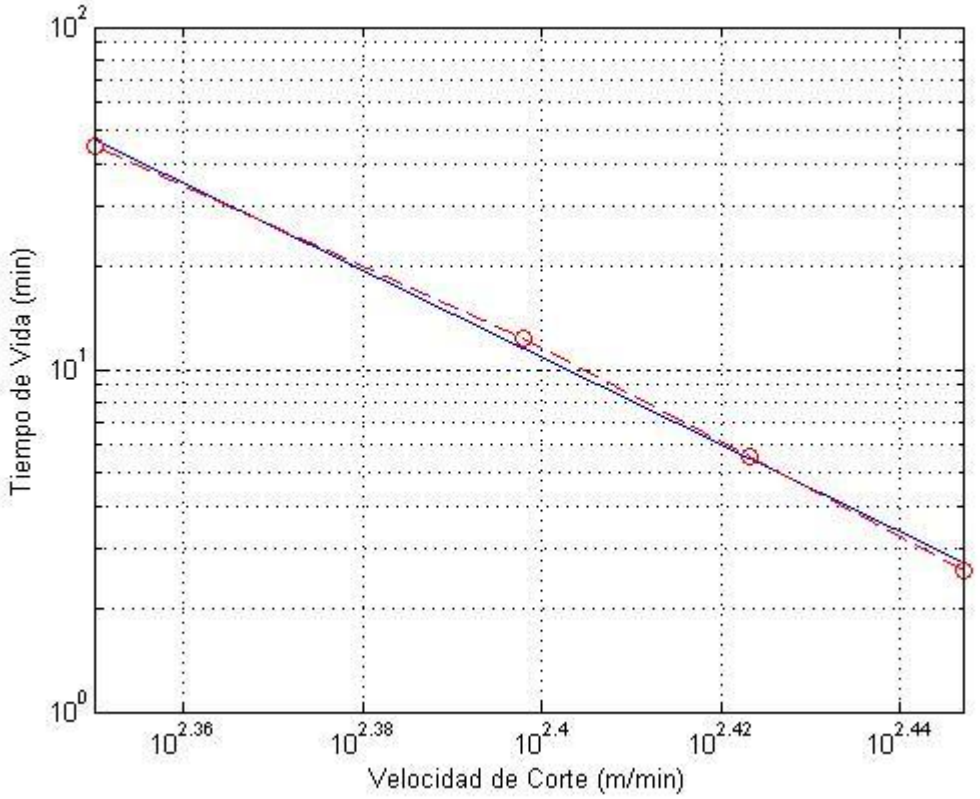


Figura 3.14. Curva Velocidad de corte vs tiempo de vida en escala logarítmica de ambos ejes para la herramienta TNMG160408-PM GC4225 en MATLAB

Código en MATLAB para realizar la grafica de la curva tiempo de vida vs velocidad de corte para la herramienta TNMG160404-PF GC4215:

```
V=[224 250 265 280];
T=[44.80 12.40 5.55 2.57];
c = polyfit(log(V),log(T),1);
c1=log(V);
c2 = polyval(c,c1);
loglog(exp(c1),exp(c2))
hold on
loglog(V,T,'--bo')
TITLE(''),xlabel('Velocidad de Corte (m/min)'), ylabel('Tiempo de Vida (min)')
grid
```

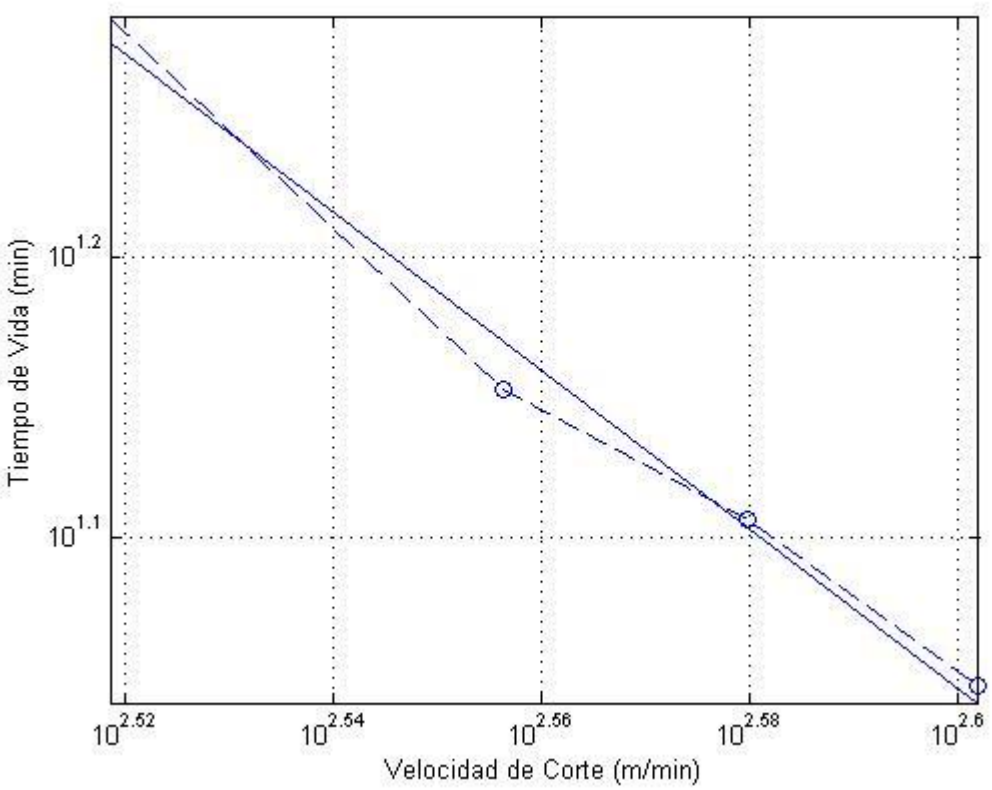


Figura 3.15. Curva Velocidad de corte vs tiempo de vida en escala logarítmica de ambos ejes para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 en MATLAB

3.4. Presentación de tablas medidas en los experimentos realizados.

Tablas de datos obtenidas de las pruebas para la Herramienta TNMG160408-PM GC4225, variando la velocidad de corte.

TABLA 3.3.

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225, VELOCIDAD DE CORTE 280 M/MIN.

Herramienta TNMG160408-PM GC4225		**Filo** IR2		
Velocidad de corte		280	m/min	
Profundidad de corte		2,5	mm	
Avance		0,25	mm/rev	
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Vbmax**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**mm**	**Min**
	0	**0**	**0**	**0**
1	00:57,2	0,0875	0,0875	00:57,2
2	00:50,6	0,13	0,125	01:47,8
3	00:58,1	0,41	0,58	02:45,9
4	00:33,0	0,83	1,12	03:18,9

TABLA 3.4.

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225, VELOCIDAD DE CORTE 265 M/MIN

Herramienta TNMG160408-PM GC4225		**Filo** IN2		
Velocidad de corte		265	m/min	
Profundidad de corte		2,5	mm	
Avance		0,25	mm/rev	
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Vbmax**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**mm**	**Min**
1	00:57,3	0,0688	0,0688	00:57,3
2	00:50,1	0,101	0,175	01:47,4
3	00:58,6	0,132	0,182	02:46,0
4	01:38,7	0,17	0,185	04:24,7
5	00:47,6	0,25	0,362	05:12,3
6	00:43,8	0,43	0,93	05:56,1

TABLA 3.5.

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225, VELOCIDAD DE CORTE 250 M/MIN

Herramienta TNMG160408-PM GC4225		Filo VR1		
Velocidad de corte		250	m/min	
Profundidad de corte		2,5	mm	
Avance		0,25	mm/rev	
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Vbmax**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**mm**	**Min**
1	00:30,0	0,04	0,04	00:30,0
2	01:19,0	0,085	0,07	01:49,0
3	01:32,5	0,126	0,133	03:21,5
4	00:38,4	0,14	0,181	03:59,9
5	01:13,5	0,164	0,188	05:13,4
6	01:03,3	0,182	0,189	06:16,7
7	06:08,0	0,318		12:24,7

TABLA 3.6.

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225, VELOCIDAD DE CORTE 224 M/MIN

Herramienta TNMG160408-PM GC4225		**Filo** IN1		
Velocidad de corte		224	m/min	
Profundidad de corte		2,5	mm	
Avance		0,25	mm/rev	
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Vbmax**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**mm**	**Min**
1	00:39,1	0,045	0,05	00:39,1
2	01:55,0	0,068	0,062	02:34,1
3	01:34,0	0,077	0,085	04:08,1
4	00:41,1	0,0812	0,101	04:49,2
5	01:09,5	0,0885	0,1125	05:58,7
6	01:00,0	0,0938	0,113	06:58,7
7	37:52,9	0,318		44:51,6

Tablas de datos obtenidas para la Herramienta TNMG160404-PF GC4215, variando la velocidad de corte.

TABLA 3.7

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 400 M/MIN

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VR-3	
Velocidad de corte		400	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	01:10.4	0.059	01:10.4
2	01:05.1	0.076	02:15.5
3	01:01.1	0.095	03:16.6
4	00:53.2	0.109	04:09.8
5	01:12.2	0.149	05:22.0
6	01:05.1	0.165	06:27.1
7	00:58.0	0.183	07:25.1
8	00:52.4	0.197	08:17.5
9	00:52.1	0.2242	09:09.6
10	00:52.0	0.2507	10:01.7
11	00:51.0	0.2930	10:52.7
12	00:49.5	0.3500	11:42.2

TABLA 3.8

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 380 M/MIN

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VR-4	
Velocidad de corte		380	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	01:04.0	0.048	01:04.0
2	01:01.2	0.071	02:05.2
3	00:56.3	0.078	03:01.5
4	00:52.1	0.081	03:53.6
5	00:51.7	0.086	04:45.3
6	00:51.2	0.088	05:36.5
7	00:51.5	0.095	06:28.0
8	00:50.0	0.103	07:18.0
9	00:45.8	0.115	08:03.8
10	00:44.7	0.129	08:48.5
11	00:41.6	0.152	09:30.1
12	00:39.6	0.178	10:09.7
13	00:46.2	0.211	10:55.9
14	00:44.3	0.249	11:40.2
15	00:41.6	0.288	12:21.8
16	00:38.2	0.321	13:00.0

TABLA 3.9

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215,

VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VR-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
1	01:33.8	0.06	01:33.8
2	01:22.0	0.0693	02:55.8
3	01:36.0	0.0801	04:31.8
4	01:23.7	0.0853	05:55.5
5	01:14.4	0.0956	07:09.8
6	01:03.3	0.102	08:13.2
7	02:02.3	0.121	10:15.5
8	02:41.1	0.252	12:56.7
9	02:31.0	0.37	15:27.7

TABLA 3.10

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215,

VELOCIDAD DE CORTE 330 M/MIN

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO IA-1	
Velocidad de corte		330	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
1	01:41.6	0.056	01:41.6
2	01:53.2	0.0801	03:34.8
3	01:23.5	0.0853	04:58.3
4	01:36.3	0.0911	06:34.6
5	02:18.6	0.0967	08:53.2
6	01:58.3	0.113	10:51.5
7	02:46.5	0.145	13:38.0
8	02:10.0	0.188	15:48.0
9	01:33.2	0.231	17:21.2
10	01:42.2	0.301	19:03.4
11	01:17.1	0.36	20:20.5

Tablas de datos obtenidas para la Herramienta TNMG160404-PF GC4215, variando la profundidad de corte.

TABLA 3.11

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 1 MM.

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VR-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	01:33.8	0.06	01:33.8
2	01:22.0	0.0713	02:55.8
3	01:36.0	0.0822	04:31.8
4	01:23.7	0.0877	05:55.5
5	01:14.4	0.1	07:09.8
6	01:03.3	0.108	08:13.2
7	02:02.3	0.131	10:15.5
8	02:41.1	0.306	12:56.7

TABLA 3.12

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 1.25 MM.

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VN-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1.25	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	**0**	**0**
1	00:57.0	0.0464	00:57.0
2	01:19.0	0.0655	02:16.0
3	01:10.1	0.0759	03:26.1
4	01:02.2	0.0896	04:28.3
5	00:55.8	0.0950	05:24.1
6	00:52.5	0.1060	06:16.6
7	00:52.3	0.1194	07:08.9
8	00:51.4	0.1282	08:00.3
9	00:44.1	0.1520	08:44.4
10	00:53.1	0.214	09:37.5
11	00:49.4	0.266	10:26.9
12	00:46.8	0.323	11:13.7

TABLA 3.13

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 1.5 MM.

Herramienta TNMG160404-PF GC4215		FILO VN-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1.5	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	**0**	**0**
1	01:15.3	0.05	01:15.3
2	01:01.0	0.0715	02:16.3
3	01:58.6	0.1082	04:14.9
4	02:35.3	0.3125	06:50.2

Tablas de datos obtenidas para Herramienta la TNMG160404-PF GC4215, variando el avance de corte.

TABLA 3.14

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 0.1 MM/REV.

Herramienta		TNMG160404-PF GC4215	
FILO		VR-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.1	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	01:33.8	0.06	01:33.8
2	01:22.0	0.0713	02:55.8
3	01:36.0	0.0822	04:31.8
4	01:23.7	0.0877	05:55.5
5	01:14.4	0.1	07:09.8
6	01:03.3	0.108	08:13.2
7	02:02.3	0.131	10:15.5
8	02:41.1	0.306	12:56.7

TABLA 3.15

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 0.2 MM/REV.

Herramienta		TNMG160404-PF GC4215	
FILO		IR-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.2	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	00:35.5	0.0375	00:35.5
2	00:30.5	0.063	01:06.0
3	01:30.2	0.088	02:36.2
4	01:12.1	0.105	03:48.3
5	00:41.2	0.145	04:29.6
6	00:37.0	0.184	05:06.6
7	00:31.8	0.3602	05:38.3

TABLA 3.16

DATOS DE PRUEBAS PARA HERRAMIENTA TNMG160404-PF GC4215, VELOCIDAD DE CORTE 360 M/MIN Y PROFUNDIDAD DE CORTE DE 0.25 MM/REV.

Herramienta		TNMG160404-PF GC4215	
FILO		IA-2	
Velocidad de corte		360	m/min
Profundidad de corte		1	mm
Avance		0.25	mm/rev
MEDICION	**Tiempo maquinado**	**Vb**	**Tiempo total**
	min	**mm**	**min**
	0	0	0
1	00:29.0	0.0605	00:29.0
2	00:26.0	0.0792	00:55.0
3	00:24.9	0.165	01:19.8
4	00:31.2	0.33	01:51.0

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Interpretación de las curvas y ecuaciones encontradas para cada herramienta.

Herramienta TNMG160408-PM GC4225

Se pudo comprobar que a velocidades de corte altas, menor es el tiempo de desgaste que tendrá la herramienta. Mientras que a velocidades bajas, el tiempo de desgaste de flanco será mayor.

Esto se lo puede ver en la figura 4.1, al usar la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a una velocidad de corte de 280 m/min, el tiempo de desgaste de la herramienta fue de 2 minutos con 43 segundos, pero si nuestra velocidad de corte se la baja a 224 m/min el tiempo de desgaste es de 37 min con 52 segundos.

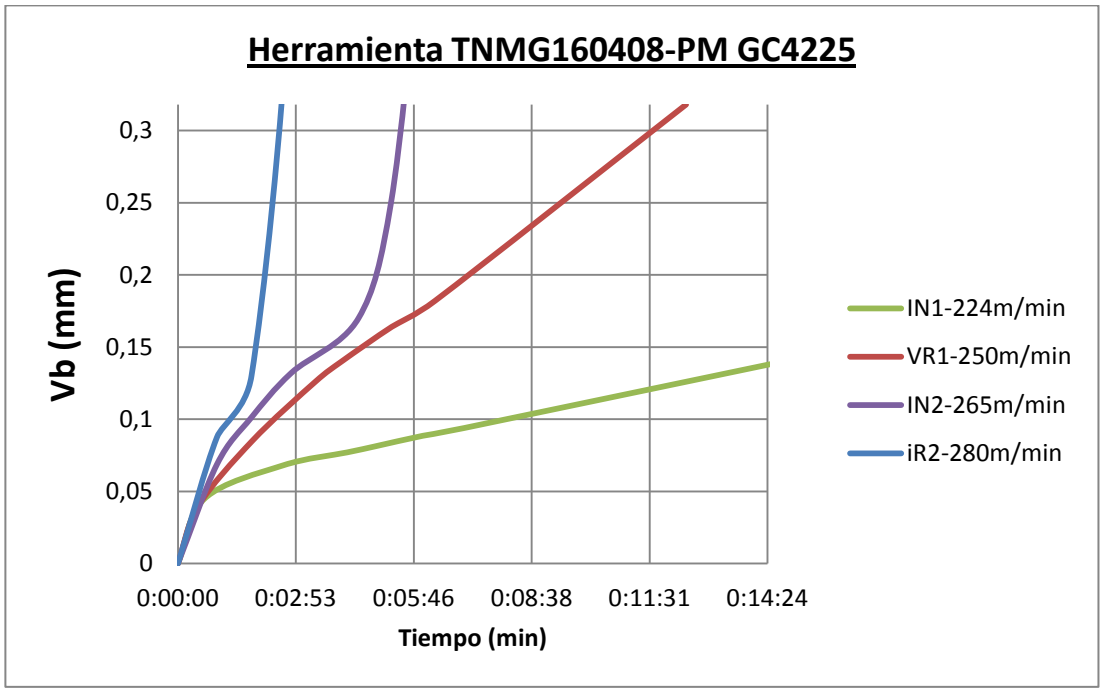


Figura 4.1. Muestra el comportamiento de la herramienta TNMG160408-PM GC4225 con distintas velocidades de corte

Herramienta TNMG160404-PF GC4215

De igual manera a velocidades de corte altas, menor es el tiempo de desgaste que tendrá la herramienta.

Esto se lo puede observar en la figura 4.2, al usar la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a una velocidad de corte de 400 m/min, el tiempo de desgaste de la herramienta fue de 11 minutos con 9 segundos, pero si nuestra velocidad de corte es de 330 m/min el tiempo de desgaste es de 19 minutos con 18 segundos.

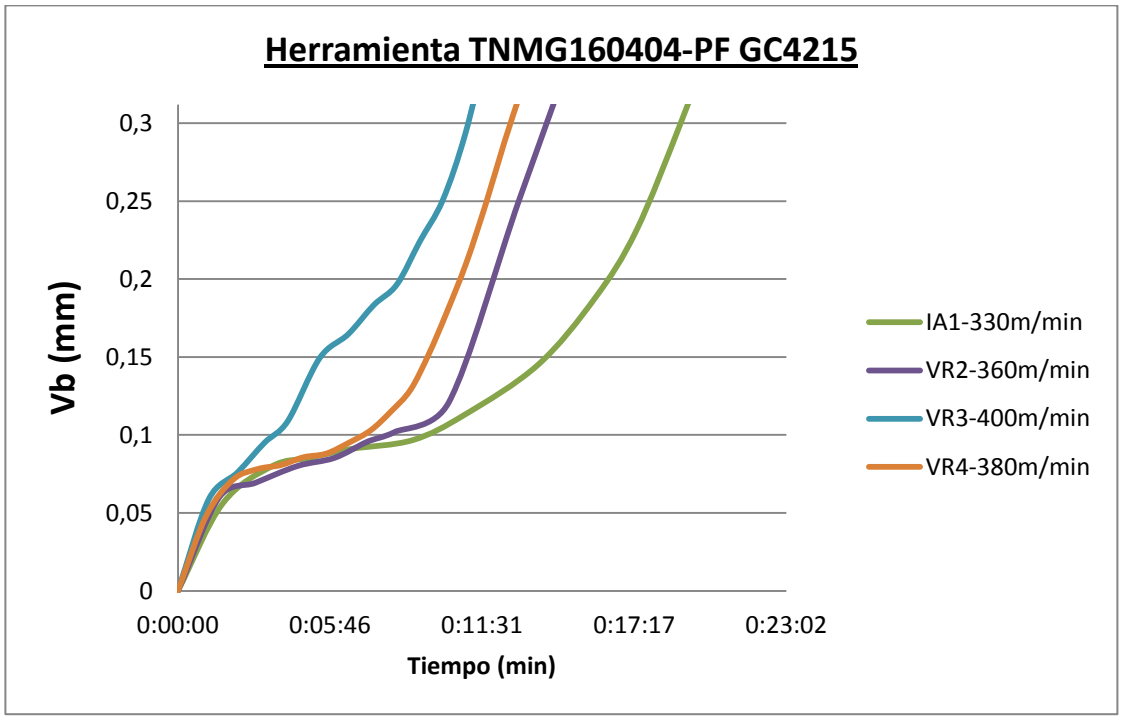


Figura 4.2. Muestra el comportamiento de la herramienta TNMG160404-PF GC4215 con distintas velocidades de corte

Comparación de herramientas de prueba.

En la grafica siguiente se pueden comparar las velocidades y tiempos de vida para ambas herramientas de corte.

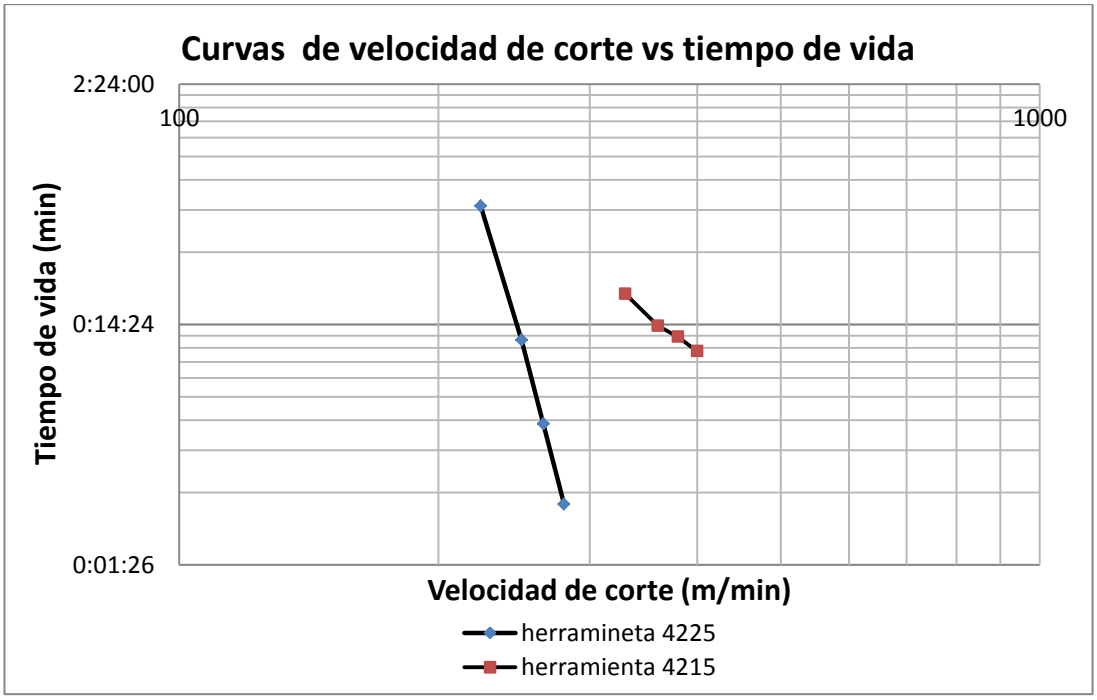


Figura 4.3. Curvas de velocidad de corte vs tiempo de vida para las 2 herramientas experimentadas

Se observa que no es conveniente usar la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a velocidades superiores a 250 m/min debido a su corto tiempo de vida, mientras que la herramienta TNMG160404-PF GC4215 tiene un tiempo de vida aceptable a velocidades superiores a 300 m/min, se debe tener en cuenta que la profundidad de corte y el avance fueron diferentes para ambas herramientas durante la experimentación.

4.2. Comportamiento de cada una de las herramientas de corte

Herramienta TNMG160408-PM GC4225

La figura 4.1 muestra el comportamiento de la herramienta y permite estimar su tiempo de vida dependiendo cual será el límite de desgaste. En la figura 4.4 se aprecia cómo va cambiando el estado de filo de corte de una herramienta que está siendo mecanizada a una velocidad de corte de 265 m/min. El tiempo que tomo a este filo en desgastarse fue de 5 min 33 segundos llegando a un desgaste de 0.31 mm.

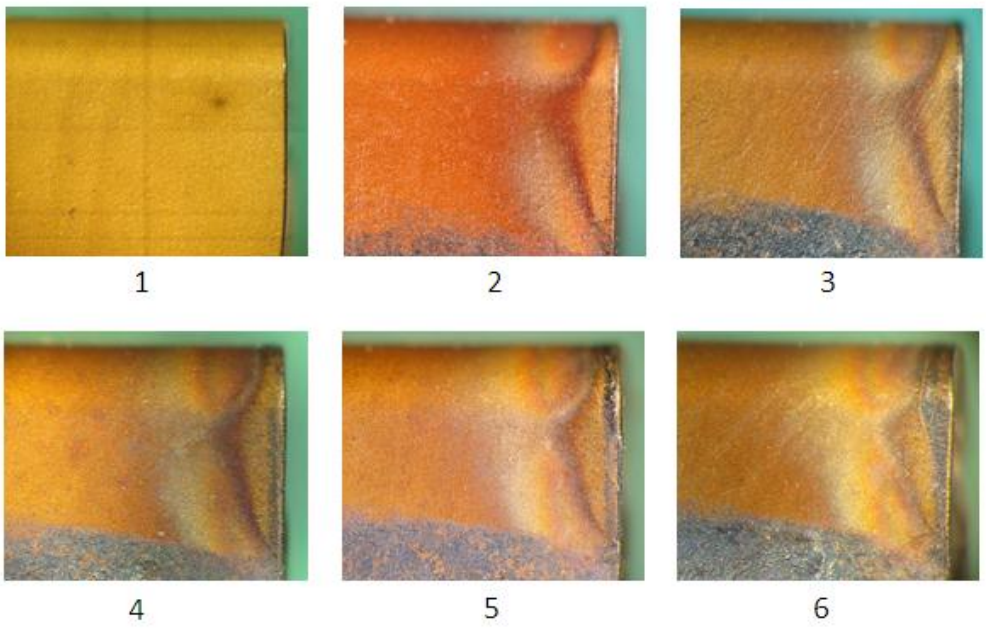


Figura 4.4. Aumento de desgaste en la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a una velocidad de 265 m/min

El proceso de desgaste para esta herramienta a distintas velocidades de corte es similar. Con la velocidad de corte que recomienda el fabricante el tiempo de vida es de 15 min que es el tiempo que normalmente dura una herramienta bien seleccionada.

Herramienta TNMG160404-PF GC4215

En la figura 4.5 se puede apreciar la variación del estado del filo de corte de una herramienta que ha sido mecanizada a una velocidad de corte de 360 m/min. El tiempo de vida de este filo fue de 12 min 56 segundos.

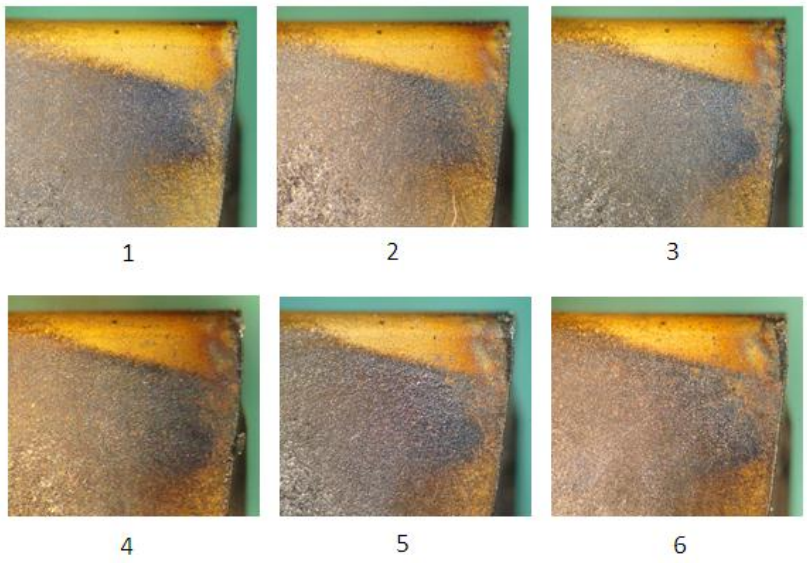


Figura 4.5. Aumento de desgaste en la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a una velocidad de 360 m/min

4.3. Comportamiento de la pieza.

4.3.1. Análisis del tipo de viruta obtenida

Análisis de la viruta obtenida mecanizada con la herramienta TNMG160408-PM GC4225

La figura 4.6 muestra el tipo de viruta que se formó mecanizando con la herramienta TNMG160408-PM GC4225 variando la velocidad de corte y manteniendo el avance y profundidad de corte.

Figura 4.6. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160408-PM GC4225 a distintas velocidades de corte

La profundidad P = 2.5 mm y el avance F = 0.25 mm/rev se usaron para esta herramienta. La forma de la viruta obtenida es corta para todas las velocidades, reduciéndose de tamaño al aumentar la velocidad de corte.

Análisis de la viruta obtenida mecanizada con la herramienta TNMG160404-PF GC4215

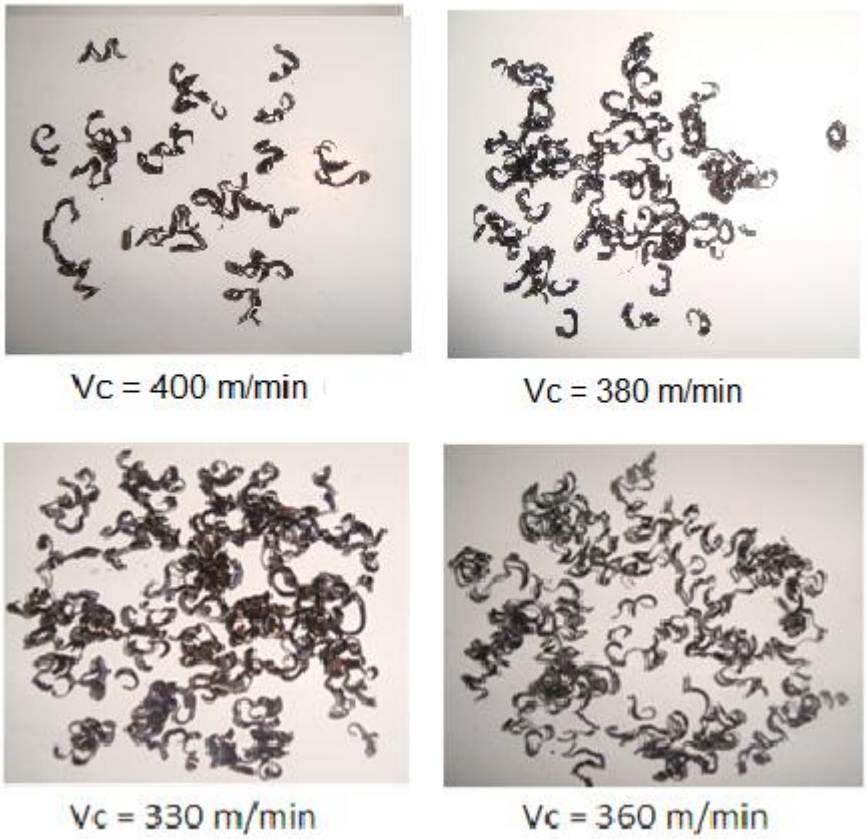


Figura 4.7. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintas velocidades de corte

Para la herramienta TNMG160404-PF GC4215 cambiando la velocidad de corte y manteniendo el avance de corte en 0.1 mm/rev y la profundidad de corte en 1 mm se obtiene las formas de las virutas observadas en la figura 4.7.

La forma de viruta varia de segmentada a viruta larga, a mayor velocidad de corte la viruta disminuye su longitud.

Análisis de la viruta obtenida mecanizada con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando la profundidad de corte

Manteniendo constantes la velocidad de corte en 360 m/min y el avance en 0.1 mm/rev, y tomando como parámetro de corte la profundidad de corte, las virutas obtenidas se las puede observar en la figura 4.8

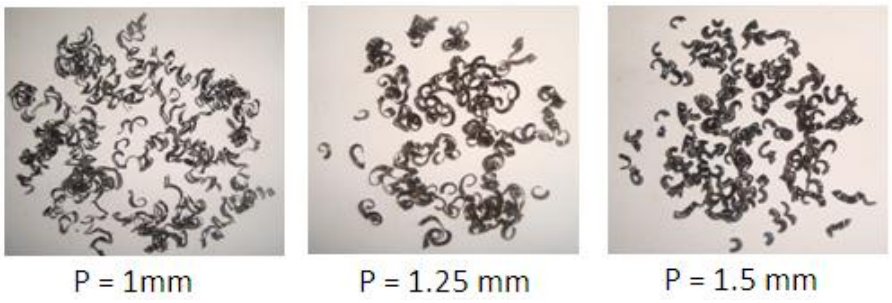


Figura 4.8. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintas profundidades de corte

Las fotografías muestran una variación en la longitud de la viruta, a profundidades más altas la viruta es más corta.

Análisis de la viruta obtenida mecanizada con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando el avance

Las pruebas variando el avance, y manteniendo la profundidad de corte en 1 mm y la velocidad de corte en 360 m/min constantes, muestran las distintas formas de virutas obtenidas (figura 4.8).

Figura 4.9. Formación de la viruta con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 a distintos avances

En esta prueba se obtuvo la viruta más corta de todas las pruebas con un avance de 0.25 mm/rev. Mientras que a menor avance la viruta se hace segmentada semi-larga.

Análisis del acabado de la pieza

El acabado final de la pieza es otra condición de desgaste a más del desgaste en flanco para saber el tiempo de vida de la herramienta. En esta tesina la condición de desgaste no es el acabado de la pieza pero es necesario conocer el acabado de la pieza con distintas condiciones de corte.

Las figuras siguientes muestran el comportamiento del acabado de la pieza con diferentes parámetros. Se observa que a las distintas velocidades de corte el acabado superficial inicial es similar, y debido a que el tiempo de mecanizado está subiendo la herramienta va perdiendo su filo, esta hace que el acabado ya no sea tan bueno.

Mientras que se observa que a menores profundidades de corte se obtiene un mejor acabado superficial.

Variación de la velocidad de corte - herramienta TNMG160408-PM GC4225

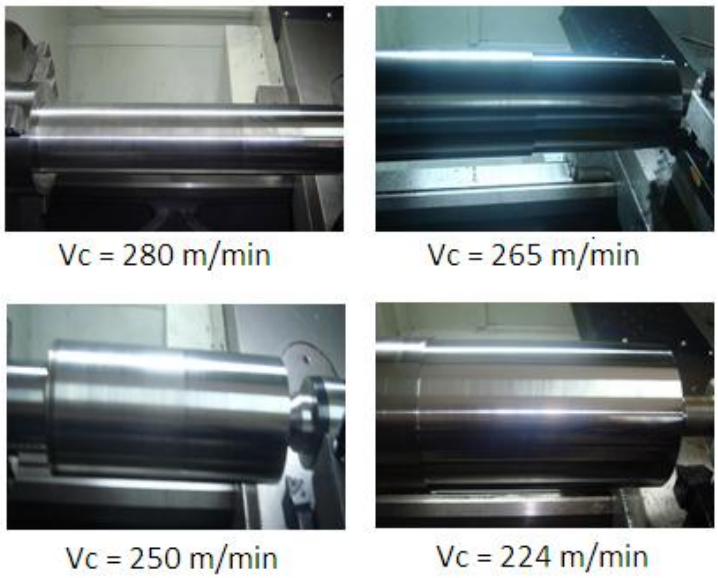


Figura 4.10. Condición de acabado de la pieza con la herramienta TNMG160408-PM GC4225 variando la velocidad de corte.

Variación de la velocidad de corte - herramienta TNMG160404-PF GC4215

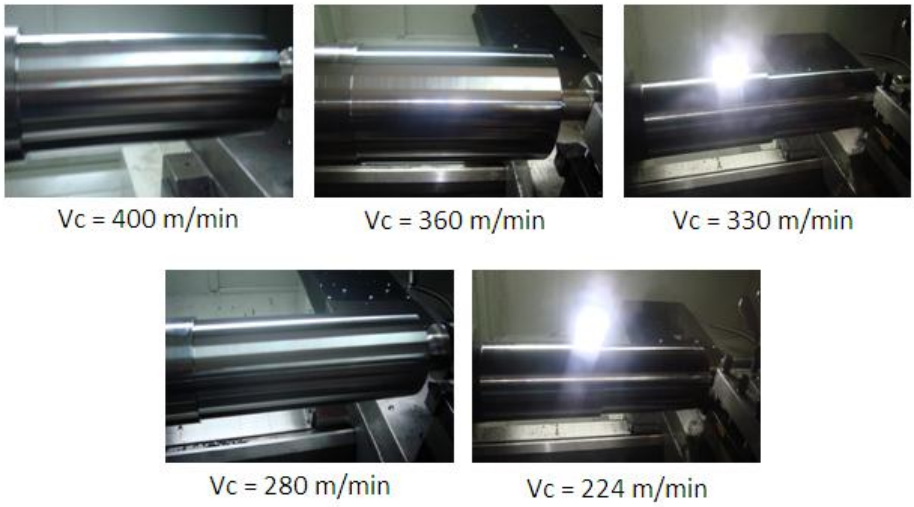


Figura 4.11. Condición de acabado de la pieza con la herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando la velocidad de corte.

Variación del avance de corte - herramienta TNMG160404-PF GC4215

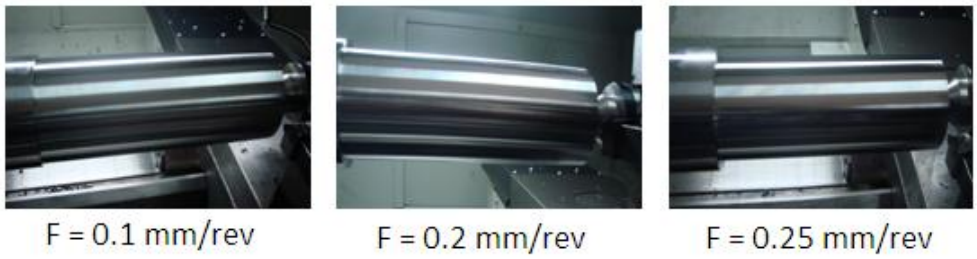


Figura 4.12. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando el avance.

Variación de profundidad de corte - herramienta

TNMG160404-PF GC4215

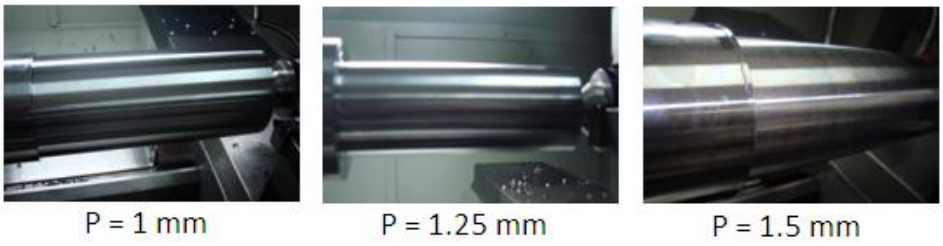


Figura 4.13. Condición de acabado de la pieza con a herramienta TNMG160404-PF GC4215 variando la profundidad

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Para el mecanizado es muy importante seleccionar correctamente la herramienta y los parámetros de corte para evitar el daño prematuro de la herramienta o una mala calidad en la pieza mecanizada. En esta tesina se cumplió el objetivo de encontrar la ecuación de Taylor para las herramientas TNMG160408-PM GC4225 ($VT^{0.078}$=302.63) y TNMG160404-PF GC4215 ($VT^{0.355}$=938.17), la cual nos permite predecir el tiempo de vida de ambas herramientas en función de la velocidad de corte, al maquinar acero AISI 4340. Es importante conocer estas ecuaciones debido a que una herramienta desgastada produce falta de consistencia en el corte, mal acabado superficial, falta de precisión e incrementa las

fuerzas de corte, por la tanto la energía necesaria en el mecanizado y elevan los tiempos y costos de producción.

5.1.2. Cuando se producen virutas cortas se obtiene un buen acabado superficial como se pudo observar en las pruebas, ya que se evitan las ralladuras de la pieza, también es muy importante tener apoyada correctamente la pieza para evitar vibración.

5.1.3. De acuerdo a los resultados, con la herramienta GC4225 se recomienda usar parámetros de corte altos (profundidad, avance y velocidad de corte) por lo que prefiere usar en desbaste. Para obtener virutas cortas en esta herramienta la velocidad de corte debe ser mayor a 200 m/min. No se recomienda usar velocidades de corte mayores a 280 m/min cuando se usa esta herramienta para desbastar AISI 4340 debido a su muy corto tiempo de vida (3 min 18 s).

5.1.4. Con la herramienta GC4215 se obtiene un mejor acabado superficial, se puede observar que se mejora la calidad superficial al disminuir la profundidad de corte y al disminuir el avance. Para obtener virutas cortas con esta herramienta se debe usar velocidades mayores a las usadas con la herramienta GC4225.

5.1.5. De las pruebas se pudo encontrar que el principal parámetro de corte que influencia sobre el tiempo de vida de la herramienta de corte es la velocidad de corte, encontrándose una variación logarítmica entre la velocidad de corte y el tiempo de vida, por lo que para pequeñas variaciones de la velocidad hay gran diferencia de tiempo de vida. Se observa una relación lineal entre el tiempo de vida y el avance, mientras que se encontró una relación cuadrática entre la profundidad de corte y el tiempo de vida de la herramienta.

5.1.6. Las pruebas realizadas en esta tesina son importantes para que junto a las pruebas de otras tesis o tesinas, se pueda crear una base de datos del tiempo de vida de las herramientas con la cual se pueda hacer un programa que permita seleccionar la herramienta de corte para maquinar algún material con los parámetros de corte más recomendados para la operación de acabado o desbaste.

5.2. Recomendaciones

5.2.1. Realizar las pruebas faltantes para encontrar la ecuación de desgaste que involucre todos los parámetros de corte.

5.2.2. Realizar un análisis de costos, usando datos de tiempo de vida de la herramienta y haciendo una investigación sobre los demás costos del maquinado como tiempo de preparación de materiales, cambio de herramienta cuando se daña, consumo de energía, etc.

5.2.3. Investigar las ventajas o desventajas del uso de líquidos lubro-refrigerantes en el proceso de maquinado de los aceros.

5.2.4. Probar otras geometrías de herramienta para el maquinado de este material, así como otros materiales de las herramientas de corte, realizando mediciones de acabado superficial y de precisión de las dimensiones obtenidas.

5.2.5. Cuando se realizan pruebas de las herramientas de corte se recomienda usar parámetros de corte con los cuales se obtenga tiempos de vida mayores a 3 min y menores a 20 min porque demanda mucho tiempo y material.

5.2.6. Comprobar o evidenciar que la ley de Archard puede ser usada para modelar el desgaste de una herramienta de corte.

5.2.7. Simular con elementos finitos el proceso de corte.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN NATIONAL STANDARD, ‘‘Tool Life Testing With Single-Point Turning Tools’’ ANSI/ASME B94.55M-1985’’, ASME, New York, 1985
2. ASM, ASM Metals Handbook, Vol 16: Machining,2005
3. GONZÁLEZ JAIMES ISNARDO, ARIZA CARDONA LAURA LILIANA SÁNCHEZ REYES CARLOS ARNULFO, PLATA GÓMEZ ARTURO, Metodología de ensayos para determinar la vida en insertos intercambiables de corte bajo criterio de desgaste de flanco en procesos de torneado, 8º Congreso Iberoamericano De Ingeniería Mecánica Cusco, 23 Al 25 De Octubre De 2007
4. GROOVER MIKELL P., Fundamentals of modern manufacturing, tercera edición, Editorial John Wiley & Sons, 2007

5. MICHELETTI, G. F.: Mecanizado por arranque de viruta, Blume, Barcelona, 1980.
6. MUNISWARAN A/L K.SEVEEN, Experimental study on hard turning of hardened tool steelwith coated carbide cutting tools, Universiti Teknologi Malaysia, julio 2007
7. RIVAS SANTANA MARCELINO, Métodos de ensayo de herramientas de corte, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, 2002
8. SANDVICK, catálogo 2009, torneado general
9. THOMAS CHILDS, KATSUHIRO MAEKAWA, TOSHIYUKI OBIKAWA, YASUO YAMANE, Metal Machining: Theory and Applications, ARNOLD, 2000
10. YOUSSEF HELMI A., EL-HOFY HASSAN, Machining technology: machine tools and operation, CRC Press, 2008
11. ZMITROWICZ ALFRED, wear patterns and laws of wear - a review, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 44, 2, pp. 219-253, Warsaw 2006