# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

## Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Metodología de Ensayos para Determinar la Vida de una Herramienta de Corte Bajo Criterio de Desgaste por Medio de la Ecuación de Taylor en un Proceso de Mecanizado para el Acero AISI 01 en un Torno CNC"

## TESINA DE SEMINARIO

Previo a la Obtención del Título de:

## INGENIEROS MECÁNICOS

Presentada por:

Luis Arnaldo Soriano González

Fernanda del Rosario Medina Aguirre

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2012

# AGRADECIMIENTO

A mi rojito por avanzar juntos en esta etapa, por tener paciencia constancia y dedicación.

A mi negrita por las dosis de esfuerzo, entusiasmo y dedicación dando lo mejor de sí.

A nuestras familias, por confiar en que lo lograríamos, por darnos tiempo y motivación.

A nuestros amigos por brindarnos su apoyo en cualquier circunstancia.

Al laboratorio de marítima y CAMPRO por abrirnos sus puertas y permitirnos utilizar sus equipos.

Al Msc. Gabriel Helguero por brindarnos su tiempo, apoyo y por su constante compromiso durante este proceso.

# DEDICATORIA

A mis padres Sara y Arnaldo, a mi hermana Sari, a Jimmy, a mi sobrina Sarita y a Patri. Son mi mayor tesoro, los guardo en mi corazón.

A mis amigos, de quienes guardo grandes recuerdos.

A mi hermano Juanpa, este trabajo lo hice pensando en ti, te queremos y extrañamos mucho.

A mis padres Gandhi y Lidia, y hermanas Lidia, Gloria y Gaby que con unión y como familia están presentes en mi vida.

A mis amigos quienes me daban ánimos y compañía.

A Naty y Euge por cuidar de mí.

A Dios

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

| | |
|---|---|
| Ing. Gustavo Guerrero M.<br>DECANO DE LA FIMCP<br>PRESIDENTE | M.Sc. Gabriel Helguero A.<br>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 POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

_____ _____

Luis Arnaldo Soriano González Fernanda del Rosario Medina Aguirre

# RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con objetivo de establecer una metodología de ensayos que permitiera determinar el tiempo de vida útil de una herramienta de corte por medio de la ecuación de Taylor. Se implementaron dichos ensayos mediante operaciones de cilindrado desarrollados en un acero AISI 01, con una dureza de 180 HB. Como herramientas de corte se utilizaron dos insertos de referencia TNMG160408-PM GC4225 y TNMG160412-PF CT5015 respectivamente, en los que se midieron el desgaste de flanco fijando un valor de 0.19mm y 0.30mm como criterio de vida. La medición del desgaste de flanco se realizó a partir de imágenes tomadas por una cámara que utilizaba el objetivo de un estéreo microscopio; el procesamiento de estas imágenes de desgaste se realizó por medio del software de procesamiento digital AxioVision 4.8. Los registros de las mediciones de desgaste se utilizaron para la construcción de las curvas de desgaste. Como conclusión de este ensayo se presentan las curvas de tiempo de vida y las constantes que generan la ecuación de Taylor, obtenidas a partir de las mediciones de desgaste mediante un análisis de regresión lineal, así como el análisis de datos primarios e informaciones más significativas, que permitieron la caracterización del ensayo de vida útil de la herramienta.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN ..... II

ÍNDICE GENERAL ..... III

ABREVIATURAS ..... VII

SIMBOLOGÍA ..... VII

ÍNDICE DE FIGURAS ..... IX

ÍNDICE DE TABLAS ..... X

ÍNDICE DE GRÁFICAS ..... XII

INTRODUCCIÓN ..... 1

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MECANIZACIÓN Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS ..... 3

1.1. Descripción del Proceso de Arranque de Viruta ..... 4

1.1.1. Teoría de Formación de Virutas en Metales. ..... 5

1.1.2. Tipos de Viruta Producida en el Maquinado de Metales. ..... 13

1.2. Descripción del Acero AISI 01. ..... 17

1.2.1.Información General. ..... 18

1.2.2.Aplicaciones. ..... 19

1.2.3.Propiedades. ..... 20

1.2.4.Recomendaciones para el Mecanizado del Acero AISI 01. ... 22

1.3.Generalidades de la Herramienta de Corte. ..... 25

1.3.1.Según el Material del Cual Están Constituidas. ..... 25

1.3.2.Según su Forma, Determinada por su Utilización. ..... 34

1.3.3.Según sus condiciones de corte. ..... 40

1.4.Selección de la Herramienta de Corte. ..... 42

1.4.1.Factores de selección de la Herramienta de Corte. ..... 43

CAPÍTULO 2

2. VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE, METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CRITERIOS DE DESGASTE. ..... 51

2.1.Vida Útil de la Herramienta de Corte. ..... 52

2.1.1.Ecuación de Taylor. ..... 60

2.2.Criterios de Desgaste de la Herramienta de Corte. ..... 65

2.2.1.Selección de los Criterios del Desgaste. ..... 66

2.3.Metodología para el Análisis del Desgaste. ..... 67

2.3.1.Medición del Desgaste de la Herramienta de Corte..... 68

2.3.2.Descripción de los Equipos..... 71

2.3.3.Proceso de Evaluación del Desgaste. ..... 73

CAPÍTULO 3

3. REGISTRO Y REPORTE DE RESULTADOS. ..... 52

3.1.Linealización de la Curva de Taylor..... 76

3.2.Análisis del Desgaste de Flanco (VB) para Diferentes Velocidades de Corte. ..... 78

3.3.Curvas Velocidad de Corte vs. Tiempo de Mecanización para Desgaste de Flanco Crítico de la Herramienta 1 ..... 82

3.4.Curvas Velocidad de Corte vs. Tiempo de Mecanización para Desgaste de Flanco Crítico de la Herramienta 2. ..... 85

3.5.Curvas de Desgaste de Flanco en Función del Avance y Profundidad de Corte..... 87

3.6.Curvas Comparativas de las Herramientas de Corte. ..... 91

3.7.Análisis de Volumen del Material Removido. ..... 94

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS. ..... 100

4.1.Análisis de la Dispersión de los Resultados Obtenidos. ..... 101

4.2.Análisis de las Constantes de Taylor para las Diferentes Herramientas de Corte. ..... 106

4.3.Influencia de la Herramienta de Corte y Parámetros de Mecanización en el Tiempo de Vida Útil. ..... 108

4.4.Comparación de los Resultados Obtenidos para las Diferentes Herramientas de Corte. ..... 109

4.4.1.Tipos de Viruta Obtenida. ..... 110

4.4.2.Acabado Superficial del Material de Trabajo. ..... 111

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... 117

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

# ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| $mm^3$ | Milímetro cúbico |
| min | Minuto |
| TRM | Tasa de Remoción de Material ($mm^3$/min) |
| Rpm | Revoluciones por minuto |
| N | Velocidad Rotacional (rpm) |
| F | Fuerza de Fricción |
| *N* | Fuerza Normal a la Fricción |
| $F_s$ | Fuerza Cortante |
| $F_n$ | Fuerza Normal a la Fuerza Cortante |
| $A_s$ | Área del Plano Cortante |
| $F_c$ | Fuerza de Corte |
| $F_t$ | Fuerza de empuje |
| HB | Dureza en escala Brinell |
| HRB | Dureza en escala Rockwell B |
| HRC | Dureza en escala Rockwell C |
| WC | Carburo de Tungsteno |
| HRSA | Superaleaciones Termoresistentes |
| CVD | De la abreviatura del Ingles Chemical Vapor Deposition |
| PVD | De la abreviatura del Ingles Physical Vapor Deposition |
| Ti(C,N) | Carbo Nitruro de Titanio |
| Kg | Kilogramo |
| mm | Milímetro |
| CNC | Centro de Control Numérico |
| g.l. | Grados de Libertad |

# SIMBOLOGÍA

| | |
|---|---|
| β | Ángulo de Incidencia |
| $\alpha$ | Ángulo de Ataque |
| $\emptyset$ | Ángulo del Cortante |
| $\gamma$ | Deformación Cortante |
| μ | Coeficiente de Fricción |
| $\tau$ | Esfuerzo Cortante |
| Vb | Desgaste de Flanco |
| KT | Desgaste de Cráter |
| $n$ | Constante de Taylor |
| C | Constante de Taylor |
| $a_p$ | Profundidad de Corte (mm) |
| $f_n$ | Avance (mm/rev) |
| $V_c$ | Velocidad de Corte (m/min) |
| $t_0$ | Espesor de la Viruta Antes del Corte |
| $t_c$ | Espesor de la Viruta Después del Corte |
| $r$ | Relación de Espesor de Viruta |
| $D_o$ | Diámetro Exterior |
| $D_i$ | Diámetro Interior |
| $D_{prom}$ | Diámetro Promedio |
| No | Número de Observaciones Experimentales |
| $S_r^2$ | Variación Residual |
| $S_R^2$ | Variación Total |

# ÍNDICE DE FIGURAS


Figura 1.1 Definición de Términos del Torneado (1). ..... 4
Figura 1.2 Corte Ortogonal: A) Modelo Tridimensional y B) Modelo Reducido a Dos Dimensiones en una Vista Lateral (2). ..... 5
Figura 1.3 Modelo de Corte Más Realista, Mostrando las Zonas de Corte Primaria y Secundaria (2). ..... 7
Figura 1.4 Tasa de Remocion de Material. ..... 9
Figura 1.5 Fuerzas en el Corte de Metales: (a) Fuerzas en la Viruta y (b) Fuerzas que Actúan Sobre la Herramienta (2). ..... 10
Figura 1.6 Fuerzas que se Pueden Medir en el Proceso de Mecanización de Metales (2)..... 12
Figura 1.7 Tipos de Viruta (3). ..... 14
Figura 1.8 Metalografía de Material de La Pieza de Trabajo AISI 01 100x. ..... 22
Figura 1.9 Clasificación de los Materiales de Mecanización Según la Norma ISO (1). ..... 23
Figura 1.10 Diversas Calidades de Insertos (1)..... 26
Figura 1.11 Vista de Corte de un Inserto con Recubrimiento CVD (1). ..... 29
Figura 1.12 Vista de Corte de un Inserto con Recubrimiento PVD (1). ..... 30
Figura 1.13 Comparación entre Plaquitas Positivas y Negativas (1). ..... 35
Figura 1.14 Comparación entre Plaquitas de Diversas Geometrías (1). .... 36
Figura 1.15 Nº de Filos Según la Forma del Inserto (1)..... 38
Figura 1.16 Tipo de Viruta Obtenido para un Radio de Punta Mayor y uno Menor (1). ..... 39
Figura 1.17 Acabado Superficial en Función del Radio de Punta (1). ..... 40
Figura 1.18 Área de Trabajo de Cada Geometría Según las Condiciones de Corte (1). ..... 41

Figura 2.1 Diagrama de una Herramienta Desgastada con las Principales Zonas donde Ocurre el Desgaste (2). ..... 54
Figura 2.2 Zonas de Desgaste en Herramientas (6)..... 56
Figura 2.3 Curvas de Desgaste:(a) Forma General de la Curva de Desgaste. (b) Desgaste de Flanco en Función del Tiempo de Corte para Diferentes Velocidades de Corte (8). ..... 61
Figura 2.4 Gráfica en Escala Log-Log de la Velocidad de Corte contra la Vida de la Herramienta (2). ..... 63
Figura 2. 5 Centro de Torneado. ..... 72
Figura 2. 6 Elementos del Procesamiento Digital de Imágenes. ..... 73
Figura 2. 7 Dispositivo de Sujeción del Inserto. ..... 73

Figura 4.1 Curvas de Vida de la Herramienta para Diversos Materiales (7). ..... 107

# ÍNDICE DE TABLAS


TABLA 1 Composición Química del AISI 01/ASSAB DF2 (4) ..... 18
TABLA 2 Aplicaciones Comunes para el AISI 01 (5) ..... 19
TABLA 3 Dureza del Acero AISI 01/ASSAB DF2 en Escala HRB y HB .. 21
TABLA 4 Herremientas de Corte Seleccionadas ..... 45
TABLA 5 Parámetros de Corte Recomendados para la Herramienta de Corte por la Sandvik (1) ..... 47
TABLA 6 Parámetros de Corte Recomendados para el Material de Trabajo por la Sandvik (1) ..... 48
TABLA 7 Parámetros de Corte Seleccionados para el Desarrollo de la Ecuación de Taylor para el Inserto TNMG160412-PF CT501 .. 49
TABLA 8 Parámetros de Corte Seleccionados para el Desarrollo de la Ecuación de Taylor para el Inserto TNMG1604 08-PM GC4225 ..... 50
TABLA 9 Parámetros Seleccionados para Evaluación del Desgaste en Función de la Profundidad y el Avance ..... 50
TABLA 10 Tipos de Desgastes (1) ..... 59
TABLA 11 Límites de los Valores de “n” para Diversos Materiales de Corte (7) ..... 64
TABLA 12 Recomendaciones Generales Empleadas en la Práctica Industrial para el Límite del Desgaste de Flanco (8) ..... 66
TABLA 13 Tabla para el Cálculo de Regresión Lineal para TNMG160412-PF CT5015 ..... 83
TABLA 14 Constantes de la Ecuación de Taylor para la Herramienta TNMG160412-PF CT5015 ..... 84
TABLA 15 Tabla para el Cálculo de Regresión Lineal para TNMG160408-PM GC4225 ..... 86
TABLA 16 Tasa de Remoción de Material para Diferentes Velocidades de Corte de la Herramienta TNMG160412-PF CT5015 ..... 95
TABLA 17 Tasa de Remoción de Material para Diferentes Velocidades de Corte de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225 ..... 97
TABLA 18 Recopilación de Resultados de Tabla 13 Y 14 ..... 103
TABLA 19 Variación Residual y Total para la Herramienta TNMG160412-PF CT5015 ..... 104
TABLA 20 Cáculo de la Razón de Varianza y Comparación con el Valor F ..... 104

TABLA 21 Recopilación de Resultados de Tabla 15 y 16 ..... 105
TABLA 22 Variación Residual y Total para la Herramienta TNMG160408-PM GC4225..... 105
TABLA 23 Cáculo de la Razón de Varianza y Comparación con el Valor F ..... 105
TABLA 24 Acabado Superficial de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225 para Diferentes Velocidades de Corte ..... 112
TABLA 25 Acabado Superficial de la Herramienta TNMG 160412-PF CT5015 para Diferentes Velocidades de Corte..... 113
TABLA 26 Acabado Superficial de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225 para Diferentes Avances y Profundidades de Corte. ..... 114
TABLA 27 Acabado Superficial de la Herramienta TNMG 160408-PF CT5015 para Diferentes Avances y Profundidades de Corte..115

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1 Desgaste de Flanco (VB) de la Herramienta TNMG160412-PF CT5015 para Diferentes Velocidades de Corte..... 78
Gráfica 3.2 Curvas Finales de Desgaste de Flanco (VB) de la Herramienta TNMG160412-PF CT5015 para Diferentes Velocidades de Corte..... 79
Gráfica 3.3 Curvas de Desgaste de Flanco (VB) de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225 para Diferentes Velocidades de Corte..... 81
Gráfica 3.4 Curva V-T para $VB_B$ = 0.19mm..... 84
Gráfica 3.5 Curva V-T para $VB_B$=0.3mm..... 85
Gráfica 3.6 Curva V-T para $VB_B$=0.3mm (Vc=305-460 m/min)..... 86
Gráfica 3.7 Curvas de Desgaste de Flanco (VB) de la Herramienta TNMG160412-PF CT5015..... 88
Gráfica 3.8 Curvas de Desgaste de Flanco (VB) de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225..... 90
Gráfica 3.9 Curvas Comparativas de Desgaste de Flanco para el F1..... 92
Gráfica 3.10 Curvas Comparativas de Desgaste de Flanco para el F2..... 92
Gráfica 3.11 Curvas Comparativas de Desgaste de Flanco para el F3..... 93
Gráfica 3.12 Curvas Comparativas de Desgaste de Flanco para el F3..... 93
Gráfica 3.13 Volumen Removido para las Diferentes Velocidades de Corte para la Herramienta TNMG160412-PF CT5015..... 95
Gráfica 3.14 Volumen Removido para las Diferentes Velocidades de Corte de la Herramienta TNMG160408-PM GC4225..... 97

# INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanización consisten en la transformación de un material mediante la remoción de viruta. El objetivo fundamental de este proceso es obtener piezas con la configuración geométrica requerida y acabado superficial deseado.

Debido al aumento de las exigencias de producción y calidad que se tienen hoy en día, los procesos de mecanización se han visto obligados a evolucionar para adaptarse a condiciones más severas, sobre todo a velocidades de corte más elevadas. Sin embargo, en los procesos de producción, las piezas no siempre se desarrollan satisfactoriamente. Esto se debe a diversos factores, entre los cuales uno de los más importantes es el desgaste del filo de la herramienta de corte. Este desgaste se origina debido a un conjunto de factores mecánicos y químicos, cuya influencia incrementa con el aumento de la temperatura en la zona de corte. Este aumento es debido al rozamiento a grandes presiones que existe en la interfaz viruta-herramienta-pieza.

Debido a la influencia que tiene el desgaste de la herramienta en las condiciones de corte, es necesario establecer un nivel de desgaste en el que las alteraciones generadas por este se encuentren por debajo de las condiciones críticas. Cuando la herramienta alcanza este nivel de desgaste se dice que ha llegado al término de su tiempo de vida útil. Existen una variedad de criterios basados en las alteraciones antes mencionadas, que

permiten cuantificar la vida útil de la herramienta. Una alternativa muy utilizada para predecir el fin de vida de una herramienta de corte es el empleo de la ecuación de Taylor. El presente trabajo tiene como objetivo establecer una metodología de ensayos relativos a la vida de la herramienta de corte, diseñando los formatos necesarios que permitan el desarrollo de las pruebas para determinar las constantes de la ecuación de Taylor de dos herramientas, una con calidad de carburo revestido TNMG160408-PM GC4225, y otra con calidad de cermet TNMG160412-PF CT5015, empleando como pieza de trabajo el acero AISI 01, ampliamente usado en la fabricación elementos elaborados en frío. El proceso de mecanización utilizado es el cilindrado a velocidad constante para cada filo, se realizan ensayos con diversos valores de profundidad y avance para los dos insertos, de manera que se pueda determinar que herramienta tiene el mejor desempeño, y bajo qué condiciones ocurre esto.

Para la medición del desgaste de la herramienta se empleó un estéreo microscopio, la manipulación de las imágenes obtenidas se realizó con el software AxioVision 4.8®, que permite medir el desgaste y registrar los valores obtenidos. En el análisis y el reporte de resultados se utilizaron curvas construidas mediante el software Matlab R2008a®.

# CAPÍTULO 1

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MECANIZACIÓN Y HERRAMIENTAS EMPLEADAS.

Los procesos de corte consisten en la remoción de material de la superficie de una pieza de trabajo. Uno de los procesos más comunes de remoción de material es el cilindrado, que se ilustra en la figura 1.1. En dicha operación, la herramienta de corte se ajusta a una determinada profundidad ($a_p$) y se desplaza de manera longitudinal con cierta velocidad de avance ($f_n$) cuando gira la pieza a una determinada velocidad de corte ($V_c$). El avance ($f_n$) es la distancia que recorre la herramienta por cada revolución de la pieza (mm/rev). Como consecuencia de esta acción se produce viruta, que se mueve cuesta arriba por la cara de la herramienta.

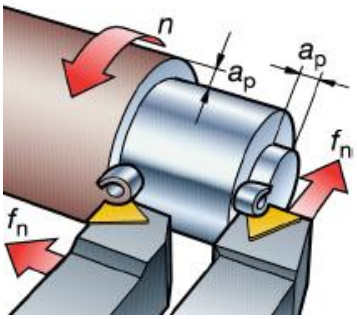



**FIGURA 1.1** DEFINICIÓN DE TÉRMINOS DEL TORNEADO (1).

Para comprender el proceso básico de corte, se deberá primero analizar el mecanismo de formación de virutas. El modelo de corte propuesto por Merchant llamado modelo de Corte Ortogonal simplifica muchas de las complejidades geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión

## 1.1. Descripción del Proceso de Arranque de Viruta.

Aunque casi todos los procesos de corte son de naturaleza tridimensional, se puede emplear un modelo bidimensional con el fin de simplificar el análisis del proceso de corte, como se ilustra en la figura 1.2. Por definición, el modelo ortogonal emplea una cuchilla en forma de cuña donde el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte. En este modelo se analizan dos ángulos de la herramienta de corte: el ángulo de incidencia (de holgura, β), que provee un pequeño claro entre el flanco de la herramienta y la

superficie recién generada, y el ángulo de ataque ($\alpha$) que determina la dirección en la que fluye la viruta.

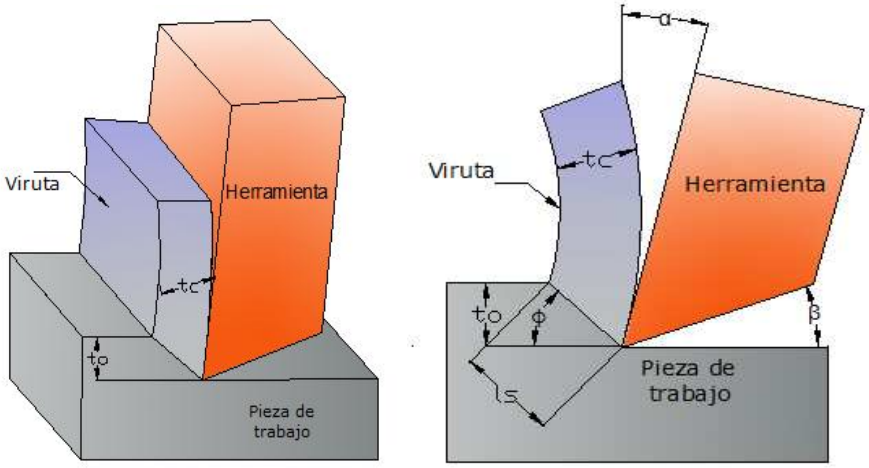



**FIGURA 1.2** CORTE ORTOGONAL: A) MODELO TRIDIMENSIONAL Y B) MODELO REDUCIDO A DOS DIMENSIONES EN UNA VISTA LATERAL (2).

### 1.1.1. Teoría de Formación de Virutas en Metales.

En exámenes microscópicos se ha visto que las virutas se producen debido a la deformación cortante que ocurre a lo largo de la zona de cizallamiento, (que normalmente se denomina plano cortante). Este plano forma un ángulo ∅ (ángulo del cortante) con la superficie de la pieza. El ángulo ∅ posee gran influencia sobre la calidad de la pieza maquinada.

Durante el corte, la herramienta se coloca por debajo de la superficie original de trabajo, esta distancia corresponde al espesor de la viruta antes de su formación $t_o$. Al formarse la viruta a lo largo del plano cortante aumenta su espesor $t_c$. La relación entre $t_o$ y $t_c$ se la conoce como la relación de espesor de viruta.

$$r = \frac{t_o}{t_c} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

Como el espesor de la viruta después del corte es mayor al espesor antes de su formación, el valor obtenido de la relación de viruta siempre será menor a la unidad. El modelo ortogonal tiene una dimensión de anchura de la viruta w, como se ilustra en la figura 1.2, pero este valor no tiene una contribución significativa al análisis ortogonal.

La geometría del modelo ortogonal permite obtener una relación entre el espesor de viruta $t_o$, el ángulo de ataque $\alpha$ y el ángulo del plano cortante $\emptyset$.

$$\tan \emptyset = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \qquad \text{(Ec. 2)}$$

La deformación cortante que ocurre en el plano de corte se puede expresar como:

$$\gamma = \tan(\emptyset - \alpha) + \cot\emptyset \qquad \text{(Ec. 3)}$$

Se debe de considerar que existen diferencias entre el modelo de corte ortogonal y el proceso de maquinado real.

En primer lugar, el proceso de deformación cortante no ocurre sobre un plano. La figura 1.3 ilustra un modelo más realista del proceso de corte del metal.

Las experimentaciones han demostrado que la deformación cortante ocurre en una zona delgada de corte, cuyo espesor es de pocas centésimas de milímetro. Como esta zona es tan delgada, en la mayoría de los casos no hay mucha pérdida de precisión si se supone como un plano.

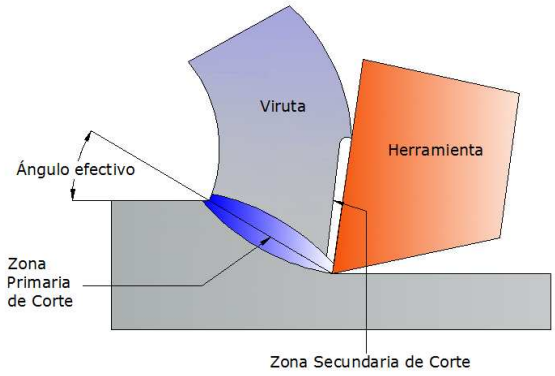



**FIGURA 1.3** MODELO DE CORTE MÁS REALISTA, MOSTRANDO LAS ZONAS DE CORTE PRIMARIA Y SECUNDARIA (2).

En segundo lugar, además de la deformación que ocurre en la zona de corte antes mencionada, existe otra acción de corte de la viruta después de haber sido formada. El lugar donde ocurre esta acción se lo denomina la zona secundaria de corte. Esta zona resulta de la fricción que ocurre al desplazarse la viruta a lo largo de la herramienta de corte. Su efecto aumenta con el incremento de la fricción.

En tercer lugar, el proceso de arranque de viruta depende del material que se maquine y de las condiciones de corte.

**Tasa de Remoción de Material (TRM)**

La tasa de remoción de material es el volumen de material removido por unidad de tiempo ($mm^3$/min).

Por cada revolución de la pieza de trabajo, una capa en forma de anillo se desprende cuya área de sección transversal equivale al producto de la distancia que recorre la herramienta en una revolución (avance), por la profundidad de corte.

$$Área\ de\ sección\ transversal\ = a_p\ x\ f_n \qquad \text{(Ec.4)}$$

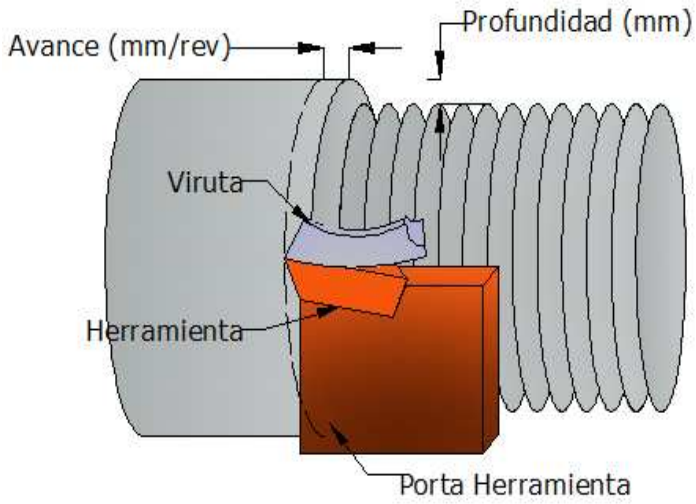



**FIGURA 1.4** TASA DE REMOCIÓN DE MATERIAL.

El volumen de este anillo es igual al producto del área de la sección transversal por el promedio de la circunferencia del anillo $\pi \times D_{prom}$, donde:

$$D_{prom} = (D_o - D_i)/2 \qquad \text{(Ec. 5)}$$

La velocidad rotacional de la herramienta de trabajo es *N* (rev/min), entonces la tasa de remoción por revolución es:

$$\pi \times D_{prom}(a_p)(f_n) \qquad \text{(Ec. 6)}$$

Ya que el valor de *N* se encuentra definido, se puede establecer la tasa de remoción de material como:

$$TRM = \pi \times D_{prom}(a_p)(f_n)N \qquad \text{(Ec. 7)}$$

Se pueden definir varias fuerzas en base al sistema de corte ortogonal, de las cuales se pueden obtener: el esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y otras relaciones más. Las fuerzas que actúan en la viruta se pueden dividir en dos componentes mutuamente perpendiculares como se observa en la figura 1.5.

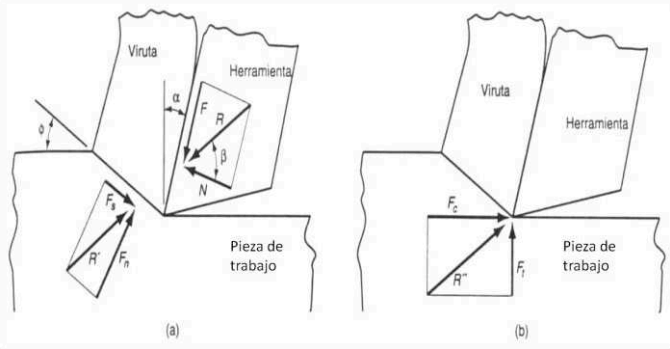



**FIGURA 1.5** FUERZAS EN EL CORTE DE METALES: (a) FUERZAS EN LA VIRUTA Y (b) FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE LA HERRAMIENTA (2).

**Fuerza de fricción *F***. Es la fuerza de rozamiento presente en la interfaz herramienta-viruta, que resiste el flujo de la viruta por la cara de incidencia de la herramienta.

**Fuerza normal a la fricción *N***. Es la fuerza perpendicular a la fuerza de fricción. Relacionando estas dos componentes se puede obtener el coeficiente de fricción $\mu$ entre la herramienta y la viruta.

Además de las fuerzas que genera la herramienta en la viruta, existen dos componentes impuestas por la pieza de trabajo.

**Fuerza cortante $F_s$.** Es la fuerza que ocasiona la deformación en el plano cortante.

**Fuerza normal a la cortante $F_n$.** Es la fuerza perpendicular a la fuerza cortante.

En base a la fuerza cortante $F_s$. Se puede determinar el esfuerzo cortante que actúa a lo largo del plano cortante.

$$\tau = \frac{F_S}{A_S} \qquad \text{(Ec. 8)}$$

Para que las fuerzas estén balanceadas, la componente resultante (*R*) que actúa en la herramienta, debe de ser *R',* que es igual en magnitud y opuesta en dirección a la resultante de la suma de las fuerzas que actúan en la viruta, como se ilustra en la figura 1.5 (a).

De las cuatro componentes de fuerzas *F, N,* $F_s$ *y* $F_n$*,* ninguna de estas se puede medir directamente. Sin embargo, es posible adaptar un dispositivo medidor de fuerzas en la herramienta, de

manera que se puedan medir directamente dos componentes adicionales:

**Fuerza de corte $F_c$:** Es la fuerza que va en la dirección de la velocidad de corte.

**Fuerza de empuje $F_t$:** Es la fuerza que va en dirección de $t_o$, perpendicular a la fuerza de corte.

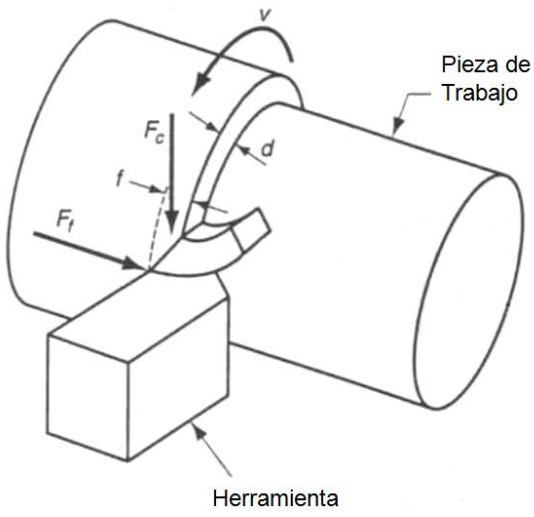



**FIGURA 1.6** FUERZAS QUE SE PUEDEN MEDIR EN EL PROCESO DE MECANIZACIÓN DE METALES (2).

Tomando como base las componentes de fuerza que se pueden medir, las cuatro componentes restantes se pueden definir mediante las siguientes relaciones trigonométricas:

$$F = F_c \operatorname{sen}\alpha + F_t \cos\alpha \qquad \text{(Ec. 9)}$$

$$N = F_c \cos\alpha - F_t \operatorname{sen}\alpha \qquad \text{(Ec. 10)}$$

$$F_s = F_c \cos\emptyset - F_t \operatorname{sen}\emptyset \qquad \text{(Ec. 11)}$$

$$F_n = F_c \operatorname{sen}\emptyset + F_t \cos\emptyset \qquad \text{(Ec. 12)}$$

Las clases de virutas producidas afectan de manera significativa al acabado superficial y a las condiciones generales de corte (por ejemplo: tiempo de vida de la herramienta, vibraciones), se debe de tomar en cuenta los diversos tipos de virutas obtenidas durante el proceso de maquinado.

### 1.1.2. Tipos de Viruta Producida en el Maquinado de Metales.

La viruta tiene dos superficies características. La primera, pertenece a la zona de la viruta que se encuentra en contacto con la cara de ataque de la herramienta. Se caracteriza por tener un aspecto bruñido debido al intenso contacto con la superficie de la herramienta. La segunda superficie, se origina por el desprendimiento de material en la pieza de trabajo. Esta no tiene contacto alguno con la herramienta de corte y presenta una superficie con aspecto rasgado y áspero. En el presente trabajo se realiza un estudio de la viruta obtenida en base a la

clasificación propuesta por Micheletti y a la caracterización que se presenta en la norma ANSI/ASME B94.55M (6), ver apéndice A.

Se describirán los tipos de viruta según Micheletti en el siguiente orden:

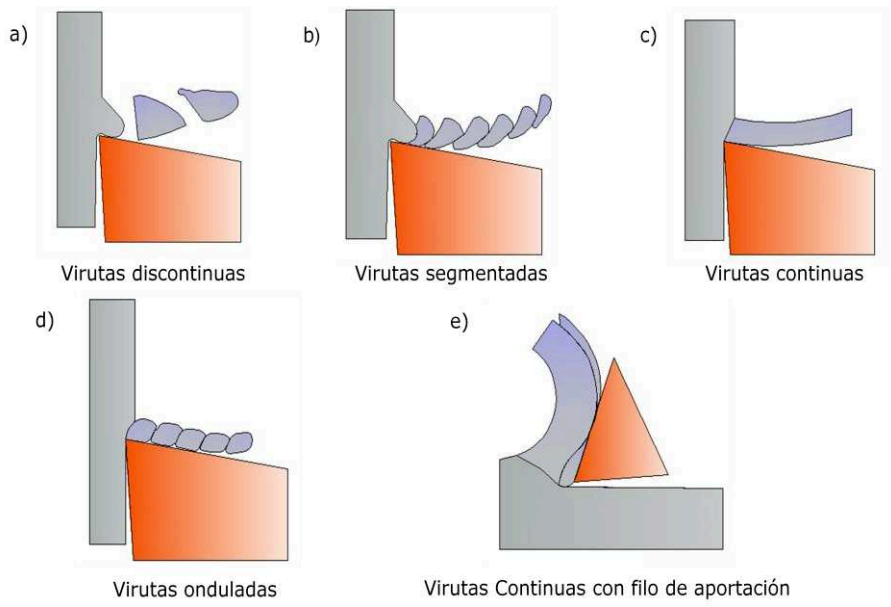



**FIGURA 1.7** TIPOS DE VIRUTA (3).

a) Virutas discontinuas

Este tipo de viruta suele formarse bajo las siguientes condiciones:

- Al maquinar materiales frágiles que no poseen la capacidad de absorber las deformaciones cortante que se presentan en el corte.
- A muy elevadas o muy bajas velocidades de corte.
- A grandes profundidades de corte.
- Con ángulos de ataque bajos.
- Falta de fluido de corte eficaz.

Si no se tiene la rigidez suficiente, la máquina herramienta puede generar vibraciones que puedan perjudicar el acabado superficial y la exactitud dimensional de la pieza de trabajo. También puede ocasionar la falla prematura de la herramienta de corte.

b) Virutas segmentadas

Las virutas segmentadas o no homogéneas son semicontinuas, con zonas de alta y baja deformación por cortante. Los metales con baja conductividad térmica y con una resistencia que disminuye rápidamente con la temperatura muestran este comportamiento. Las virutas tienen un aspecto de sierra.

c) Virutas continuas

Estas se suelen formar en materiales dúctiles a grandes velocidades de corte y/o grandes ángulos de ataque. En general producen buen acabado superficial, sin embargo no siempre son deseables, especialmente en máquinas herramientas controladas por CNC. Estas virutas tienden a enredarse en el porta herramientas, en los soportes e inclusive en la propia pieza obligando a detener la operación para su remoción.

d) Virutas onduladas

En todas las operaciones de corte de metales, las virutas desarrollan una curvatura (forma de rizos) al salir de la superficie de la pieza. En general, el radio de curvatura baja (la viruta se enrosca más) a medida que disminuye la profundidad de corte. También el uso de fluidos de corte y de diversos aditivos en el material de la pieza influye sobre el formado de los rizos.

e) Virutas continuas con filo de aportación

Una viruta continua con filo de aportación consiste en capas de material acumulado de forma gradual sobre la

herramienta. Al hacerse más grande esta viruta se vuelve inestable y finalmente se rompe. Este borde acumulado se observa con frecuencia en la práctica, y es uno de los factores que afecta de manera más adversa el acabado superficial de la pieza de trabajo. A medida que aumenta la velocidad de corte disminuye el tamaño del borde acumulado.

## 1.2. Descripción del Acero AISI 01.

Para el estudio del mecanismo de desgaste de las herramientas de corte se seleccionó como material de trabajo al acero AISI 01 (o ASSAB DF2), este es un material que por sus propiedades mecánicas, es ampliamente utilizado en el sector industrial como un acero herramental[1]. Para poder mecanizar este material, es necesario conocer las propiedades mecánicas con el fin de establecer el tipo de acero y cuáles son las condiciones ideales para el proceso de corte.

[1] Aceros no deformables empleados para la elaboración de herramientas con fines generales, especialmente en matrices y punzones.

### 1.2.1. Información General.

El acero AISI 01 es un acero versátil templable en aceite apto para una gran variedad de aplicaciones de trabajo en frío. Su composición química, conformada principalmente por: manganeso, cromo y tungsteno, le otorga al material una buena maquinabilidad, estabilidad dimensional en el temple y una buena combinación de dureza y resistencia tras temple y revenido. Adicionalmente posee wolframio y vanadio que reducen las altas temperaturas de trabajo.

Estas características se combinan para dar un acero adecuado para la fabricación de herramientas con buen tiempo de vida y producción económica.

El material es suministrado con una dureza de 190 HB aproximadamente.

**TABLA 1**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AISI 01/ASSAB DF2 (4).**

| | C | Si | Mn | Cr | W | V |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ASSAB DF2** | 0.9 | - | 1.2 | 0.5 | 0.5 | 0.1 |
| **AISI/SAE 01** | 0.85-0.95 | 0.20-0.40 | 1.00-1.30 | 0.40-0.60 | 0.40-0.60 | 0.2 |

Este acero puede ser empleado para una gran variedad de procesos de trabajo en frio, debido a que en su proceso de fabricación se lo ha sometido a varios tratamientos térmicos tales como: recocido, alivio de tensiones, endurecido, templado.

### 1.2.2. Aplicaciones.

Debido a sus propiedades mecánicas, el acero AISI 01 es un material que puede ser empleado como acero herramental para una amplia gama de aplicaciones de trabajo en frío.

**TABLA 2**

**APLICACIONES COMUNES PARA EL AISI 01 (5).**

| Herramientas para: | Espesor del Material | HRC |
|---|---|---|
| Corte<br>Troquelado, punzonado, tronzado, cizallado, desbastado. | Hasta 3 mm<br>3– 6 mm<br>6–10 mm | 60–62<br>56–60<br>54–56 |
| Cizallas para trabajar en Frio | | 54–60 |
| Herramientas de tronzado y desbardado | Caliente | 58–60 |
| para piezas de forja | Frio | 56–58 |
| Conformado<br>Doblar, acuñar, embutición profunda, repujado y conformado por estirado, | | 56–62 |
| Troqueles pequeños de acuñar en frío, expulsores, brocas y machos de roscar de tamaño pequeño y mediano. | | 56–60 |

### 1.2.3. Propiedades.

Para establecer las condiciones de corte de la pieza de trabajo, es necesario identificar las propiedades que posee dicho material y cuáles son las que más afectan al proceso de mecanización. Una de las características más importantes es la dureza del material, la guía técnica para torneado de la SandVik permite obtener los rangos de las condiciones de corte (Vc, ap y fn) y calidades de las herramientas más apropiadas según la dureza Brinell del material.

Se determinó la dureza de la pieza de trabajo mediante un ensayo de dureza a la penetración realizado en un durómetro Rockwell en la escala Rockwell B (HRB). Utilizando un Brale (esfera de punta de diamante) con una carga de 100 Kg se realizaron mediciones a lo largo de toda la sección transversal del material. De las mediciones registradas se obtuvo el valor promedio de la dureza, véase tabla 3.

**TABLA 3**

**DUREZA DEL ACERO AISI 01/ASSAB DF2 EN ESCALA HRB Y HB.**

| Nº Medición | HRB Rockwell B Bola 1/6 100 Kg |
|---|---|
| 1 | 89 |
| 2 | 90 |
| 3 | 88.3 |
| 4 | 91 |
| 5 | 90 |
| 6 | 92 |
| 7 | 89 |
| 8 | 88 |
| 9 | 87 |
| 10 | 88.8 |
| 11 | 90 |
| 12 | 94 |
| 13 | 87 |
| Promedio | 89.5 |
| HB Brinell Bola 10 mm 3000 Kg | 180 |

Además, se realizó un análisis metalográfico, véase la figura 1.8, el cual muestra la microestructura del material con un aumento de 100X. Se puede observar que el material presenta una microestructura de grano fino, con una distribución homogénea de perlita y ferrita

**FIGURA 1.8** METALOGRAFÍA DE MATERIAL DE LA PIEZA DE TRABAJO AISI 01 100X.

### 1.2.4. Recomendaciones para el Mecanizado del Acero AISI 01.

Para determinar las mejores condiciones de mecanizado se debe de identificar el tipo de material de la pieza de trabajo.

Los materiales utilizados para piezas se han dividido en seis grupos principales, según la norma ISO, y cada grupo tiene propiedades únicas en cuanto a maquinabilidad:

**FIGURA 1.9** CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE MECANIZACIÓN SEGÚN LA NORMA ISO (1).

ISO P: En este grupo se encuentran los aceros, es el más extenso del área de mecanizado, abarca materiales no aleados y de alta aleación, e incluye aceros fundidos y aceros inoxidables ferrítico y martensítico.

ISO M: Los aceros inoxidables son materiales aleados con un mínimo de 12% de cromo; otras aleaciones pueden incluir níquel y molibdeno.

ISO K: En este grupo se encuentran los aceros de fundición, este material produce viruta corta.

ISO N: En este grupo se encuentran los materiales férreos más blandos como el aluminio, cobre y latón.

ISO S: Este grupo está comprendido por las superaleaciones termorresistentes, incluyen un gran número de materiales de alta aleación con base de hierro, níquel, cobalto y titanio.

ISO H: Este grupo incluye los aceros con una dureza entre 45 y 65 HRC y también fundición en coquilla de alrededor de 400 y 600 HB.

Como el AISI 01 es un acero no templado de baja aleación, este se lo ubica dentro del grupo de los materiales ISO P. La maquinabilidad de este acero depende del contenido de la aleación y del tratamiento térmico que lo reviste de dureza. El mecanismo de desgaste más común para los materiales de éste grupo es la formación de cráteres de desgaste y el desgaste de flanco.

En el Apéndice B se muestra la tabla de los diversos materiales (calidades) de herramientas de corte acorde a la clasificación de la norma ISO para los aceros. El área azul, con código P, es

donde se encuentra el acero a mecanizar. El grupo que corresponde al ISO P generalmente se mecaniza con herramientas de calidades de metal duro y cermet con o sin recubrimiento.

## 1.3. Generalidades de la Herramienta de Corte.

Para que un proceso de mecanizado sea productivo es necesario que exista una buena correspondencia entre el material de la herramienta de corte (calidad) y la geometría de plaquita, con el material de la pieza que se debe mecanizar.

Otros parámetros, tales como los datos de corte, el recorrido de la herramienta, etc. Son también vitales para obtener un buen resultado.

Las herramientas de corte se pueden definir en base a su constitución, su forma y las condiciones de trabajo.

### 1.3.1. Según el Material del Cual Están Constituidas.

Un factor importante al momento de planificar una operación de mecanizado, es la selección de la calidad de la herramienta de corte. Por ello, es necesario un conocimiento básico de cada

uno de los materiales de las herramientas y de su rendimiento para realizar la selección correcta para cada aplicación.

Se debe tener en cuenta el tipo y forma de la pieza que se va a mecanizar, así como las condiciones de mecanizado y el nivel de calidad superficial que se requiere para cada operación.

**FIGURA 1.10** DIVERSAS CALIDADES DE INSERTOS (1).

Los materiales de la herramienta de corte tienen diversas combinaciones de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste, a partir de estas características las herramientas de corte se dividen en varias calidades con propiedades específicas. De manera general, un material de herramienta idóneo para una aplicación debe ser:

- Duro, resistente al desgaste de incidencia y a la deformación.
- Tenaz, resistente a rotura del núcleo.
- No reactivo en contacto con el material de la pieza.
- Químicamente estable, resistente a oxidación y difusión.
- Resistente a cambios repentinos de temperatura.

A continuación se realiza una breve descripción de las plaquitas más comunes empleadas para los procesos generales de torneado tomando como referencia la clasificación de las calidades elaborada por la SandVik.

Las herramientas de corte se pueden dividir en tres grupos.

**Metales Duros**

El metal duro es un material metalúrgico en polvo; un compuesto de partículas de carburo de tungsteno (WC) y un aglutinante rico en cobalto metálico (Co). Los metales duros para aplicaciones de mecanizado contienen más del 80% de fase WC dura. El carbo nitruro cúbico es otro componente

importante, especialmente en calidades de gradiente[2] sinterizado.

El cuerpo de metal duro se forma, mediante prensado del polvo o mediante técnicas de moldeo por inyección, para luego sinterizarlo hasta la densidad completa.

Las herramientas de metal duro pueden ser sin recubrimiento o con recubrimiento.

**Metal Duro sin Recubrimiento**

Estas calidades están compuestas por WC/Co o tienen un gran volumen de carbo nitruro cubico. Las aplicaciones típicas son: mecanizado de HRSA (superaleaciones termorresistentes) o de aleación de titanio y torneado de materiales templados a baja velocidad.

La velocidad de desgaste de las calidades de metal duro sin recubrimiento es rápida pero controlada, con acción autoafilante.

[2] Se utilizan mejorar la resistencia a la deformación plástica y la tenacidad del filo. El carbo nitruro cúbico concentrado en el filo mejora la resistencia al calor donde más se necesita. Más allá del filo, un aglutinante rico en estructura de carburo de tungsteno inhibe las fisuras y las fracturas por martillado de las virutas.

**Metal Duro con Recubrimiento**

Su especial combinación de resistencia al desgaste y tenacidad, le otorgan a estas herramientas una alta capacidad para adoptar formas complejas. Existen dos tipos de recubrimientos:

**Recubrimiento: CVD**

CVD es la abreviatura del Ingles Chemical Vapor Deposition, es decir, deposición química en fase de vapor. El recubrimiento CVD se crea mediante reacciones químicas a temperaturas de 700-1.050 °C. El recubrimiento CVD presenta alta resistencia al desgaste y excelente adherencia al metal duro.

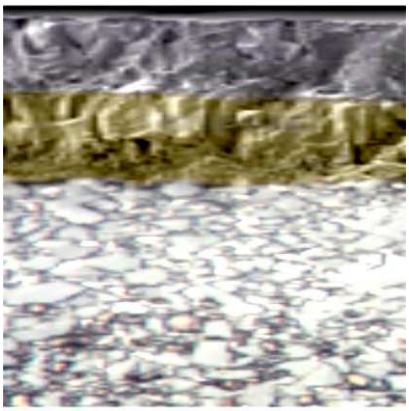


**FIGURA 1.11** VISTA DE CORTE DE UN INSERTO CON RECUBRIMIENTO CVD (1).

**Recubrimiento: PVD**

Los recubrimientos por deposición física en fase de vapor (PVD, del Inglés Physical Vapor Deposition) se forman a temperaturas relativamente bajas (400 - 600 °C). El proceso implica la evaporación de un metal que reacciona con, por ejemplo, nitrógeno para formar un recubrimiento duro de nitruro en la superficie de la herramienta.

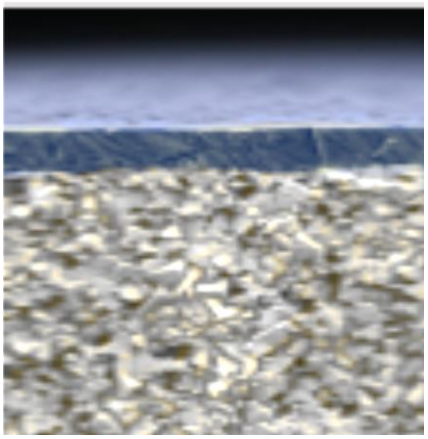


**FIGURA 1.12** VISTA DE CORTE DE UN INSERTO CON RECUBRIMIENTO PVD (1).

Los recubrimientos PVD aportan resistencia al desgaste gracias a su dureza. También añade tenacidad al filo y resistencia a roturas.

Las calidades con recubrimiento PVD se recomiendan cuando se necesita un filo tenaz y duro al mismo tiempo, y también para mecanizar materiales pastosos.

**Cermet**

Es un metal duro con partículas duras de base de titanio. Su nombre viene de combinar las palabras cerámica y metal. Originalmente, los cermets eran compuestos de TiC y níquel. Los cermets modernos no contienen níquel y tienen una estructura diseñada con un núcleo de partículas de carbo nitruro de titanio Ti(C,N), una segunda fase dura de (Ti,Nb,W)(C,N) y un aglutinante de cobalto rico en W.

El Ti(C,N) aporta resistencia al desgaste a esta calidad, la segunda fase dura incrementa la resistencia a la deformación plástica y la cantidad de cobalto controla la tenacidad.

Si se compara con el metal duro, el cermet tiene mejor resistencia al desgaste y menor tendencia al empastamiento. Por otro lado, presenta también menor resistencia a los cambios bruscos de temperatura. Los cermets también pueden

llevar recubrimiento PVD para mejorar la resistencia al desgaste.

**Cerámicas**

Presentan excelente resistencia al desgaste a elevadas velocidades de corte. Hay una variedad de calidades disponibles para diversas aplicaciones.

Cerámica de óxido: base de óxido de aluminio ($Al_2O_3$), con circonio ($ZrO_2$) añadido para inhibir fisuras. Esto genera un material que resulta muy estable químicamente, pero que carece de resistencia a los cambios bruscos de temperatura.

Cerámica mixta: con refuerzo de partículas mediante adición de carburo o carbo nitruro cubico (TiC, Ti(C,N)). De esta forma se mejora la tenacidad y la conductividad térmica.

Cerámica reforzada con filamentos: utiliza filamentos de carburo de silicio (SiC) para incrementar drásticamente la tenacidad y permitir el uso de refrigerante. La cerámica reforzada con filamentos resulta ideal para mecanizar aleaciones con base de Ni.

Cerámica de nitruro de silicio ($Si_3N_4$): representa otro grupo de materiales de cerámica. Tiene cristales alargados que forman un material auto reforzado de alta tenacidad. Las calidades de nitruro de silicio son favorables en fundición gris, pero la falta de estabilidad química limita su utilización en otros materiales.

**Nitruro de Boro Cúbico Policristalino, (NBC)**

Es un material con excelente resistencia térmica que se puede utilizar a elevadas velocidades de corte. Presenta buena tenacidad y resistencia a los cambios bruscos de temperatura.

Modernas calidades NBC son compuestos de cerámica con un contenido de NBC del 40-65%. El aglutinante cerámico aporta resistencia al desgaste químico al NBC. Otro grupo de calidades son las de alto contenido de NBC, desde un 85% hasta casi un 100% de NBC. Estas calidades pueden incorporar aglutinante metálico para mejorar su tenacidad.

Las calidades NBC se utilizan ampliamente en torneado en acabado de aceros templados, con una dureza superior a 45 HRC. Por encima de 55 HRC, el NBC es el único material de herramienta que puede sustituir a los métodos tradicionales de

rectificado. Los aceros más blandos, por debajo de 45 HRC, contienen mayor cantidad de ferrita, que afecta negativamente a la resistencia al desgaste del NBC.

**Diamante Policristalino, (DP)**

DP es un compuesto de partículas de diamante sinterizadas y un aglutinante metálico. El diamante es el material más duro que existe y, por tanto, el más resistente a la abrasión. Como herramienta de corte, presenta buena resistencia al desgaste pero carece de estabilidad química a alta temperatura y se disuelve con facilidad en hierro.

Las herramientas de DP están limitadas a materiales no férreos, como aluminio de alto contenido de silicio, compuestos con matriz metálica (MMC) y plásticos reforzados con fibra de carbono (CFRP). También es posible utilizar DP con refrigerante en aplicaciones de superacabado de titanio.

### 1.3.2. Según su Forma, Determinada por su Utilización.

La geometría de la herramienta de corte posee un rol importante al momento de la selección. Existe una diversidad de plaquitas con diferentes características geométricas que

pueden ser divididas en dos grandes grupos, plaquitas negativas y positivas. Las plaquitas negativas quedan inclinadas en el portaherramientas, como se ilustra en la figura 1.13. A continuación se indican algunas características de los dos tipos.

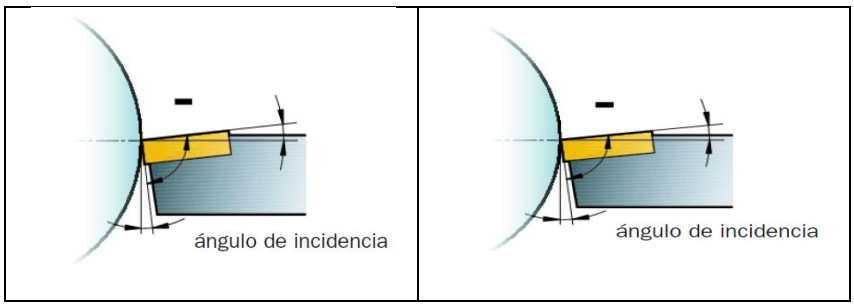



**FIGURA 1.13** COMPARACIÓN ENTRE PLAQUITAS POSITIVAS Y NEGATIVAS (1).

**Plaquitas Negativas**

- Doble cara[3] o una cara.
- Alta resistencia del filo.
- Incidencia cero.
- Primera elección para torneado exterior.
- Condiciones de mecanizado pesado.

[3] Ambas caras de la herramienta poseen filos de corte.

**Plaquitas Positivas**

- Una sola cara
- Fuerzas de corte bajas
- Incidencia lateral
- Primera elección para torneado interior y para torneado exterior de piezas delgadas.

**Forma de la Plaquita**

La forma de la plaquita se la selecciona según los requisitos de accesibilidad de la herramienta y del ángulo de punta. A mayor ángulo de punta, mayor será la resistencia y la fiabilidad. Pero mayor será la potencia requerida por la máquina y la tendencia a la vibración como se indica en la figura 1.14.

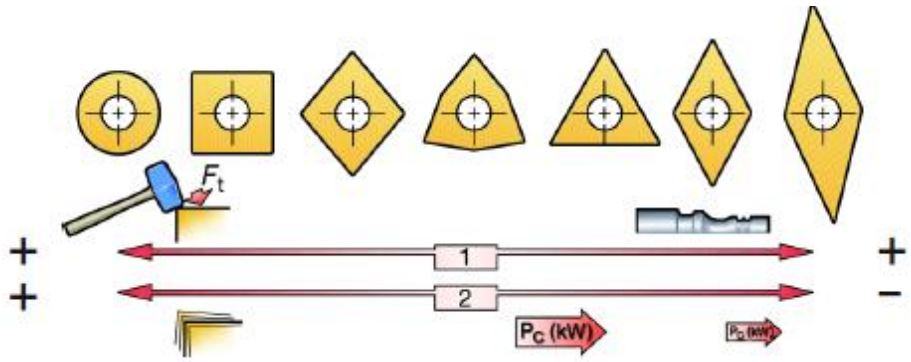



**FIGURA 1.14** COMPARACIÓN ENTRE PLAQUITAS DE DIVERSAS GEOMETRÍAS (1).

**Factores que Afectan la Elección de la Forma de la Plaquita**

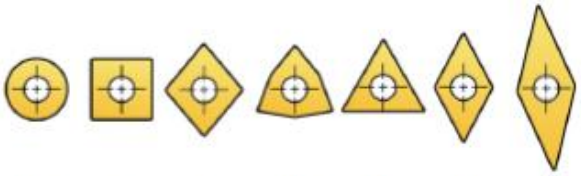
Existen una variedad de factores que intervienen en la selección de la forma de la plaquita. En el Apéndice C se presenta una tabla donde se comparan el desempeño de la herramienta de corte según su forma en función de las condiciones de la operación de mecanizado. En la tabla se puede observar que, para condiciones de desbaste y elevadas fuerzas de corte, las plaquitas con mayor ángulo de punta, como la forma circular o cuadrada, tienen un mejor desempeño, mientras que para operaciones de perfilado o refrentado se prefieren plaquitas rómbicas que poseen un menor ángulo de punta.

**Forma de la Plaquita, Número de Filos**

El número de filos de una plaquita varía en función del tipo y del ángulo de punta. Una plaquita con forma básica negativa suele tener el doble de filos que una plaquita positiva.

Para desbaste pesado se recomienda utilizar una plaquita de una sola cara y forma básica negativa para mejorar la estabilidad, pero para otras operaciones de desbaste se recomienda una plaquita de dos caras porque dispone del doble

de filos. La plaquita con mayor número de filos es la plaquita redonda.



| Forma básica | R | S | C | W | T | D | V |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Negativa Doble cara | *) ∞ | 8 | 4 | 6 | 6 | 4 | 4 |
| Una sola cara | ∞ | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | - |
| Positiva | ∞ | 4 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 |

**FIGURA 1.15** Nº DE FILOS SEGÚN LA FORMA DEL INSERTO (1).

**Radio de Punta**

El radio de punta $r_\varepsilon$ constituye un factor clave para las operaciones de torneado, ya que influye directamente sobre el acabado superficial, el tipo de viruta y la resistencia de la plaquita. Su selección depende de la profundidad de corte $a_p$ y del avance $f_n$. En la figura 1.16 se ilustran los resultados obtenidos para un radio de punta pequeño y un radio de punta grande.

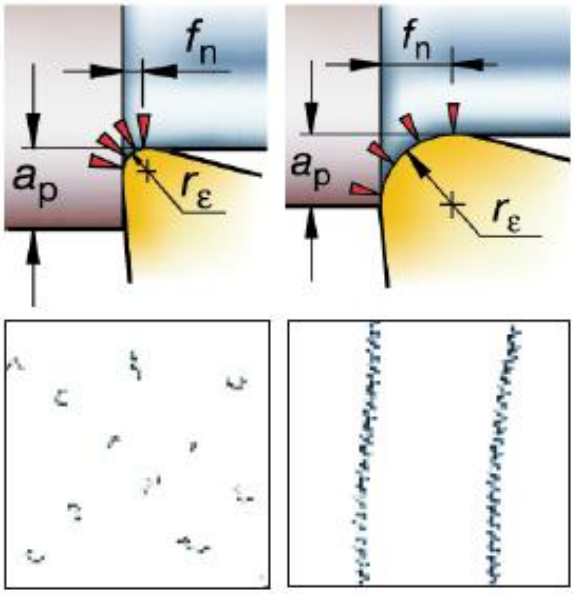



**FIGURA 1.16** TIPO DE VIRUTA OBTENIDO PARA UN RADIO DE PUNTA MAYOR Y UNO MENOR (1).

Radio de punta pequeño

- Ideal para profundidad de corte reducida
- Reduce la vibración
- Menor resistencia de la plaquita.

Radio de punta grande

- Velocidad de avance pesada
- Profundidad de corte amplia
- Filo más resistente
- Incremento de fuerzas radiales.

**Radio de Punta: Acabado Superficial y Avance**

En operaciones de torneado, el acabado superficial está estrechamente relacionado con el radio de punta y la velocidad de avance.

En la figura 1.17 se observan los surcos en la superficie de la pieza por el paso de la herramienta. El ancho y profundidad de estos surcos depende del avance y radio de punta de la herramienta

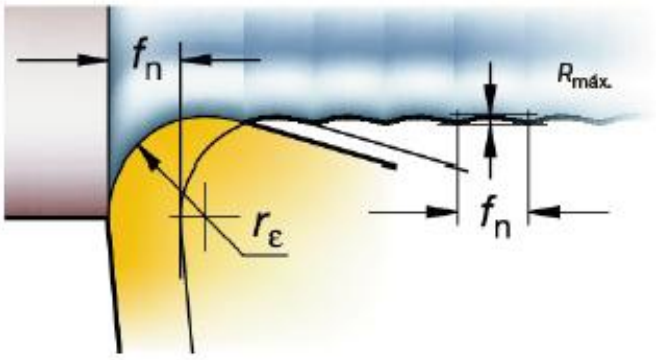



**FIGURA 1.17** ACABADO SUPERFICIAL EN FUNCIÓN DEL RADIO DE PUNTA (1).

### 1.3.3. Según sus Condiciones de Corte.

Las geometrías de las herramientas se las pueden dividir según las condiciones del torneado, que pueden ser: desbaste, mecanizado medio y acabado. En la figura 1.18 se indica el área de aplicación de cada geometría que se encuentra

definida por la rotura de la viruta (desbaste-medio-acabado) en función de la profundidad y el avance.

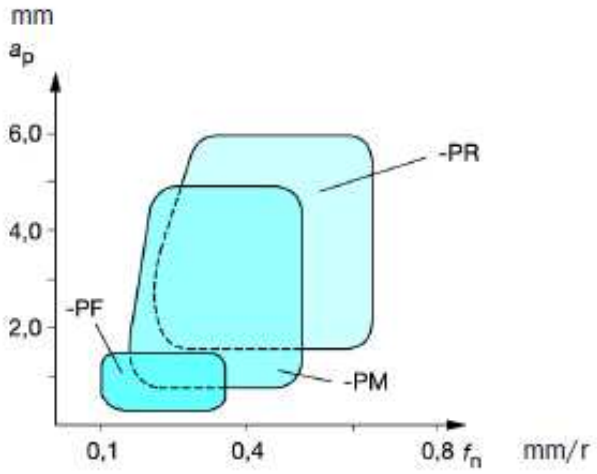



**FIGURA 1.18** ÁREA DE TRABAJO DE CADA GEOMETRÍA SEGÚN LAS CONDICIONES DE CORTE (1).

Desbaste – R

Combinaciones de elevada profundidad de corte y velocidad de avance. Operaciones que requieren la más alta seguridad del filo.

Medio – M

Operaciones medias y desbaste ligero. Amplia gama de combinaciones de profundidad de corte y velocidad de avance.

Acabado – F

Operaciones a profundidades de corte ligeras y avances bajos. Operaciones que requieren fuerzas de corte bajas.

## 1.4. Selección de la Herramienta de Corte.

El objetivo de este estudio es analizar el desgaste de flanco en las herramientas de corte considerando las diferencias que se presenten y establecer una metodología para determinar el tiempo de vida útil de las mismas. Con este fin, se seleccionaron dos insertos de distintas calidades. La experimentación se realizó en base a la norma ANSI/ASME B94.55M (6), esta norma establece las condiciones que se deben de cumplir durante los ensayos.

Para cada inserto se seleccionaron cuatro velocidades de corte cuyo desgaste y tiempo de vida se evaluó bajo las mismas condiciones (material de trabajo, profundidad y avance). También se realizaron ensayos para determinar el efecto que tiene la profundidad y el avance en la vida de la herramienta. Para ello, se efectuaron operaciones de torneado a velocidad constante variando la profundidad y el avance.

Los insertos fueron las herramientas de corte para torneado, estas ofrecen un mejor desempeño en el mecanizado. Como se mencionó anteriormente, los materiales que comúnmente se utilizan para los insertos son carburos, cerámicos y nitruro de boro cubico. Para poder realizar la selección de las herramientas de corte, se debieron establecer primero los parámetros que limitan el rango de las posibles herramientas a emplear. Este rango está definido por los diversos factores presentes en el proceso de mecanizado. A continuación se enuncian los factores que se debieron considerar para establecer las condiciones para el desarrollo del estudio.

### 1.4.1. Factores de Selección de la Herramienta de Corte.

- Tipo Operación a realizar: Para los ensayos de la vida útil en las herramientas corte, se realizaron pruebas en condiciones de desbaste medio y acabado para un proceso de cilindrado.

- Máquina herramienta a utilizar: Torno CNC de velocidad máxima del husillo de 2500 rpm.

- Condiciones y parámetros de corte: Se seleccionaron las condiciones de corte en concordancia con la capacidad de

la máquina herramienta y lo estipulado por la norma ANSI/ASME B94.55M (6), por ello, se eligieron condiciones de desbaste medio y acabado, de modo que las condiciones del mecanizado no sean demasiado severas y a la vez se encuentren dentro del margen general de las operaciones de torneado.

- Vibraciones: Excesivas vibraciones durante el proceso de remoción de material pueden generar impactos aleatorios entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte que provoquen el fallo prematuro de esta última. Con el fin de evitar excesivas vibraciones se descartan las herramientas de corte con ángulos de punta elevados.

- Forma y material de la pieza: Para condiciones de desbaste medio y acabado en aceros de baja aleación, se pueden seleccionar herramientas de metal duro con ángulos de punta pequeños

- Acabado que se requiere: El acabado superficial obtenido no es el objeto principal de este estudio, sin embargo, una de las formas que se empleó para determinar la influencia

de la velocidad de corte, del avance y la profundidad en el proceso de mecanizado fue mediante la inspección visual del acabado superficial para las diferentes condiciones de corte.

La selección del inserto se realizó conforme a las necesidades, utilizando como herramientas de corte insertos de la marca SandVik Coromant. Se debe tomar en consideración el porta inserto que se tenía a disposición en el banco de prueba. El sistema de sujeción de la herramienta fue mediante la fijación por palanca tipo P, con código PTGNR/L 2020K 16, la descripción de este sistema se lo detalla en el Apéndice D.

**Selección de Insertos**

En base a los factores antes mencionados, se seleccionaron los siguientes insertos:

**TABLA 4**

**HERREMIENTAS DE CORTE SELECCIONADAS.**

| INSERTO 1 | INSERTO 2 |
|---|---|
| TNMG-PF | TNMG-PM |
| TNMG 160412-PF<br>Calidad: CT5015 | TNMG 160408-PM<br>Calidad: GC4225 |

Para el inserto 1 se seleccionó una calidad de cermet de referencia TNMG 160412-PF CT5015 sin recubrimiento con resistencia a la formación de filos de aportación y a la deformación plástica. Posee una buena tenacidad, y es ideal para acabado de aceros de baja aleación y aceros aleados cuando se requiere una buena calidad. Su geometría está dada por TNMG 160412, que corresponde a una herramienta de forma triangular con ángulo de punta de 60°, ángulo de ataque 91°, ángulo de incidencia 0° (N) y radio de punta de 1.2mm.

Para el inserto 2 se seleccionó una calidad de metal duro de referencia TNMG 160408-PM GC4225, con un grueso recubrimiento del tipo CVD, constituido por MT-Ti(C,N)+$Al_2O_3$+TiN. Estos elementos le otorgan al material una mayor dureza lo que permite una mejor resistencia a la abrasión. Además, es químicamente inerte y tiene baja conductividad térmica, por ello es resistente a la formación de cráteres de desgaste. También actúa como barrera térmica para mejorar la resistencia a la deformación plástica. Este tipo de calidad se utiliza para operaciones que van desde el acabado hasta el desbaste, incluyendo la fundición de acero. Presenta un sustrato de dureza y tenacidad optimizadas para el

torneado de acero. Su geometría está dada por TNMG 160408, que corresponde a una herramienta de forma triangular con ángulo de punta de 60º, ángulo de ataque 91º, ángulo de incidencia 0º (N) y radio de punta de 0.8mm.

La descripción completa de los códigos de las herramientas seleccionadas se detalla en el Apéndice E.

**Selección de Parámetros de Corte**

Para determinar los parámetros de mecanización de cada inserto, se hizo una recopilación de las condiciones de corte recomendadas según el material de trabajo, la herramienta de corte y la norma ANSI/ASME B94.55 1985.

**TABLA 5**

**PARÁMETROS DE CORTE RECOMENDADOS PARA LA HERRAMIENTA DE CORTE POR LA SANDVIK (1).**

| **INSERTO 1. TNMG 16 04 12-PF CT5015** | |
|---|---|
| Profundidad ($a_p$), mm | 0.35-0.80-1.50 |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.15-0.25-0.50 |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 295-350 |
| **INSERTO 2. TNMG 16 04 08-PM GC4225** | |
| Profundidad ($a_p$), mm | 0.50-3.00-5.00 |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.15-0.30-0.50 |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 275-345-425 |

A partir de la dureza del material de trabajo (180 HB), se registraron los siguientes parámetros de corte recomendados por el fabricante según la calidad de las herramientas de corte.

**TABLA 6**
**PARÁMETROS DE CORTE RECOMENDADOS PARA EL MATERIAL DE TRABAJO POR LA SANDVIK (1).**

| **INSERTO 1. TNMG 16 04 12-PF CT5015** | |
|---|---|
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 480, 400, 320 |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.05, 0.1, 0.2 |
| **INSERTO 2. TNMG 16 04 08-PM GC4225** | |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 460, 305, 215 |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.1, 0.4, 0.8 |

Con el fin de lograr una mayor precisión en la medición del desgaste de la herramienta de corte, la norma ANSI/ASME B94.55 1985 establece que el proceso de corte debe de realizarse sin la presencia de fluidos refrigerantes. Además, recomienda que la profundidad no sea menor a dos veces el radio de punta de la herramienta de corte, ni mayor a diez veces el avance. El avance no debe exceder a 0.8 veces el radio de punta.

Se tomaron en consideración las condiciones establecidas por la norma. Sin embargo, las limitaciones de potencia de la máquina herramienta y las propiedades del inserto 1 (cermet),

no permitían profundidades de corte mayores a las recomendadas por el fabricante (1.5 mm).

A partir de las condiciones mencionadas, se seleccionaron las cuatro velocidades de corte, la profundidad y el avance, que se emplearon para determinar la ecuación de Taylor. Para determinar la influencia que tiene el avance y la profundidad en la vida de la herramienta de corte, se seleccionaron para ambos insertos una velocidad de corte, que se mantuvo constante, y dos valores de profundidad y avance que corresponden a operaciones de acabado y desbaste; de manera que se pudiera evaluar el desempeño de cada herramienta bajo estas dos condiciones y a la vez comparar los resultados obtenidos entre ellas.

**TABLA 7**

**PARÁMETROS DE CORTE SELECCIONADOS PARA EL DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE TAYLOR PARA EL INSERTO TNMG160412-PF CT5015.**

| Herramienta | TNMG160412-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nº Filo | F1 | F2 | F3 | F4 |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 295 | 350 | 400 | 480 |
| Profundidad ($a_p$), mm | 1.2 | | | |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.25 | | | |

## TABLA 8

**PARÁMETROS DE CORTE SELECCIONADOS PARA EL DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE TAYLOR PARA EL INSERTO TNMG1604 08-PM GC4225.**

| Herramienta | TNMG1604 08-PM GC4225 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nº Filo | F1 | F2 | F3 | F4 |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 215 | 305 | 345 | 460 |
| Profundidad ($a_p$), mm | 1.6 | | | |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.3 | | | |

## TABLA 9

**PARÁMETROS SELECCIONADOS PARA EVALUACIÓN DEL DESGASTE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD Y EL AVANCE.**

| Herramientas | TNMG1604 08-PM GC4225 TNMG160412-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nº Filo | F1 | F2 | F3 | F4 |
| Velocidad de corte ($V_c$), m/min | 305 | | | |
| Profundidad ($a_p$), mm | 0.5 | 0.5 | 1.5 | 1.5 |
| Avance ($f_n$), mm/r | 0.15 | 0.5 | 0.15 | 0.5 |

# CAPÍTULO 2

## 2. VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE, METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CRITERIOS DE DESGASTE.

Incrementos excesivos en el desgaste de la herramienta pueden ocasionar significativas alteraciones en el proceso de corte, que pueden incurrir en un aumento de vibraciones, fuerzas de corte, o temperaturas, que generan dificultades en el control dimensional y acabado superficial de las piezas producidas. Cuando las alteraciones provocadas por el desgaste en el sistema alcanzan valores críticos se dice que la herramienta ha alcanzado su vida útil. Así, la vida de una herramienta de corte se puede definir como un período durante el cual su desempeño mantiene ciertos parámetros previamente establecidos, cuyo término se define por un límite conocido como criterio de fin de vida, que está fijado en base a la alteración de una o más de las característica citadas anteriormente. Una alternativa muy utilizada para predecir el fin de vida de una herramienta de corte es el empleo de la ecuación de Taylor. Una

alternativa muy utilizada para predecir el fin de vida de una herramienta de corte es el empleo de la ecuación de Taylor. En el presente trabajo se plantea un procedimiento de ensayo relativo a vida de herramienta, en el que se diseñan los formatos necesarios que permitan el desarrollo de las pruebas mediante la caracterización del material de la pieza de trabajo, la caracterización del inserto de corte, proceso de mecanizado y resultados, para determinar las constantes de la ecuación de Taylor. Aportando además al proceso el tratamiento digital de las imágenes con el fin de cuantificar el desgaste. El proceso de mecanización experimental utilizado es el torneado, el cual permite establecer dicha vida útil mediante operación de cilindrado a velocidad constante para cada filo, midiendo el desgaste a intervalos establecidos y fijando un valor de este desgaste como criterio de duración de la herramienta.

## 2.1. Vida Útil de la Herramienta de Corte.

Durante operaciones de maquinado, las herramientas de corte se encuentran sometidas a: grandes esfuerzos, elevadas temperaturas de corte, deslizamiento de la viruta por la cara de ataque y deslizamiento de la herramienta por la superficie recién cortada. El ambiente agresivo provocado por estas condiciones genera un desgaste en la herramienta, lo que afecta en forma negativa su vida

útil, la calidad de la superficie maquinada y su exactitud dimensional, y en consecuencia la economía de las operaciones de corte.

A partir de estas condiciones se tienen 3 formas posibles en que la herramienta puede fallar:

1) **Falla por fractura:** Este modo ocurre cuando la fuerza de corte se hace excesiva en la punta de la herramienta, causando una falla repentina por fractura.

2) **Falla por temperatura:** Esta falla ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y perdida del filo en el borde.

3) **Desgaste gradual:** El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado y falla final de la herramienta por fractura o temperatura.

Las fallas por fractura y temperatura dan como resultado una perdida prematura de la herramienta de corte. Por lo tanto, estas dos formas de falla son indeseables. De las tres posibles formas de falla, es

preferible el desgaste gradual, debido a que este permite un mayor control en el proceso de mecanización, una mayor utilización de la herramienta, con la ventaja económica asociada a un uso más prolongado.

En general, el desgaste de la herramienta es un proceso gradual, y la rapidez con la que este ocurre depende de los materiales de la herramienta y de la pieza de trabajo, la forma de la herramienta, los fluidos de corte, los parámetros del proceso (como la velocidad de corte, avance y profundidad de corte) y de las características de la máquina herramienta. Hay dos tipos básicos de desgaste, que corresponde a dos regiones de una herramienta: desgaste de flanco y desgaste de cráter. En la figura 2.1 se ilustran los diferentes tipos de desgaste, y las zonas donde estos ocurren, para una herramienta de corte sencilla de un solo filo.

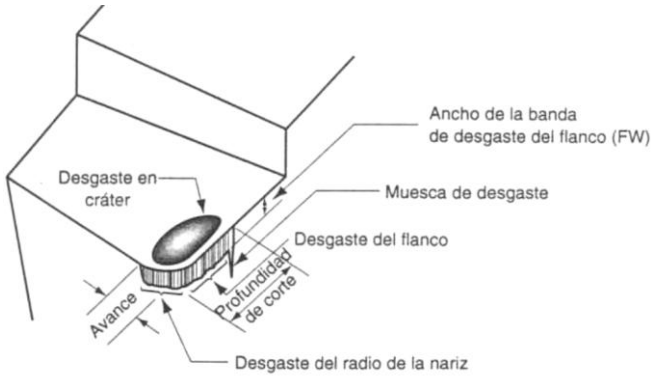



**FIGURA 2.1** DIAGRAMA DE UNA HERRAMIENTA DESGASTADA CON LAS PRINCIPALES ZONAS DONDE OCURRE EL DESGASTE (2).

**Desgaste de Cráter**

El desgaste de cráter se presenta en forma de una sección cóncava en la cara de ataque de la herramienta, que se origina por la acción de deslizamiento de la viruta sobre la superficie, esta interfaz herramienta-viruta está caracterizada por altos esfuerzos y temperaturas que contribuyen a la acción de desgaste. Los factores más importante que influyen sobre el desgaste de cráter son a) la temperatura en la interface herramientas – viruta, y b) la afinidad química entre los materiales de herramientas y piezas. Además, los factores que influyen sobre el desgaste de flanco también influyen sobre el desgaste de cráter. El desgaste de cráter se puede describir en términos de la difusión, por lo que la ubicación de la profundidad máxima de cráter coincide con el lugar de la temperatura máxima en la interface herramienta-viruta. El cráter puede medirse por su profundidad o su área.

El desgaste de flanco y cráter son las más importantes formas de medición del desgaste de las herramientas.

**Desgaste de Flanco**

El desgaste de flanco se presenta en la superficie de incidencia de la herramienta y en general se atribuye a dos factores: El frotamiento de

la herramienta sobre la superficie maquinada, que causa desgaste adhesivo y/o abrasivo, y a la alta temperatura, que afecta las propiedades del material de la herramienta y la superficie de la pieza. El desgaste de flanco se mide por el ancho de la banda de desgaste, Vb. A esta banda se la llama frecuentemente banda de desgaste.

El desgaste de flanco es comúnmente el método más empleado para el monitoreo del desgaste. De acuerdo con la norma ASME B94.55M, para mediciones del desgaste, se considera que el principal filo de corte está dividido en 3 regiones.

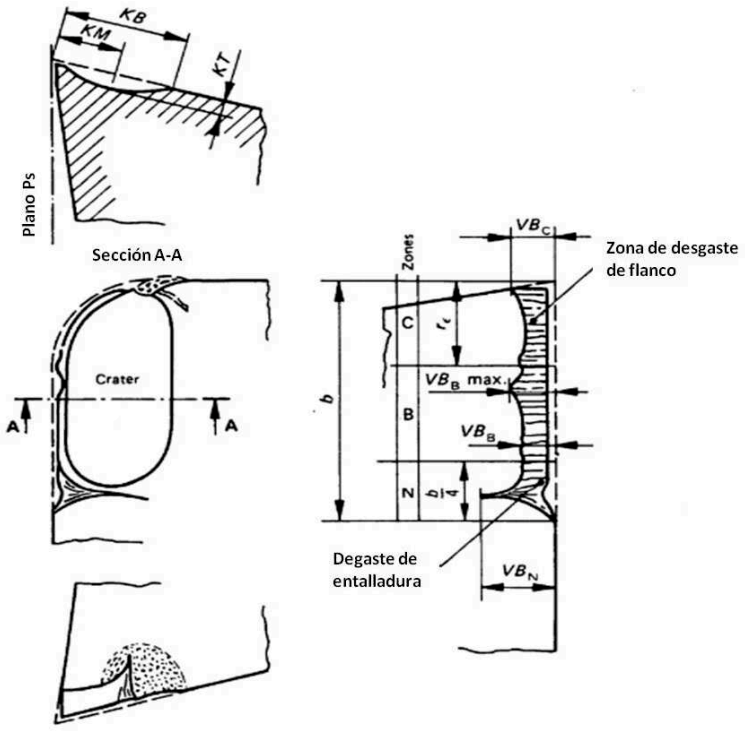



**FIGURA 2.2** ZONAS DE DESGASTE EN HERRAMIENTAS (6).

a. Zona C: Es la parte curva del filo de corte en la esquina de la herramienta.

b. Zona N: Representa la cuarta parte de la longitud del filo de corte b, es la zona más lejana de la esquina de la herramienta.

c. Zona B: Es la parte recta remanente que se encuentra entre la zona C y la zona N.

El ancho de la zona de desgaste de flanco debe de ser medido en la zona B perpendicular al principal filo de corte, el ancho debe de ser medido desde la ubicación original del principal filo de corte.

La profundidad de cráter KT debe de ser medido como la máxima distancia entre el fondo del cráter y la cara original de la superficie en la zona B.

Los mecanismos específicos que ocasionan el desgaste de la herramienta se pueden resumir como sigue:

**Abrasión:** El desgaste ocurre debido a la acción abrasiva de partículas duras del material de trabajo que desprenden pequeñas

porciones de la herramienta de corte. Esta acción abrasiva ocurre también en el degaste en cráter, pero predomina en el degaste del flanco.

**Adhesión:** Ocurre debido a las altas presiones y temperaturas presentes en la zona de contacto entre la viruta y la superficie de ataque de la herramienta. A medida que fluye la viruta, se desprenden pequeñas partículas de la herramienta, generando el desgaste.

**Difusión:** Ocurre en el límite de la herramienta-viruta y ocasiona que la superficie de la herramienta quede agotada debido a los átomos que imparte. Conforme este proceso continúa, la superficie de la herramienta se vuelve más susceptible a la abrasión y a la adhesión.

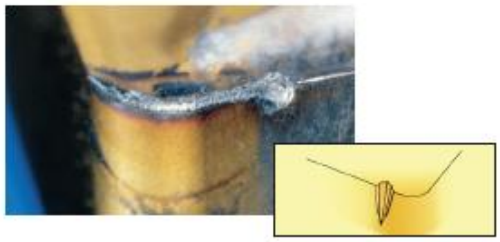
Se cree que la difusión es el principal mecanismo del desgaste en cráter.

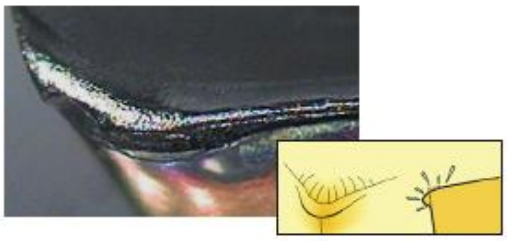
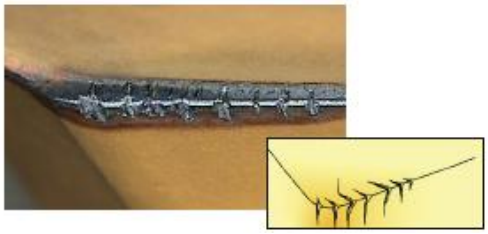
**Térmico:** Las fuerzas que actúan en el borde de corte a altas temperaturas hacen que este se deforme plásticamente, haciendo a la superficie de la herramienta más vulnerable a la abrasión. La deformación plástica contribuye principalmente al desgaste del flanco.

La mayoría de estos mecanismos de desgaste se aceleran a velocidades de corte y temperaturas más altas. En base a estos mecanismos la SANDVIK genera una clasificación complementaria de los tipos de desgaste que se pueden presentar durante un proceso de corte, y que pueden llevar al término de la vida útil de la herramienta.

**TABLA 10**

**TIPOS DE DESGASTES (1)**

| FILO DE APORTACIÓN | ADHESIVO |
|---|---|
| Se produce por soldadura de la viruta en la plaquita, debido a la presión. Resulta más habitual cuando se mecanizan materiales más pastosos como el acero de bajo contenido de carbono, acero inoxidable y aluminio. Una velocidad de corte baja incrementa la formación de filo de aportación. | |
| DESGASTE DE ENTALLADURA | ADHESIVO |
| Es un tipo especial de desgaste de flanco ubicado en la zona donde interseca el principal filo de corte con la superficie de la pieza de trabajo. Caracterizado por un daño excesivo y localizado tanto en la cara de desprendimiento como en el flanco de la plaquita en la línea de profundidad de corte. Está causado por adherencia (soldadura a presión de la viruta en la plaquita) y por superficie endurecida por deformación. |  |

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA | TÉRMICO |
|---|---|
| Se produce cuando el material de la herramienta se ablanda, esto ocurre si la temperatura de mecanizado es demasiado alta para una determinada calidad. En general, las calidades más duras y los recubrimientos más gruesos mejoran la resistencia al desgaste por deformación plástica. |  |
| FISURAS TÉRMICAS | TÉRMICO |
| Si la temperatura del filo cambia rápidamente entre frío y calor, pueden aparecer varias fisuras en dirección perpendicular al filo. Las fisuras térmicas están asociadas a los cortes intermitentes. |  |
| ASTILLAMIENTO | MECÁNICO |
| Es el resultado de una sobrecarga de tensión mecánica, esta tensión puede estar producida por distintas causas, como el martillado de virutas, profundidad de corte o avance demasiado elevados, incrustaciones de arena en el material de la pieza, filo de aportación, vibraciones o desgaste excesivo de la plaquita. | |

### 2.1.1. Ecuación de Taylor.

A medida que se realiza el maquinado, los diferentes mecanismos de desgaste originan mayores niveles de desgaste en la herramienta. En la figura 2.3 se ilustra la relación general para el desgaste de la herramienta en función del tiempo de

corte, y la evolución del desgaste de flanco en función del tiempo de mecanizado para diferentes velocidades de corte.

Aunque la relación se ilustra para el desgaste de flanco, se tiene un comportamiento similar para el desgaste de cráter.

Generalmente se pueden identificar tres regiones. La primera corresponde al período del rompimiento inicial en la que el borde cortante se desgasta rápidamente al entrar en contacto con la pieza. A este periodo le sigue un desgaste a una velocidad aproximadamente uniforme y se le llama la región de desgaste de estado estable. En la gráfica, esta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta.

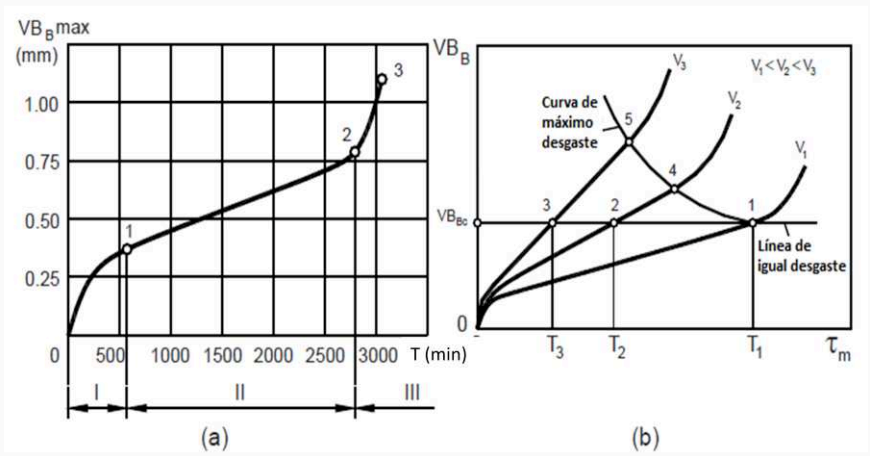



**FIGURA 2.3** CURVAS DE DESGASTE: (a) FORMA GENERAL DE LA CURVA DE DESGASTE. (b) DESGASTE DE FLANCO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE CORTE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE (8).

Finalmente, el desgaste alcanza un nivel donde su velocidad empieza a acelerar. Esto marca el principio de la región de falla, en la cual las temperaturas de corte son más altas y la eficiencia general del proceso de maquinado se reduce. Si estas condiciones continúan, la herramienta finalmente fallará por temperatura o por fractura.

La pendiente de la curva de desgaste de la herramienta en la región de estado estable se ve afectada por el material de trabajo y las condiciones de corte. Materiales de trabajo duros, incrementos de la velocidad, avance y profundidad de corte ocasionan que se incremente la velocidad de desgaste (la pendiente de la curva). De todos estos parámetros, la velocidad es la más importante. En la figura 2.3 aparecen las curvas de desgaste para diferentes velocidades. Al aumentar las velocidades de corte incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menor tiempo.

Se puede definir la vida de la herramienta de corte como la extensión de tiempo de corte en que se puede usar la herramienta. Una forma cuantificable para definir la vida útil de una herramienta es estableciendo un nivel de desgaste como criterio de desgaste. Un criterio conveniente es un cierto valor

de desgaste. Este criterio se ilustra la gráfica como una línea horizontal. Cuando unas de las curvas de desgaste intersecan la línea horizontal de referencia, se define que la vida de las herramientas correspondientes ha terminado. Si los puntos de intersección se proyectan sobre el eje del tiempo se puede identificar los valores de la vida de la herramienta.

**Ecuación de Taylor para la Vida de las Herramientas.**

En un estudio clásico publicado por F.W. Taylor se demostró que la $V_C$ mantiene una relación exponencial con el tiempo de vida útil de la herramienta. De manera que si los valores de vida de la herramienta para las curvas de desgaste expuestas en la figura 2.3 se trazan en una grafica log-log de velocidad de corte contra la vida de las herramientas, la relación resultante es una línea recta como se muestra en la figura 2.4.

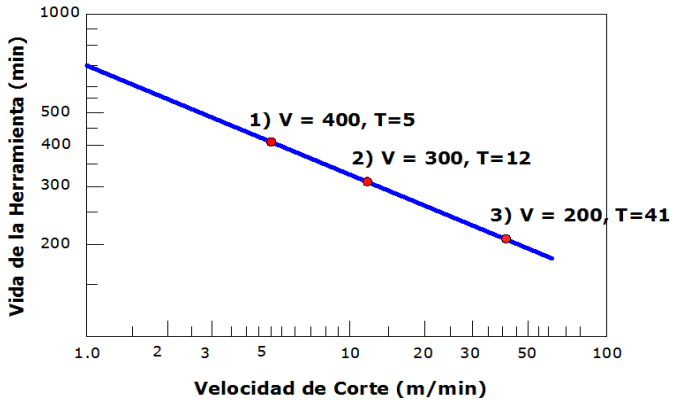



**FIGURA 2.4** GRÁFICA EN ESCALA LOG-LOG DE LA VELOCIDAD DE CORTE CONTRA LA VIDA DE LA HERRAMIENTA (2).

Esta relación se puede expresar, para un rango limitado de velocidades, en forma de ecuación de Taylor para la vida de una herramienta:

$$VT^n = C \qquad \text{(Ec. 13)}$$

En donde $V$ es la velocidad de corte en m/min, $T$ es el tiempo de vida en minutos que tarda en cumplirse la vida útil de la herramienta, $n$ es un exponente que depende de las condiciones de corte, así como de las propiedades de los materiales. $C$ es la velocidad de corte que corresponde a un tiempo de vida de 1 minuto. Tanto $C$ como $n$ se determinan experimentalmente. Los límites de los valores de n, observados en la práctica, se encuentran en la tabla 11.

**TABLA 11**

**LÍMITES DE LOS VALORES DE "n" PARA DIVERSOS MATERIALES DE CORTE (7)**

| | |
|---|---|
| Aceros rápidos | 0.08-0.02 |
| Aleaciones fundidas | 0.1-0.15 |
| Carburos | 0.2-0.5 |
| Cerámicas | 0.5-0.7 |

## 2.2. Criterios de Desgaste de la Herramienta de Corte.

Como se había mencionado anteriormente, los criterios de desgaste nos permiten definir de manera cuantificable el tiempo de vida útil de una herramienta al establecer niveles de desgastes permisibles. La norma ANSI/ASME B94.5M recomienda como criterio de desgaste, para procesos de torneado en seco, usando insertos de carburo (o metal duro) como herramientas de corte, los siguientes valores para desgaste de flanco y de cráter.

1. $VB_B$ = 0.3 mm.
2. $VB_B$, max = 0.6 mm, si el desgaste es irregular.
3. KT = 0.06 + 0.3 f.

Por lo general $VB_B$ se selecciona en el rango de 0.15 a 1.00 mm (8), dependiendo de la tipo de operación de mecanizado, la condición de la máquina herramienta y la calidad necesidades de la operación. En la tabla 12 se presentan algunos valores referenciales de desgaste de flanco en función del tipo de operación y del material de la herramienta que son empleados comúnmente como criterios de desgaste.

**TABLA 12**

**RECOMENDACIONES GENERALES EMPLEADAS EN LA PRÁCTICA INDUSTRIAL PARA EL LÍMITE DEL DESGASTE DE FLANCO (8).**

| Material de la Herramienta / Operación | (mm) | Carburos Cementados | Carburos Recubiertos |
|---|---|---|---|
| Desbaste | $VB_B$ | 0.3-1.0 | 0.3-1.0 |
| Acabado | $VB_B$ | 0.1-0.25 | 0.1-0.25 |

Otra alternativa para establecer el término de la vida útil es a partir del acabado superficial. La rugosidad en la pieza de trabajo es un criterio común en acabado para procesos de torneado, y de acuerdo con la norma ANSI BP46.1-1978, los siguientes valores son preferidos.

Acabado ⟵⟶ Desbaste

0.4 – 0.8 – 1.6 – 3.2 – 6.3 – 12.5 µm

### 2.2.1. Selección de los Criterios del Desgaste.

Se seleccionó al desgaste de flanco como criterio para la determinación de la vida útil de las herramientas. A este criterio es al que mayor énfasis se le ha dado por su influencia en las dimensiones finales de la pieza mecanizada y en el incremento

de la vibración. El desgaste de cráter también genera alteraciones importantes en el proceso de corte debido al cambio en el ángulo de desprendimiento y el área de contacto con la viruta, además del debilitamiento de la herramienta. Sin embargo, el estudio del desgaste de cráter no ha sido abordado tan detalladamente, a pesar de su importancia en el debilitamiento de la herramienta, por dificultades en la medición de la profundidad de cráter.

## 2.3. Metodología para el Análisis del Desgaste.

Para el desarrollo de la experimentación, se realizaron operaciones de cilindrado, sin fluido de corte, manteniendo fijo los valores establecidos en las tablas 7 y 8, usando probetas normalizadas según lo estable la ANSI/ASME B94.5M (6), manteniendo siempre la relación (longitud mecanizada / diámetro > 10). El ensayo se dividió en dos grupos de tareas: las primeras, de mecanizado y las segundas, de metrología y control del ensayo. Las tareas de mecanizado consistieron en la programación del centro de torneado, montaje y desmontaje de la pieza de trabajo a través de mordazas y contrapunto, y la realización del maquinado. Las tareas relacionadas a la metrología y control, estuvieron formadas por las mediciones a las piezas de trabajo, cálculos de las velocidades de corte y tiempos

de mecanizado para las condiciones establecidas, adecuación del sistema óptico, toma de las imágenes de desgaste del flanco principal del inserto, y medición del desgaste de flanco presentado hasta alcanzar el criterio de vida; y registro de la información recolectada en los formatos respectivos. Para el manejo de las imágenes y medición del desgaste, se tomaron fotografías que fueron manipuladas mediante el software AxioVision 4.8®.

### 2.3.1. Medición del Desgaste de la Herramienta de Corte.

Para el desarrollo de los dos grupos de tareas comprendidas en el ensayo, se realizaron los siguientes procesos de manera secuencial:

a) Se identificaron los filos de los insertos, para cada una de las velocidades de corte.

b) Se adecuó el sistema óptico formado por estéreo microscopio, cámara, iluminación, sistema de fijación del inserto.

c) Se inspeccionó el estado del filo de corte antes del inicio de cada prueba, a través del sistema óptico, lo cual servía de

referencia para las posteriores mediciones de desgaste del flanco.

d) Se realizó el orificio central en forma de cono para la ubicación del contrapunto sobre cada pieza de trabajo, en un torno convencional.

e) Se realiza el montaje del inserto en el portaherramientas, realizándose una limpieza previa del asiento del inserto mediante aire comprimido, para garantizar su adecuada fijación a la torreta del centro de torneado.

f) Se efectuó el montaje de la pieza de trabajo entre las mordazas.

g) Se programó el torno CNC, efectuando la operación de cilindrado.

h) Se limpia el inserto empleando un chorro de aire comprimido para su desmontaje.

i) Se traslada el inserto al estéreo microscopio para su análisis.

j) Se realiza el montaje del inserto en el dispositivo de sujeción, diseñado y construido de forma que permita que la pastilla conserve la misma posición, al retirarse e instalarse sucesivas veces. Véase la figura 2.7.

k) Se lleva a cabo la adquisición de la imagen de desgaste del flanco presentado en el filo de corte principal.

l) Se desmonta el inserto del dispositivo de sujeción.

m) Se traslada el inserto al Laboratorio de mecanización.

n) Se continúa el mecanizado para el intervalo de tiempo de la siguiente medición de desgaste, hasta alcanzar el criterio de desgaste establecido.

o) Se realiza el respectivo registro de los datos de la prueba.

**Procesamiento de Imágenes de Desgaste**

El sistema implementado para el procesamiento digital de las imágenes de desgaste, que permite determinar el ancho medio del desgaste de flanco en insertos intercambiables de corte,

lleva a cabo las siguientes etapas: adquisición, almacenamiento, procesamiento y presentación de imágenes.

Para el análisis y medición del desgaste de flanco en los insertos se empleó el software AxioVision 4.8®. Este programa permite establecer una escala de referencia en la imagen, a partir de la cual se puede medir el valor del ancho de la banda de desgaste generado y la distancia a la que este ocurre con una precisión de centésimas de milímetro.

### 2.3.2. Descripción de los Equipos.

Las pruebas de mecanizado fueron realizadas en un centro de torneado CNC, ver figura 2.5, marca Dalian Machine Tool modelo CKE6136Z, de velocidad máxima de husillo de 2500 rpm; ubicado en el Centro Avanzado de Mecanizado y Prototipo Rápido (CAMPRO), donde se realizaron sucesivos torneados externos a la pieza de trabajo fijando las condiciones de corte establecidas, por medio de un programa de control numérico en lenguaje G.

**FIGURA 2. 5** CENTRO DE TORNEADO.

Para la adquisición de las imágenes, el dispositivo empleado es una cámara digital marca Sony cybershot de 10.1 megapixeles, con resolución de 640 x 480 elementos. La cámara se montó sobre un estéreo microscopio marca Carl Zeiss modelo Stemi 1000 ubicado en el centro de servicios para la acuicultura (CSA); se empleó uno de los oculares del estéreo microscopio, el cual se acondicionó para que el sensor de la cámara estuviera paralelo a la superficie donde se mide el desgaste. Se dispuso de un sistema de iluminación con una lámpara incandescente. También se realizó el montaje del sistema de sujeción del inserto. Véase las figuras 2.6, 2.7.

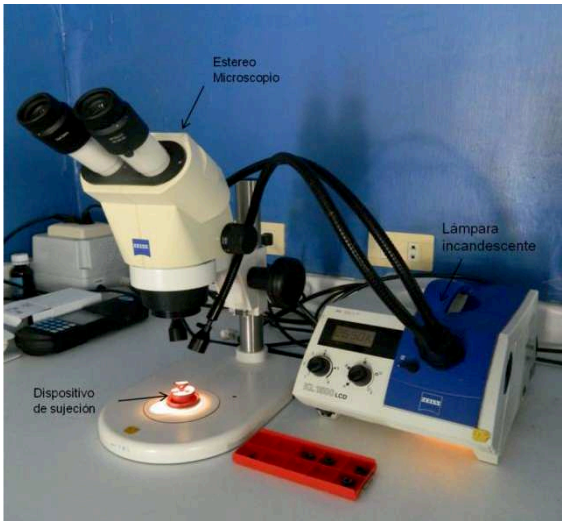



**FIGURA 2. 6** ELEMENTOS DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.

**FIGURA 2. 7** DISPOSITIVO DE SUJECIÓN DEL INSERTO.

### 2.3.3. Proceso de Evaluación del Desgaste.

Antes de comenzar los ensayos, se verificó que tanto el torno, como la pieza de trabajo y la herramienta se encontraban en adecuadas condiciones. Las mediciones del desgaste se realizaron en considerables intervalos de tiempo, de manera

que existiera una variación significativa del desgaste. Todos los datos obtenidos se registraron en las hojas de datos “Mediciones del Desgaste de Flanco” ubicadas en el Apéndice G. Los resultados obtenidos se presentaron en las gráficas desgaste de la herramienta (ordenada) versus tiempo (abscisa), como se ilustra en la figura 2.3, donde para cada gráfica, se muestran más de cinco puntos experimentales como lo establece la norma. Los resultados del tiempo de vida útil de la herramienta se obtuvieron a partir de la interpolación de los puntos determinados experimentalmente. Finalmente, los resultados obtenidos del conjunto de pruebas fueron presentados en una gráfica con escala logarítmica de velocidad versus tiempo de vida.

# CAPÍTULO 3

## 3. REGISTRO Y REPORTE DE RESULTADOS.

Los resultados de la experimentación registrados en las hojas de datos "Mediciones del desgaste de flanco" fueron manipulados para la obtención de las curvas de desgaste mediante el software Matlab R2008a®, ver apéndice H. Para el tratamiento de los datos cuantitativos se construyeron curvas suavizadas. Hay cierta cantidad de error desconocido asociado con cada medición, y la curva continua suavizada que se obtiene se diseña para que se aproxime al resultado teórico en condiciones ideales y mediciones muy precisas.

Igualmente se utilizó Matlab R2008a® para la presentación de la linealización de curva de Taylor.

Para comparar los valores de volumen del material removido para las diferentes condiciones y herramientas de corte se utilizan gráficos de barras.

## 3.1. Linealización de la Curva de Taylor

Para obtener la curva de Taylor, primero se requiere medir el desgaste de flanco versus el tiempo de mecanizado para las diferentes velocidades de corte. Estas proporcionan curvas de desgaste del flanco como se muestra en la figura 2.3.

Para el caso del cermet, TNMG160412-PF CT5015, en principio se seleccionó como valor del criterio de fin de vida de herramienta para el ancho medio de la banda de desgaste del flanco, $VB_B$ =0,3 mm según las recomendaciones de la norma ANSI/ASME B94.5M, sin embargo, en base a los resultados y el análisis microscópico efectuado a los insertos, existe un fuerte indicativo que el desgaste $VB_B$ =0,19 mm ya representa un valor crítico, pues a partir de ahí, se desgasta rápidamente.

En el presente trabajo fue asumido como criterio de desgaste de flanco para los filos del cermet $VB_B$= 0,19 mm teniendo en cuenta los resultados experimentales, las recomendaciones usadas en práctica

industrial y que se trata de una operación con parámetros de acabado y alta velocidad de corte.

El criterio de desgaste de flanco para el metal duro recubierto TNMG160408-PM GC4225 se estableció bajo un valor predeterminado de una medida de desgaste de la herramienta de $VB_B$ =0,3 mm según la norma ANSI/ASME B94.5M (6).

Para construir la curva de vida, fueron seleccionados los resultados correspondientes a los tiempos de mecanizado para cada una de las velocidades al criterio de desgaste de flanco.

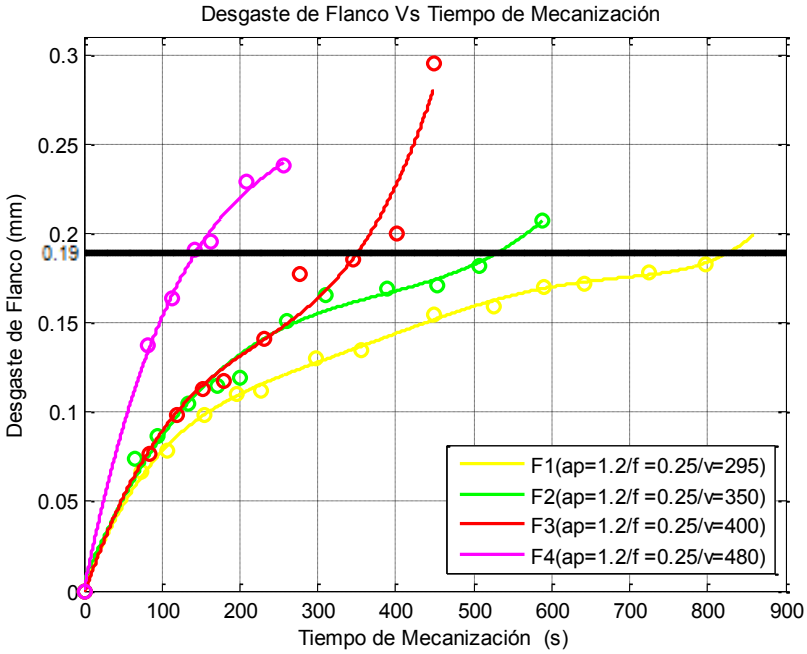
Trazar las coordenadas (V, T) en una escala doble logarítmica, velocidad de corte versus vida de la herramienta (el mismo módulo a lo largo de dos ejes) va a producir una curva V-T, como se muestra en la figura 2.4.

El modelo matemático para esta parte lineal de la curva está dado por la ecuación reducida de Taylor.

El método empleado para la determinación de n y C (constantes de Taylor) es Regresión Lineal.

## 3.2. Análisis del Desgaste de Flanco (VB) para Diferentes Velocidades de Corte.

Las curvas de la gráfica 3.1 se obtienen a partir de los parámetros de corte anteriormente seleccionados para cada filo (ver tabla 7).

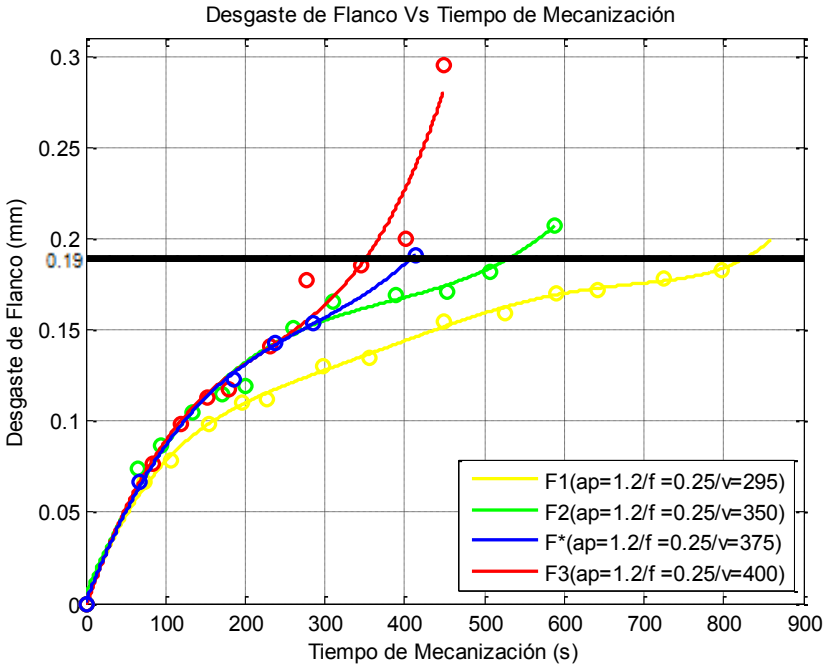



**GRÁFICA 3.1** DESGASTE DE FLANCO (VB) DE LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE.

El desgaste de flanco para el F4, en el cual la velocidad de corte fue la más severa (480 m/min), alcanzó el criterio de desgaste en 2.40 minutos. Una de las restricciones de la norma ANSI/ASME B94.55M es el tiempo que debe operar la herramienta antes de que llegue a su

vida útil. Las velocidades de corte deben ser escogidas de tal manera que la vida útil de la herramienta a la velocidad más alta no sea menor de 5 min (6). Por tal motivo se restableció el parámetro de la velocidad de corte seleccionado, y se realizaron nuevas pruebas con velocidad de corte de 375m/min que corresponde al filo F*.

Finalmente, las curvas de desgaste escogidas para la construcción de la curva de Taylor de la herramienta 1, TNMG160412-PF CT5015, son las que se muestran a continuación.




**GRÁFICA 3.2** CURVAS FINALES DE DESGASTE DE FLANCO (VB) DE LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE.

Se observa la influencia que tiene la velocidad de corte en el tiempo de vida de la herramienta. A mayor velocidad de corte menos tiempo de vida útil.

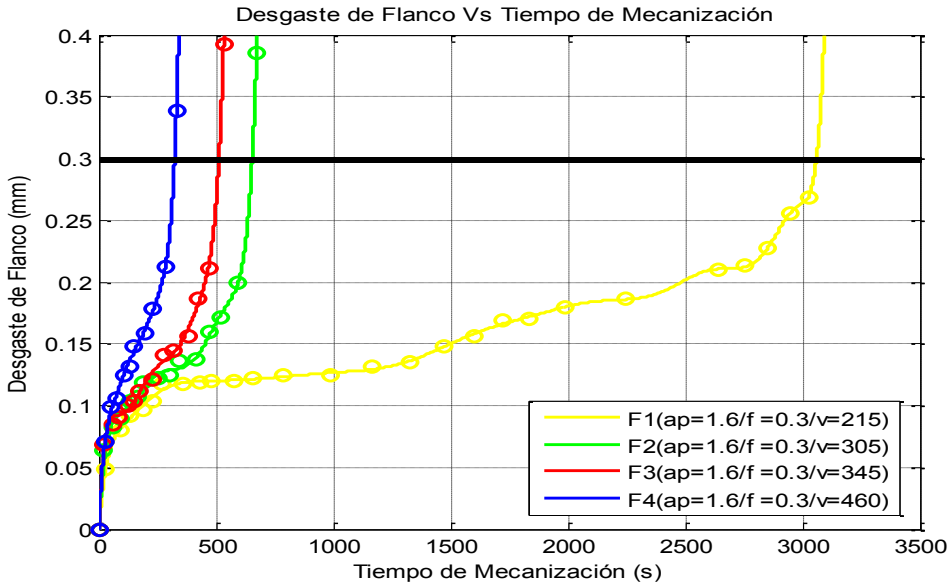
Se comprobó la tendencia característica del comportamiento por regiones de las curvas de desgaste del flanco contra tiempo de mecanizado.

En las curvas de desgaste de flanco para las velocidades de 350, 375 y 400 m/min. Durante los primeros 4 min, las curvas casi coinciden. El intervalo de velocidades no afecta considerablemente en el primer tramo de las curvas de desgaste, por ello, no se puede evidenciar el desarrollo característico de cada una de las curvas.

El desgaste de flanco del inserto TNMG160412-PF CT5015 fue regular y se midió en la zona B.

Los filos del corte del cermet, además de presentar desgaste de flanco, mostraron desgaste de cráter (ver apéndice I), lo cual influenció al debilitamiento de la herramienta. Este fenómeno más la combinación de las bruscas y repetidas entradas del inserto de corte en la pieza de trabajo aceleraron de manera significativa el proceso

de desgaste. Terminando su vida útil inmediatamente después del criterio establecido con fractura o astillamiento.




**GRÁFICA 3.3** CURVAS DE DESGASTE DE FLANCO (VB) DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE.

En la gráfica 3.3 se observa que a velocidades moderadas la región de estado estable de desgaste se mantiene por un periodo más prolongado que a velocidades de corte altas.

En el metal duro recubierto, se comprobó el desgaste de entalladura con la presencia de viruta fundida en el filo (ver apéndice I), el cual produce un aumento de fuerzas (9). La vida útil de la herramienta se

ve limitada por un gran desgaste en entalladura, sin embargo cuando se inicia no representa una justificación suficiente para el término de la vida.

Las hojas de datos que pertenecen a los filos de cada herramienta para la obtención de las curvas de desgaste de flanco se muestran en el apéndice G.

En el apéndice I se presenta las fotografías de la evolución del desgaste para filos representativos de cada herramienta.

### 3.3. Curvas Velocidad de Corte vs. Tiempo de Mecanización para Desgaste de Flanco Crítico de la Herramienta 1

Las curvas velocidad de corte vs. Tiempo de mecanización para desgaste de flanco crítico graficadas en un sistema log-log resultan en una línea recta.

Para determinar las constantes de la ecuación de Taylor se utiliza un análisis de regresión, el cual es un método estadístico que adapta la mejor línea de un conjunto de datos.

Mediante una transformación lineal, tomando logaritmos de cada lado de la Ecuación de Taylor resulta:

$$VT^n = C$$

$$Log\ V + nlogT = logC \qquad \text{(Ec. 14)}$$

Considerando x=logv, y=logT, n= -1/k, para los cálculos de la regresión lineal $y = a + k(x - \bar{x})$ se tiene:

$\bar{x}$=Σx/No, $\bar{y}$=Σy/No; No = Número de observaciones experimentales.

$$a = k(x - logC) = \bar{y} \qquad \text{(Ec. 15)}$$

$$k = \frac{\Sigma xy - \Sigma x.\Sigma y/No}{\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2/No} \qquad \text{(Ec.16)}$$

$$\log C = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{k} \qquad \text{(Ec. 17)}$$

**TABLA 13**

**TABLA PARA EL CÁLCULO DE REGRESIÓN LINEAL PARA TNMG160412-PF CT5015**

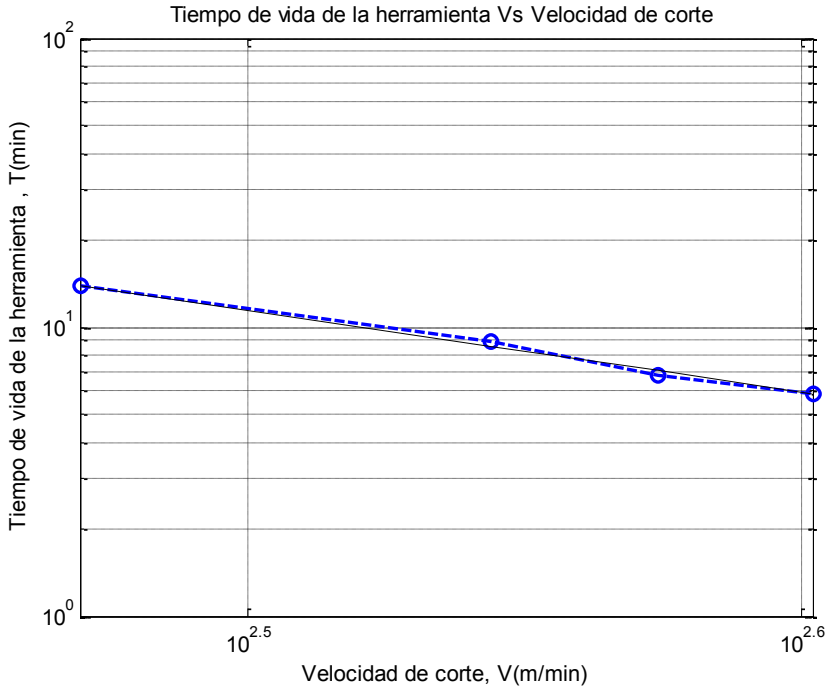
| No | V m/min | T min | x=logv | y= logT | Xy | $x^2$ | $y^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 295 | 13.85 | 2.47 | 1.14 | 2.82 | 6.1 | 1.3 |
| 2 | 350 | 8.91 | 2.54 | 0.95 | 2.42 | 6.47 | 0.9 |
| 3 | 375 | 6.85 | 2.57 | 0.84 | 2.15 | 6.63 | 0.7 |
| 4 | 400 | 5.87 | 2.6 | 0.77 | 2 | 6.77 | 0.59 |
| **Σ** | | | Σx=10.19 | Σ y=3.70 | Σxy= 9.39 | $\Sigma x^2$ =25.97 | $\Sigma y^2$ =3.49 |
| | | $(\Sigma x)^2$ =103.84 | | ΣxΣy =37.66 | | | |
| | | $(\Sigma x)^2$/No= 25.96 | | (ΣxΣy)/No=9.41 | | | |

El procesamiento de datos da como resultado la tabla 14, donde se encuentran las constantes de Taylor para la herramienta 1.

**TABLA 14**

**CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE TAYLOR PARA LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015**

| |
|---|
| $\bar{x}$= 2.55<br>$\bar{y}$ = 0.92 |
| k= -2.86<br>**n**=-1/k=0.35 |
| log C=2.87<br>**C**=742.80 |

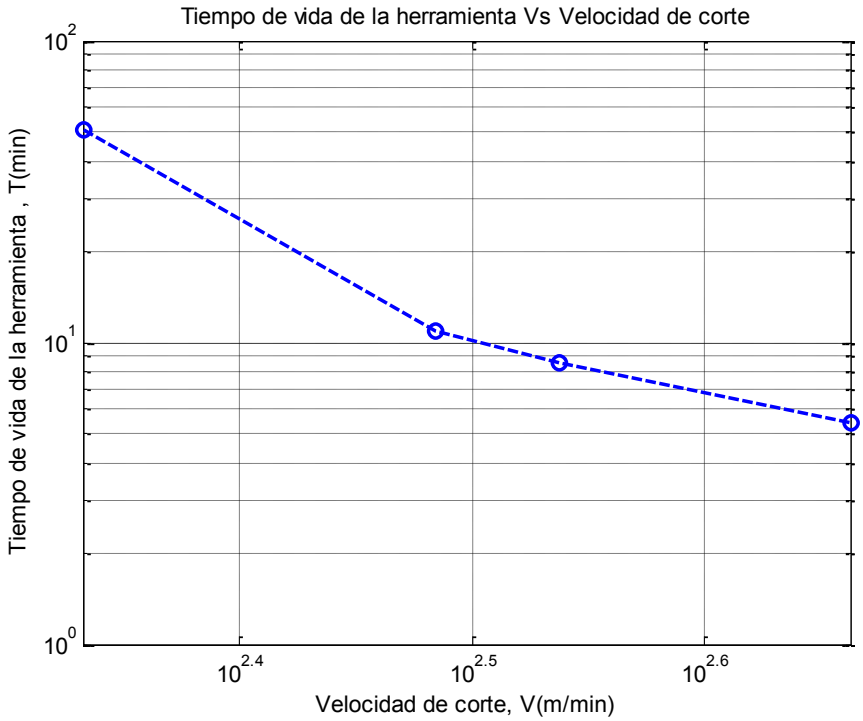



**GRÁFICA 3.4** CURVA V-T PARA $VB_B$ = 0.19mm

La ecuación de Taylor para un rango de velocidad limitada de 295-400 m/min es:

$$VT^{0.35} = 742.80$$

## 3.4. Curvas Velocidad de Corte vs. Tiempo de Mecanización para Desgaste de Flanco Crítico de la Herramienta 2.




**GRÁFICA 3.5** CURVA V-T PARA $VB_B$=0.3mm

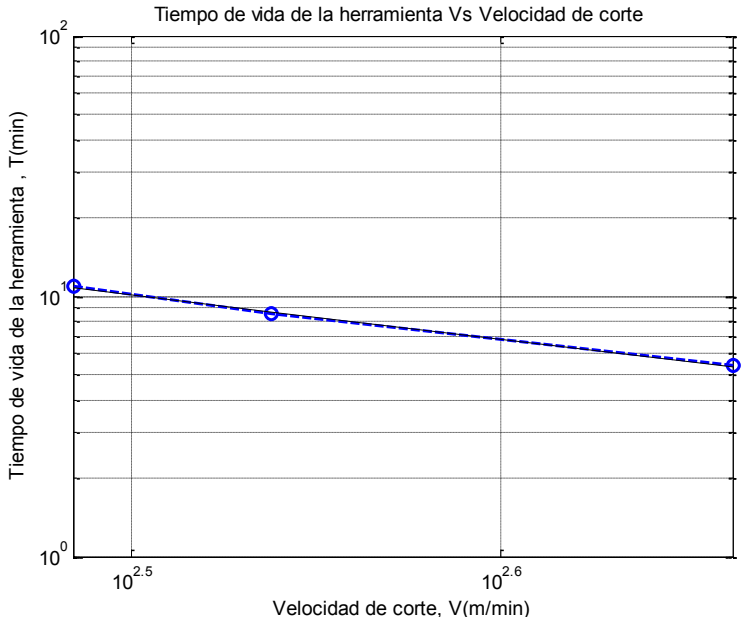
Al graficar las curvas Velocidad de corte vs. Tiempo de mecanización, existen dos pendientes notables, que nos limita el intervalo velocidad de corte para la aplicación de Taylor.

El rango de velocidad de corte para la obtención de la ecuación de Taylor seleccionado es de 305-460 m/min

**TABLA 15**

**TABLA PARA EL CÁLCULO DE REGRESIÓN LINEAL PARA TNMG160408-PM GC4225**

| No | V m/min | T Min | x=logv | y= logT | Xy | $x^2$ | $y^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 305 | 10.91 | 2.48 | 1.04 | 2.58 | 6.17 | 1.08 |
| 2 | 345 | 8.55 | 2.54 | 0.93 | 2.36 | 6.44 | 0.87 |
| 3 | 460 | 5.4 | 2.66 | 0.73 | 1.95 | 7.09 | 0.54 |
| **Σ** | | | Σx=7.68 | Σ y=2.70 | Σxy= 6.89 | $\Sigma x^2$ =19.70 | $\Sigma y^2$ =2.48 |
| | | $(\Sigma x)^2$ =59.06 | | ΣxΣy =20.76 | | | |
| | | $(\Sigma x)^2$/No= 19.69 | | (ΣxΣy)/No=6.92 | | | |




**GRÁFICA 3.6** CURVA V-T PARA $VB_B$=0.3mm (Vc=305-460 m/min)

**TABLA 16**

**CONSTANTES DE LA ECUACIÓN DE TAYLOR PARA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225**

| |
|---|
| $\overline{x}$= 2.56<br>$\overline{y}$ = 0.90 |
| k= -1.69<br>**n**=-1/k=0.59 |
| log C= 3.09<br>**C**=1242.59 |

La ecuación de Taylor para un rango de velocidad limitada de 305-460 m/min es:

$$VT^{0.59} = 1242.59$$

## 3.5. Curvas de Desgaste de Flanco en Función del Avance y Profundidad de Corte.

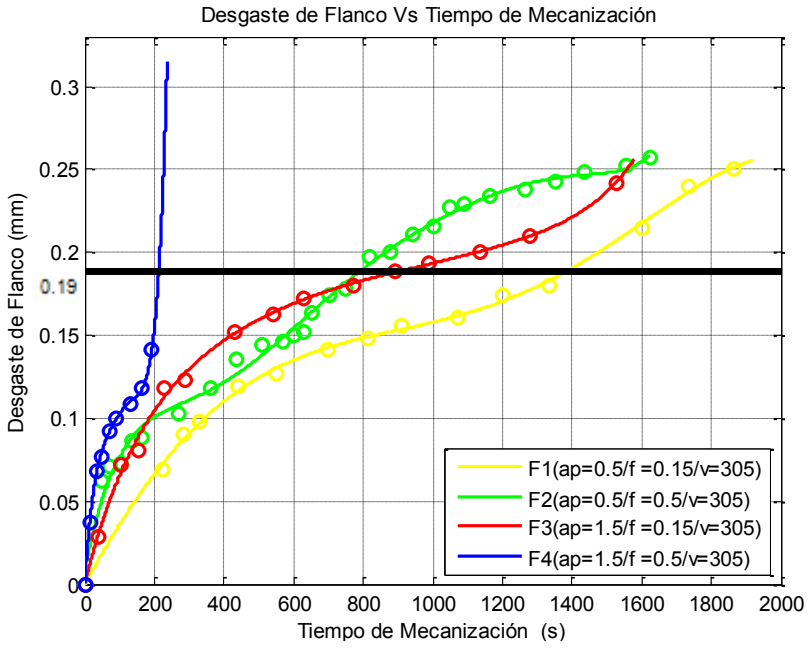
La remoción del material se llevó a cabo a una velocidad de corte de 305 m/min. Las velocidades de avance fueron 0.5 y 0.15 mm/rev. Las Profundidades de corte que se probaron fueron de 0.5 y 1.5 mm. Un conjunto de experimentos (4 ensayos para cada herramienta) se realizó con 1 velocidad de corte, 2 niveles de profundidad de corte y 2 niveles de tasas de alimentación (según la selección de parámetros previamente establecida, ver tabla 9).

El comportamiento de las curvas de F1 y F2 de la gráfica 3.7 y gráfica 3.8 demuestra que para un mismo tiempo de mecanización, el

desgaste aumenta con un incremento en el avance. Las curvas de F3 y F4 presentan la misma tendencia. El avance tiene un efecto significativo sobre la tasa de desgaste.

Comparando el F1 con el F3 y el F2 con el F4 para cada herramienta se puede observar que el desgaste del flanco aumenta con el aumento en la profundidad de corte.

Con un aumento de la profundidad de corte, la longitud de contacto del filo de corte con la pieza de trabajo aumenta y el desgaste se produce más profundo a lo largo del filo de corte.



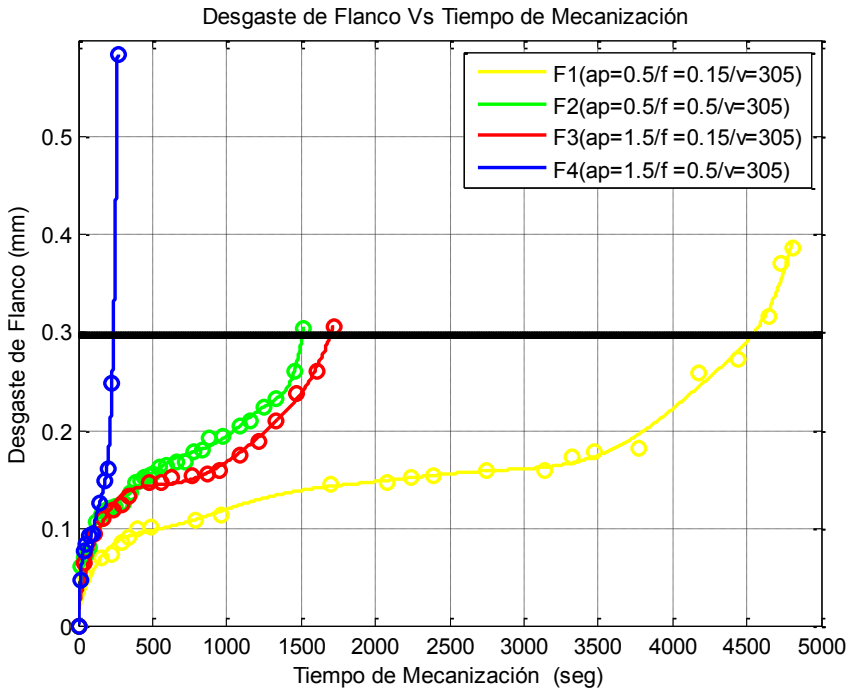

**GRÁFICA 3.7** CURVAS DE DESGASTE DE FLANCO (VB) DE LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015.

El aumento de la velocidad de alimentación puede provocar vibraciones en el sistema que da lugar a la fractura de las herramientas de cermet.

Los filos F3 y F4 de la gráfica 3.7 presentaron falla catastrófica. Entre los factores responsables de este fenómeno en los filos de corte se tiene: En primer lugar, bajo condiciones de corte más pesados la tasa de generación de calor en la zona de corte es alta, pero la conductividad térmica de las herramientas de cermet es muy baja. Como resultado, la temperatura en el borde de corte se eleva a un nivel muy alto que en última instancia provoca un fallo de la herramienta. La segunda razón es, obviamente, que la tenacidad a la fractura de las herramientas de cermet es baja.

En la gráfica 3.7 puede verse que, para los filos de corte F1 y F2, la vida de la herramienta disminuye alrededor de 33% para un aumento del 233% de la velocidad del avance. En los filos F3 y F4, la reducción de la vida de la herramienta llegó a 73% para el mismo incremento de velocidad de avance, sin embargo la profundidad de corte es 200% mayor que la del F1 y F2.

Comparando los filos de corte F1 y F3 de la gráfica 3.7, la vida de la herramienta disminuye alrededor de 43% para un aumento del 200% de la profundidad de corte. En los filos F2 y F4, la reducción de la vida de la herramienta llegó a 77% para el mismo incremento de profundidad de corte, sin embargo la velocidad de avance es 233% mayor que la del F1 y F3.




**GRÁFICA 3.8** CURVAS DE DESGASTE DE FLANCO (VB) DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225

En la gráfica 3.8 se observa para los filos de corte F1 y F2 la influencia del avance en el alcance del criterio de desgaste. La vida de la herramienta disminuye alrededor de 63% para un aumento del

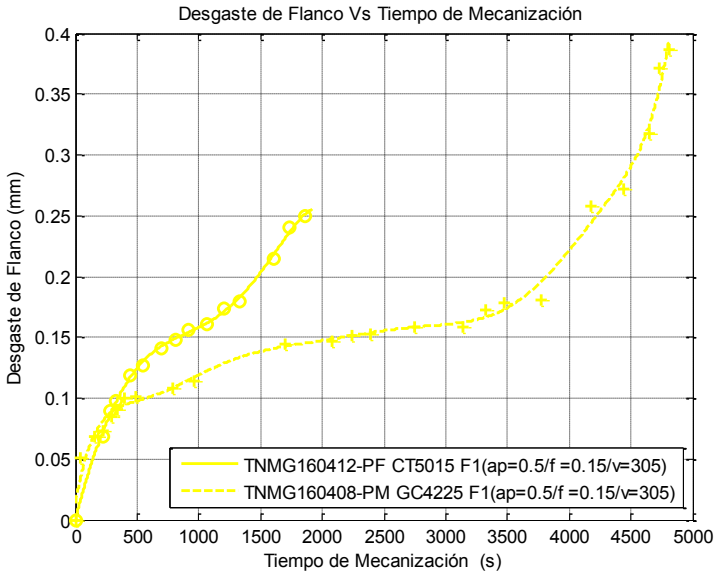
233% de la velocidad del avance. En los filos F3 y F4, la reducción de la vida de la herramienta llegó a 84% para el mismo incremento de velocidad de avance, sin embargo la profundidad de corte es 200% mayor que la del F1 y F2.

Comparando los filos de corte F1 y F3 de la gráfica 3.8, para cuantificar la influencia de la profundidad de corte se puede evidenciar que, la vida de la herramienta disminuye alrededor de 67% para un aumento del 200% de la profundidad de corte. En los filos F2 y F4, la reducción de la vida de la herramienta llegó a 86% para el mismo incremento de profundidad de corte, sin embargo la velocidad de avance es 233% mayor que la del F1 y F3.

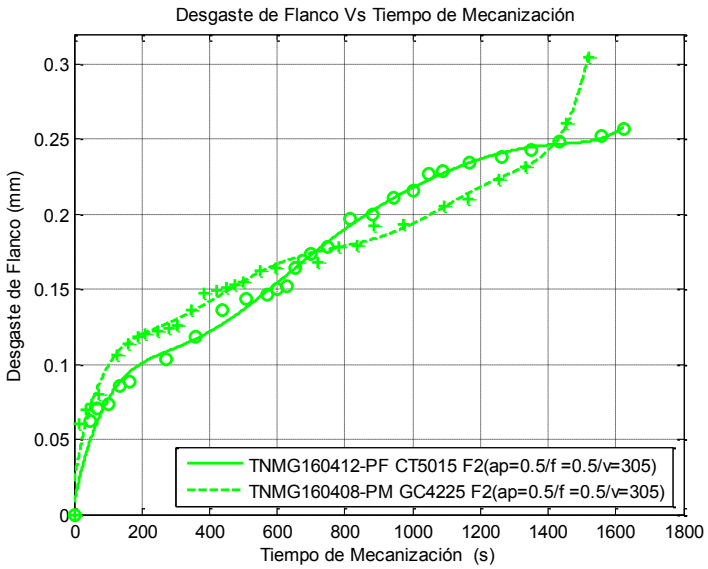
## 3.6. Curvas Comparativas de las Herramientas de Corte.

En la gráfica 3.9 se puede observar que la vida de la herramienta del GC4225 es 226% mayor que el CT5015.

En este tipo de operación, realizada por el filo F1 de cada herramienta, con condiciones de corte moderadas. El carburo posee un notable desempeño con resistencia al desgaste, presentando un rendimiento superior en términos de vida de la herramienta.

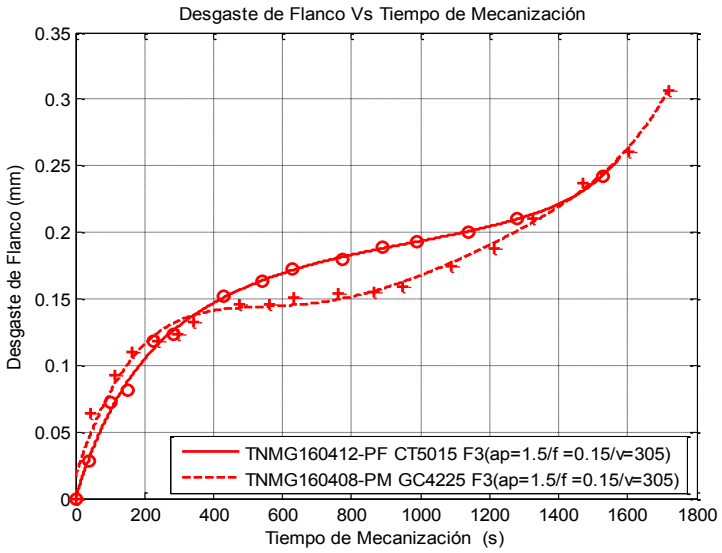



**GRÁFICA 3.9** CURVAS COMPARATIVAS DE DESGASTE DE FLANCO PARA EL F1.

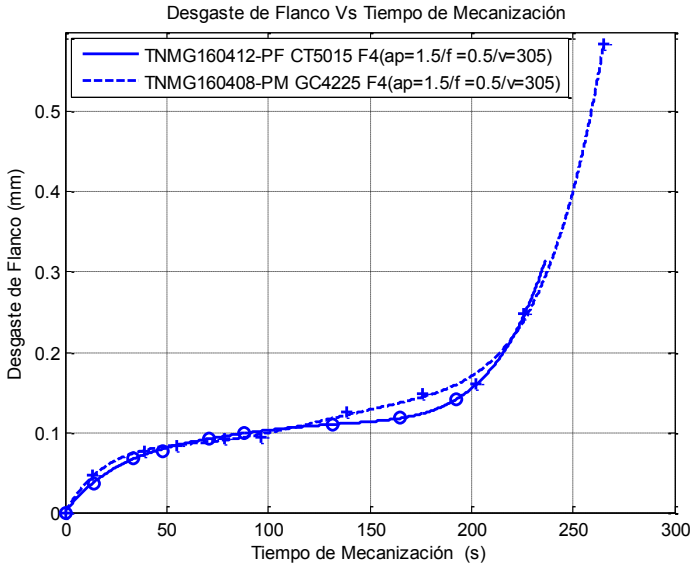



**GRÁFICA 3.10** CURVAS COMPARATIVAS DE DESGASTE DE FLANCO PARA EL F2.

Un incremento en el avance posee mayor influencia en la vida de la herramienta con calidad GC4225 que el CT5015.




**GRÁFICA 3.11** CURVAS COMPARATIVAS DE DESGASTE DE FLANCO PARA EL F3.




**GRÁFICA 3.12** CURVAS COMPARATIVAS DE DESGASTE DE FLANCO PARA EL F3.

En las gráficas 3.11 y 3.12 los comportamientos de las curvas de desgaste para las dos herramientas son similares durante la región inicial y la región de desgaste de estado estable bajo las mismas condiciones de corte, sin embargo su criterio de fin de vida es distinto.

El GC4225 cerca de alcanzar su valor máximo 0.3 mm de desgaste del flanco presenta entalladura, mientras que el CT5015 termina su vida poco después de alcanzar su criterio de vida, 0.19mm de desgaste de flanco, con una falla catastrófica. Un incremento en la profundidad de corte causa un esfuerzo de compresión mayor en el filo de corte resultando una fractura en el filo de la herramienta CT5015.

## 3.7. Análisis de Volumen del Material Removido.

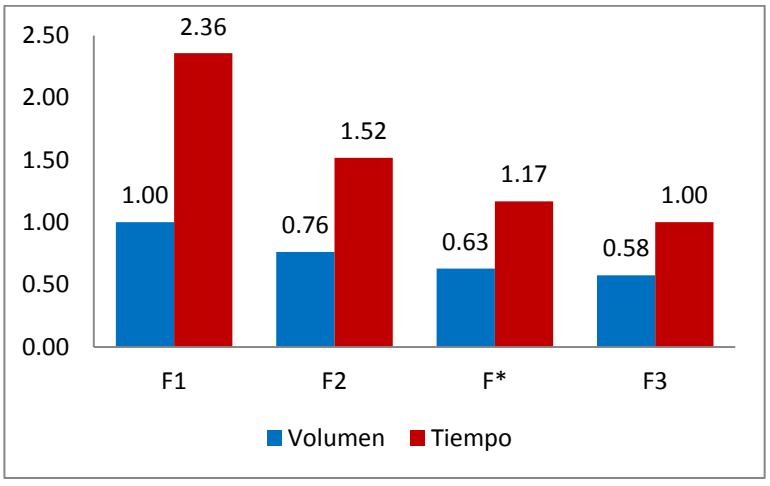
La tasa de remoción de material aumenta con la aplicación de altas velocidades de corte. El desgaste en una herramienta de corte que opera a alta velocidad se produce con mayor intensidad y hace que el cambio de la herramienta sea frecuente. El tiempo de cambio de herramienta aumenta el tiempo de inactividad de la máquina y reduce la productividad de mecanizado. Por otro lado una baja razón de

material removido aumenta el tiempo de operación para una misma cantidad de volumen.

**TABLA 16**

**TASA DE REMOCIÓN DE MATERIAL PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE DE LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015**

| FILOS (ap=1.2mm/f=0.25mm) | VOLUMEN ($mm^3$) | Tiempo (s) | TRM($mm^3$/s) |
|---|---|---|---|
| **F1 ($V_C$=295m/min)** | 608007.12 | 830.7 | 731.92 |
| **F2($V_C$=350m/min)** | 463997.75 | 534.4 | 868.26 |
| **F*($V_C$=375m/min)** | 381756.78 | 411 | 928.85 |
| **F3($V_C$=400m/min)** | 349607.52 | 352.2 | 992.64 |




**GRÁFICA 3.13** VOLUMEN REMOVIDO PARA LAS DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE PARA LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015

Las gráfica 3.13 y 3.14 muestran el volumen que remueve la herramienta hasta alcanzar el tiempo de vida útil para cada uno de los cuatro filos.

Para la herramienta TNMG160412-PF CT5015 según la figura 3.13 se comprueba lo siguiente:

- El tiempo de vida útil de la herramienta más pequeño, existe bajo las condiciones de corte del F3, donde la velocidad de corte es mayor. Seguido del F* que posee una vida 1.17 veces más larga, después el F2 con 1.52 veces más que el F3, y finalmente la duración de la vida del F1 es 2.36 veces que la del F3.

- El F1 durante su vida útil remueve la mayor cantidad de material en comparación con los otros filos de corte, el F2 remueve 0.76 del volumen del F1, mientras que el F* apenas remueve 0.63 del volumen del F1. El F3 remueve 0.58 del volumen del F1

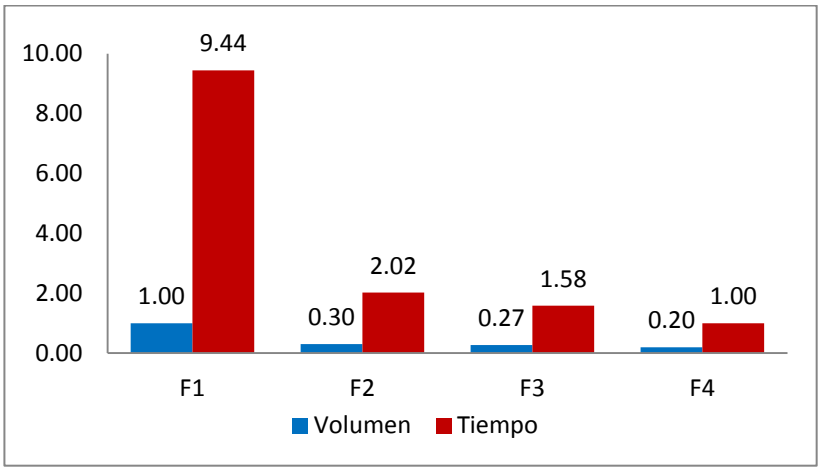
- Para remover el mismo volumen del F1, con las condiciones de corte del F2 se necesitan 1.3 herramientas, y un tiempo 16% menor que el que requiere el F1. El F* efectúa la remoción con 1.6

herramientas en un tiempo 21% menor con respecto al F1. El F3 en un tiempo 26% menor que el F1 necesita 1.7 herramientas.

**TABLA 17**

**TASA DE REMOCIÓN DE MATERIAL PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225.**

| FILOS (ap=1.6mm/f=0.3mm) | VOLUMEN ($mm^3$) | Tiempo (s) | TRM($mm^3$/s) |
|---|---|---|---|
| **F1 ($V_C$=215m/min)** | 2596716.87 | 3060 | 848.60 |
| **F2($V_C$=305m/min)** | 790261.01 | 654.5 | 1207.43 |
| **F3($V_C$=345m/min)** | 700289.92 | 512.8 | 1365.62 |
| **F4($V_C$=400m/min)** | 519854.69 | 324 | 1604.49 |




**GRÁFICA 3.14** VOLUMEN REMOVIDO PARA LAS DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225.

Para la herramienta TNMG160412-PF CT5015 según la figura 3.14 se comprueba lo siguiente:

- El tiempo de vida útil de la herramienta más pequeño, existe bajo las condiciones de corte del F4, donde la velocidad de corte es mayor. Seguido del F3 que posee una vida 1.58 veces más larga, después el F2 con 2.02 veces más que el F4, y finalmente la duración de la vida del F1 es 9.44 veces que la del F4.

- El F1 durante su vida útil remueve la mayor cantidad de material en comparación con los otros filos de corte, el F2 remueve 0.30 del volumen del F1, mientras que el F3 apenas remueve 0.27 del volumen del F1. El F4 remueve 0.20 del volumen del F1

- Para remover el mismo volumen del F1, con las condiciones de corte del F2 se necesitan 3.2 herramientas, y un tiempo 30% menor que el que requiere el F1. El F3 efectúa la remoción con 3.7 herramientas en un tiempo 38% menor con respecto al F1. El F4 en un tiempo 47% menor que el F1 necesita 5 herramientas.

Es conveniente tener un equilibrio entre las tasas altas de remoción de material y una larga vida de estas herramientas

La herramienta ideal para una aplicación de mecanizado es la que proporciona un rendimiento predecible y los resultados deseados, al mejor costo, reduciendo el número de herramientas para una operación, resistente al desgaste.

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el presente capítulo se realiza una síntesis de los resultados obtenidos. El análisis se enfocó al estudio del comportamiento de las curvas de desgaste, así como al modelo matemático propuesto por Taylor. Se compararon las constantes de Taylor *n* y *C*, obtenidas de los ensayos con el rango de valores límites establecidos para las herramientas de corte (carburo cementado) propuesto por Kalpakjian (7). Además, se determina la significancia de la recta construida a partir del análisis de regresión.

Se estudio la influencia que ejercen las herramientas de corte y las diferentes condiciones de mecanizado en la vida útil de las mismas. Además, se comparan los resultados obtenidos del proceso de corte, que son el tipo de viruta y el acabado superficial. El análisis y caracterización de la viruta obtenida se realizó en base a la norma ANSI/ASME B94.55M-

1985 y a la clasificación presentada por Micheletti (3). Se realizaron inspecciones visuales para el análisis de la calidad superficial resultante de las diferentes condiciones de corte.

## 4.1. Análisis de la Dispersión de los Resultados Obtenidos.

Las gráficas Velocidad de corte - Tiempo de vida útil (V-T), presentadas en las secciones anteriores se construyeron a partir de los resultados experimentales que se registraron en las hojas de datos, estas curvas obedecen al modelo matemático propuesto por Taylor. Para establecer la precisión de los resultados, es necesario obtener el grado de dispersión que existe entre los puntos obtenidos experimentalmente y la recta construida a partir del análisis de regresión lineal. Una manera de indicar la dispersión es determinando la variación residual sobre la línea de regresión, que es la desviación media cuadrática de los valores experimentales Log (T) de acuerdo al valor con la línea de regresión.

La variación residual es calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$S_r^2 = \frac{\sum y^2 - \bar{y}\sum y - k\left(\sum xy - \frac{\sum x - \sum y}{No}\right)}{No-2} \qquad \text{(Ec. 18)}$$

La significancia es la probabilidad de que un evento ocurra. En el caso de este análisis, la significancia permite determinar la probabilidad de que el modelo matemático establecido no corresponda a valores de naturaleza aleatoria, confirmando la veracidad de los datos obtenidos en el ensayo.

Si la relación observada entre las variables Tiempo de vida y Velocidades de corte no puede ser considerada como una oportunidad única resultado, entonces, para que exista significancia, la variación residual deberá ser pequeña en relación con la variación total de los valores del Tiempo de vida debido a la regresión.

Para el cálculo de la significancia, se usó el esquema que se muestra en la norma ANSI/ASME B94.55M-1985 (6) donde se calculó lo siguiente:

a) La suma de la media cuadrática debido a la desviación a partir de la línea de regresión (igual a la variación residual, $S_r^2$).

b) La suma de la media cuadrática debido a la variación total por la regresión (variación total, $S_R^2$)

$$S_R^2 = k(\sum xy - \sum x - \sum y/No) \qquad \text{(Ec. 19)}$$

c) La razón $S_R^2/S_r^2$

Se selecciona el nivel de confianza necesario (95%) y se lee de la tabla de Fisher (ver apéndice J), el valor de *F* para el número de grados de libertad (g.l.) igual a 1 y No-*2*. La razón $S_R^2/S_r^2$ debe de ser considerablemente mayor que el valor de *F* obtenido en la tabla. Si esto no ocurre, se debe de considerar que la relación observada puede cambiar.

De la tabla 13 y tabla 14 se recopila los siguientes resultados para la herramienta TNMG160412-PF CT5015.

**TABLA 18**

**RECOPILACIÓN DE RESULTADOS DE TABLA 13 Y 14.**

| | |
|---|---|
| $\Sigma y^2$= 3.49 | k =-2.86 |
| y = 0.92 | Σxy =9.39 |
| Σy = 3.70 | (ΣxΣy)/No =9.41 |

Se obtiene los siguientes valores para la herramienta TNMG160412-PF CT5015.

**TABLA 19**

**VARIACIÓN RESIDUAL Y TOTAL PARA LA HERRAMIENTA TNMG160412-PF CT5015.**

| | |
|---|---|
| $S_r^2$ | 0.000216 |
| $S_R^2$ | 0.079382 |

**TABLA 20**

**CÁCULO DE LA RAZÓN DE VARIANZA Y COMPARACIÓN CON EL VALOR F.**

| Fuente de Variación | Grados de Libertad (g.l.) | Media-Cuadrática | Relación |
|---|---|---|---|
| Regresión | 1 | $S_R^2 = 0.079382$ | $S_R^2 / S_r^2 = 368.171$ |
| Residual | No-2 | $S_r^2 = 0.000216$ | |

Nivel de Confianza: 95%

Valor F de Tabla Fisher para g.l.= 1, No-2 = 2: 18.513

Significancia: SI [X] NO [ ]

De la tabla 15 y tabla 16 se recopila los siguientes resultados para la herramienta TNMG160408-PM GC4225.

**TABLA 21**

**RECOPILACIÓN DE RESULTADOS DE TABLA 15 Y 16.**

| | |
|---|---|
| $\Sigma y^2 = 2.48$ | k =-1.69 |
| y = 0.90 | Σxy =6.89 |
| Σy = 2.70 | (ΣxΣy)/No =6.92 |

Se obtiene los siguientes valores para la herramienta TNMG160408-PM GC4225.

**TABLA 22**

**VARIACIÓN RESIDUAL Y TOTAL PARA LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225.**

| | |
|---|---|
| $S_r^2$ | 0.000131 |
| $S_R^2$ | 0.047948 |

**TABLA 23**

**CÁCULO DE LA RAZÓN DE VARIANZA Y COMPARACIÓN CON EL VALOR F.**

| Fuente de Variación | Grados de Libertad (g.l.) | Media-Cuadrática | Relación |
|---|---|---|---|
| Regresión | 1 | $S_R^2 = 0.047948$ | $S_R^2 / S_r^2 = 366.214$ |
| Residual | No-2 | $S_r^2 = 0.000131$ | |

Nivel de Confianza: 95%

Valor F de Tabla Fisher para g.l.= 1, No-2 = 1: 161.446

Significancia: SI [X] NO [ ]

## 4.2. Análisis de las Constantes de Taylor para las Diferentes Herramientas de Corte.

La combinación de las condiciones de corte, el material de la herramienta y material de la pieza de trabajo, influyen de manera cuantificable en las constantes de la ecuación de Taylor.

Se obtuvo un valor de n igual 0.35 para la calidad de cermet CT5015 y 0.59 para el metal duro recubierto GC4225. El valor de n del cermet se encuentra dentro de los límites observados para las herramientas de carburo cementado según lo establece Kalpakjian (7). Mientras que el exponente n de GC4225 sobrepasa el valor máximo del rango establecido. Se sabe que n es el inverso de la pendiente, lo que implica que a mayores valores de n, menor será la pendiente de la curva de Taylor. Como se puede observar en la figura 4.1, valores menores de n corresponden a herramientas de corte de menor dureza. La plaquita de cermet posee un menor valor de *n* en comparación con la plaquita de metal duro recubierto, lo que conlleva a un menor tiempo de vida útil de la herramienta. En cambio, valores mayores de *n*, como en la herramienta GC4225, representan un alargamiento de la vida útil, este fenómeno es más intenso a elevadas velocidades de corte.

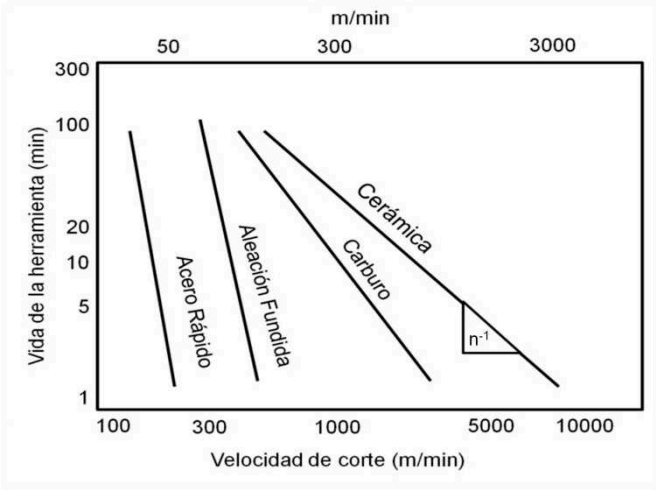



**FIGURA 4.1** CURVAS DE VIDA DE LA HERRAMIENTA PARA DIVERSOS MATERIALES (7).

Un aumento de n representa que la herramienta posee mejores características sobre la resisitencia al desgaste. El recubrimiento CVD que posee la herramienta GC4225 aumenta la dureza y la tenacidad, por ende su resistencia al desgaste. Esto explica por qué el valor de *n* de la plaquita de carburo recubierto sobrepasa el límite establecido.

Para la constante C los valores alcanzados fueron 739.61 y 1242.59 para el CT5015 y GC4225 respectivamente. Valores mayores de C implican en la herramienta un mayor tiempo de vida y mayor resistencia a elevadas velocidades de corte.

## 4.3. Influencia de la Herramienta de Corte y Parámetros de Mecanización en el Tiempo de Vida Útil.

Del análisis del desgaste de flanco para las diferentes velocidades de corte de la herramienta de calidad de cermet TNMG 160412-PF CT5015 (ver gráfica 3.2) se observa que a velocidades mayores a 375 se tiene un mejor rendimiento de la herramienta, debido a que esta no presenta un mayor debilitamiento por desgaste de cráter, lo que le permite alcanzar una anchura mayor de banda de desgaste.

De la gráfica 3.10 se observó que la herramienta de cermet tiene un mejor desempeño a mayores avances con bajas profundidades en comparación con la herramienta de metal duro revestido.

Con radios de punta más elevados existe una mayor área de contacto entre la herramieta de corte y la pieza de trabajo, lo que disminuye la presión localizada en la zona de desgaste. El cermet, al poseer un radio de punta mayor, disminuye la banda de desgaste de flanco y aumenta su tiempo de vida útil.

En cambio, a mayores profundidades de corte, la robustez que proporciona el radio de punta del cermet, no compensa las excesivas vibraciones generadas en el sistema, que en combinación con una

baja tenacidad, alto rozamiento y baja disipación térmica, provocan la fatiga en la herramienta. Lo que conduce a una falla catastrófica por astillamiento o fractura.

La herramienta de metal duro recubierto, TNMG 160408-PM GC4225, posee una combinación de propiedades mecánicas de alta tenacidad y dureza, y configuración geométrica de plaquita negativa con radio de punta bajo, que permiten a la herramienta un mejor desempeño en condiciones de profundidades de corte elevadas. Además, en la gráfica 3.3 se puede observar que el tiempo de vida de la herramienta se extiende considerablemente a bajas velocidades de corte, esto ocurre debido a que un decremento en las velocidades de corte disminuye la presión que ejerce la viruta sobre la plaquita, lo que retarda el fenómeno de entalladura, que es uno de los principales mecanismos de degaste en la herramienta de metal duro.

## 4.4. Comparación de los Resultados Obtenidos para las Diferentes Herramientas de Corte.

Para establecer las condiciones en las que se obtiene el mejor desempeño de la herramienta, se comparan los resultados obtenidos del proceso de remoción del material, que son el tipo de viruta y el acabado superficial. Para la identificación de la viruta se empleó la

clasificación definida por la norma (6) y su estudio se realizó tomando como base la clasificación empleada por Micheletti (3). Las diversas calidades superficiales obtenidas se revisaron mediante inspección visual en la superficie mecanizada de la pieza.

### 4.4.1. Tipos de Viruta Obtenida.

El tipo de viruta removida de los ensayos realizados se registró en la hojas de datos de cada filo de corte ubicadas en el apéndice G. Se compararon los resultados obtenidos para las diferentes herramientas y condiciones de corte.

De la viruta obtenida de los ensayos realizados para la construcción de la curva de Taylor, se observó que para la herramienta de cermet, las variaciones en la velocidad de corte no influyen de manera significativa en el tipo de viruta obtenida. La forma predominante era del tipo cónica helicoidal (o 5.2, ver apéndice G) para las velocidades bajas, al aumentar la velocidad de corte se observó una ligera tendencia a formar un radio de curvatura más cerrado dando como resultado una viruta tubular (tipo 2.2).

Para la herramienta de metal duro, se observó una mayor influencia de la velocidad de corte en la forma de la viruta obtenida. Para el filo 1 se obtuvo una viruta cónica helicodal alargada (tipo 5.1), cuya logitud decreció a medida que se aumentaba la velocidad de corte hasta obtener una viruta arqueada y segmentada del tipo 6.2.

De los ensayos realizados a diferentes velocidades de avance y profundidades de corte, se observó para la plaquita de metal duro que a menores velocidades de avance, se desarrolla una viruta larga y ensortijada del tipo 1.3 y 4.3, que es perjudicial para el acabado superficial y el control de la operación de corte. Un fenómeno similar ocurre para la herramienta de cermet, con la diferencia de que al aumentar la profundidad de corte la influencia que tiene el avance sobre la viruta disminuye, perdiendo su forma ensortijada.

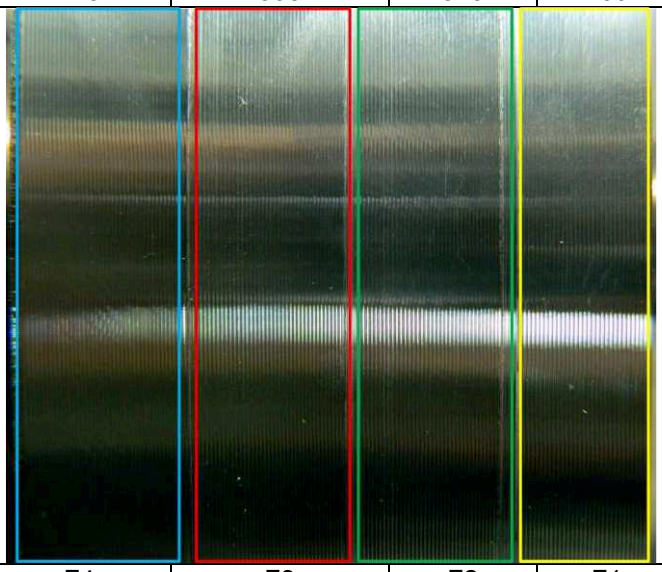
### 4.4.2. Acabado Superficial del Material de Trabajo.

Para observar efecto que tiene la herramienta de corte y las condiciones de mecanizado en el acabado superficial de la pieza de trabajo, se realizaron ensayos con los parámetros previamente establecidos en porciones de la pieza mecanizada.

En las tablas 24, 25, 26 y 27 se presentan los resulados obtenidos.

**TABLA 24**

**ACABADO SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE.**

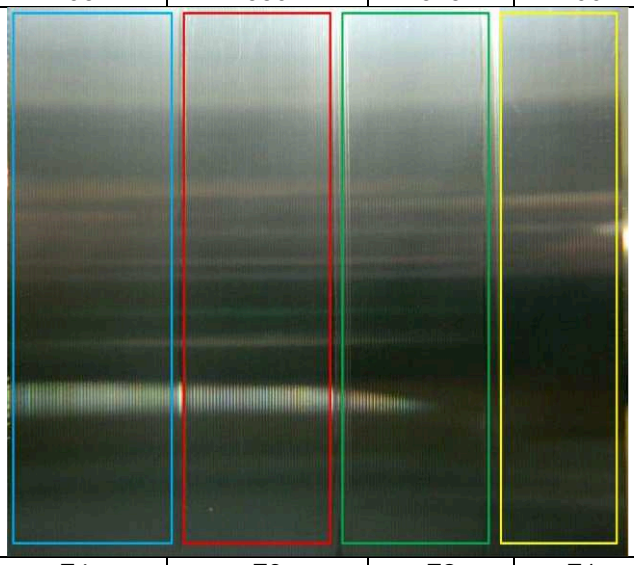
| Herramienta: | TNMG 160408-PM GC4225 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $a_p$ (mm): | 1.6 | $f_n$ (mm/rev): | 3.0 | |
| $V_c$ (m/min): | 215 | 305 | 345 | 460 |
| Acabado Superficial |  | | | |
| | F4 | F3 | F2 | F1 |

El acabado superficial que se presenta en la tabla 24 se obtuvo de mecanizar la pieza de trabajo con los parámetros empleados para la construcción de la ecuación de Taylor de la herramienta de metal duro recubierto. En la imagen se puede

observar que el acabado presenta pequeños surcos propios del avance. Comparando el acabado superficial obtenido para los cuatro filos se observa que para las condiciones de corte presentadas en la tabla 24, la velocidad no influye de manera significativa en la calidad superficial obtenida.

**TABLA 25**

**ACABADO SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA TNMG 160412-PF CT5015 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CORTE.**

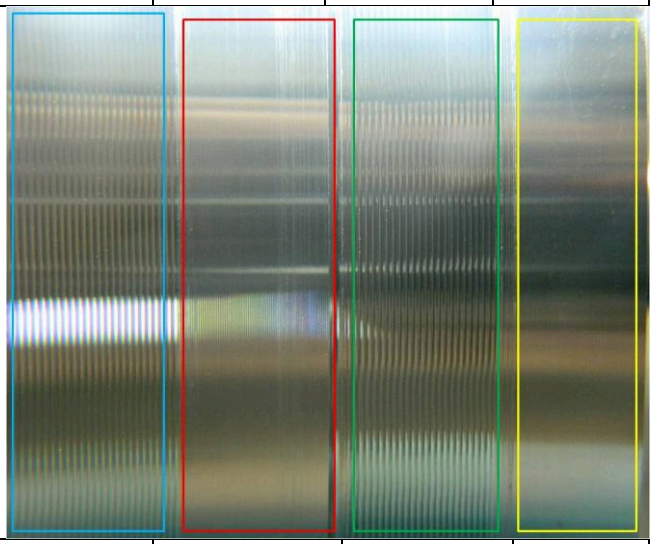
| Herramienta: | TNMG 160412-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $a_p$ (mm): | 1.2 | $f_n$ (mm/rev): | 2.5 | |
| $V_c$ (m/min): | 295 | 350 | 375 | 400 |
| Acabado Superficial |  | | | |
| | F4 | F3 | F2 | F1 |

Si se comparan las imágenes presentadas en las tablas 24 y 25, se observa que para la herramienta de cermet se tiene un acabado superficial de mayor calidad, esto se debe a que los

ensayos para esta herramienta se realizaron con menores velocidades de avance y menores profundidades de corte que la herramienta de metal duro revestido. Además, el radio de punta superior que posee esta herramienta permite una mejor calidad en el acabado de la pieza de trabajo. Se observó la baja influencia de la velocidad de corte en el acabado superficial para ambas herramientas de corte.

**TABLA 26**

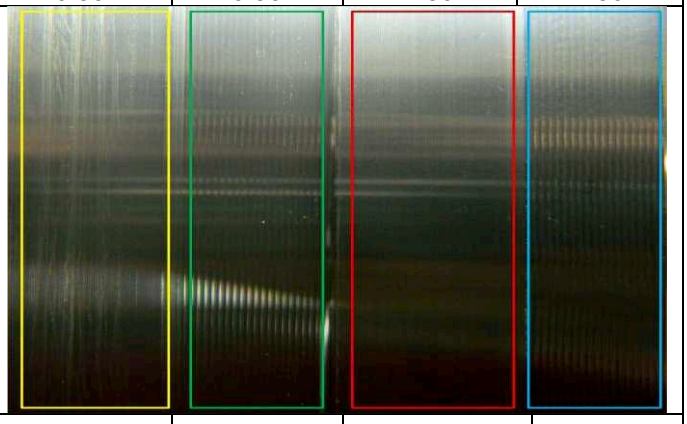
**ACABADO SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA TNMG160408-PM GC4225 PARA DIFERENTES AVANCES Y PROFUNDIDADES DE CORTE.**

| Herramienta: | TNMG 160408-PM GC4225 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $V_c$ (m/min): | 305 | | | |
| $f_n$ (mm/rev): | 0.5 | 0.15 | 0.5 | 0.15 |
| $a_p$ (mm): | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 0.5 |
| Acabado Superficial |  | | | |
| | F4 | F3 | F2 | F1 |

De la tabla 26 se puede observar que el avance es el parámetro que tiene mayor influencia en el acabado superficial de la pieza mecanizada. Si se comparan los acabados superficiales obtenidos para los filos F1 y F3, se observa que para el filo F3 la superficie presenta más rayaduras, este resultado tiene que ver con el tipo de viruta obtenida, que tiende a enredarse con mayor facilidad en la pieza, y con la profundidad de corte, siendo mayor para el filo F3. Este aumento en la profundidad incrementa las vibraciones en el sistema, causando un acabado de menor calidad.

**TABLA 27**

**ACABADO SUPERFICIAL DE LA HERRAMIENTA TNMG 160408-PF CT5015 PARA DIFERENTES AVANCES Y PROFUNDIDADES DE CORTE.**

| Herramienta: | TNMG 160408-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $V_c$ (m/min): | 305 | | | |
| $f_n$ (mm/rev): | 0.15 | 0.50 | 0.15 | 0.50 |
| $a_p$ (mm): | 0.50 | 0.50 | 1.50 | 1.50 |
| Acabado Superficial |  | | | |
| | F1 | F2 | F3 | F4 |

En la tabla 27 se observa un comportamiento similar al presentado en la tabla 26, con la diferencia de que en este caso, el filo F3 posee un mejor acabado en comparación con el filo F1. Este resultado se deriva del tipo de viruta obtenida principalmente. Para el filo F1 es del tipo tubular ensortijada, este tipo de viruta posee una alta tendencia a enredarse con la pieza de trabajo.

Si se comparan las superficies obtenidas en los filos F2 y F4 de las tablas 26 y 27, se observa que para la herramienta TNMG 160408-PF CT5015, los surcos en la pieza son más espaciados y menos marcados. Esto ocurre debido a que la plaquita de cermet posee un radio de punta mayor, que disminuye el número crestas obtenidas en la pieza mecanizada, dando como resultado una superficie de menor rugosidad.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. La selección del criterio de vida la herramienta de cermet se estableció en el valor de 0.19mm, ya que sobrepasado este nivel de desgaste ocurre el fallo de los bordes cortantes, comenzando con microfisuras. En el transcurso del proceso de mecanizado estas microfisuras crecen en tamaño y provocan el fracaso total de la herramienta. El crecimiento de las micro grietas es rápido e impredecible. Esto ocurre debido a la baja tenacidad a la fractura de la herramienta de cermet. Además, se evidencia que en las curvas de desgaste de la herramienta, el criterio de valor de vida seleccionado marca el inicio de la zona de desgaste acelerado.

2. Las curvas experimentales que describen el proceso de evolución del desgaste de la herramienta en el tiempo cumplen con el modelo teórico de desgaste, mostrando claramente las tres zonas de desgaste.

3. A bajas condiciones de avance, profundidad y velocidad de corte, la vida de las herramientas se prolonga considerablemente. Pero un aumento en los parámetros de corte puede provocar un fallo rápido de las herramientas. Entre los parámetros de corte mencionados, la velocidad de corte tiene la influencia más importante en el fracaso de las herramientas.

4. Según los resultados experimentales, un incremento en la profundidad de corte afecta más al cermet que al carburo revestido, mientras que un incremento en el avance muestra una mayor influencia en la vida útil de la herramienta de carburo revestido que en la herramienta de cermet.

5. De los ensayos realizados en este estudio se obtuvieron las constantes que definen la ecuación de Taylor para cada herramienta. Para los insertos TNMG160408-PM GC4225 y TNMG160412-PF CT5015 se hallaron $VT^{0.59}$=1242.59 y $VT^{0.35}$=742.80 respectivamente. Tomando a la velocidad de corte como el parámetro más influyente en la vida útil de la herramienta, y bajo las condiciones de profundidad y avance antes establecidas para cada inserto, se puede concluir que la herramienta de cermet tiene un tiempo de vida más prolongado a bajas velocidades de

corte en comparación a la herramienta de carburo revestido. Por otra parte, la plaquita de carburo revestido posee un tiempo de vida superior que la plaquita de cermet a elevadas velocidades de corte.

6. Al comparar el volumen de material removido utilizando una misma velocidad de corte de 400m/min, bajo las condiciones aplicadas para la construcción de la ecuación de Taylor, se tiene que para el inserto de calidad GC4225 la remoción alcanzada en 5.4 minutos fue de $0.52 \times 10^6$ $mm^3$, mientras que para el inserto de calidad CT5015 la remoción fue de $0.35 \times 10^6$ $mm^3$ en 5.9 minutos. Este resultado indica que el carburo revestido tiene un mayor potencial de desbaste que la herramienta de cermet, siendo esta característica más evidente a elevadas velocidades corte.

7. El resultado del análisis de dispersión de la ecuación de Taylor indica que existe una alta significancia, demostrando que las constantes obtenidas para cada herramienta de corte constituyen un modelo matemático que corresponde a valores experimentales de alta probabilidad de ocurrencia.

8. De los resultados obtenidos para las diferentes condiciones de corte se obtuvo que el parámetro más influyente en la calidad

superficial es el avance. No obstante, la velocidad y profundidad de corte pueden aportar de manera significativa en la calidad obtenida por medio de la viruta generada. Se encontró que a profundidades de corte menores a 0.5mm, la viruta tiende a enredarse en la pieza de trabajo perjudicando el acabado superficial, y a elevadas profundidades de corte incrementan el esfuerzo producido en el plano cortante de tal manera que las vibraciones presentes en el sistema puedan afectar la superficie de la pieza maquinada.

9. Se desarrolla una metodología de experimentación para determinar la vida útil de la herramienta, que consiste en la definición de las condiciones de corte, el desarrollo de ensayos basados en la norma ANSI/ASME B94.55M, la adquisición de datos y procesamiento de imágenes mediante el software AxioVision 4.8®, el análisis de los datos registrados y el reporte de resultados usando como herramienta gráfica el software Matlab R2008a®. Con esta metodología se obtuvo la ecuación de Taylor, además se medió el desempeño de la herramienta de corte determinando las condiciones apropiadas para el proceso de mecanizado.

## RECOMENDACIONES

1. Considerar la posibilidad de mejorar las condiciones del ensayo mediante el uso de líquidos lubro-refrigerantes. Y complementar este estudio realizando comparaciones de los resultados que se obtienen de operaciones de corte realizadas en seco y con elementos refrigerantes.

2. Un factor que también afecta a la duración de la herramienta y el acabado superficial de la pieza a mecanizar es la temperatura que se produce en la zona de corte, sería recomendable realizar mediciones de temperatura en esta zona, para lograr un mayor control en el proceso de corte.

3. El acabado superficial se puede estimar mediante la observación visual de la pieza mecanizada, sin embargo debería ser también controlado y cuantificado con instrumentos de precisión ya que es un factor de total interés, y en muchos casos limitante para el producto terminado.

4. Desarrollar una mayor cantidad de estudios de casos para crear una base de datos que permitan la aplicación del modelo matemático sin necesidad de recurrir a la fase experimental.

5. Analizar la influencia de los parámetros de corte en la vida de la herramienta mediante la medición de las fuerzas de corte, lo que permitiría controlar y mejorar todos los parámetros que afectan las condiciones de corte.

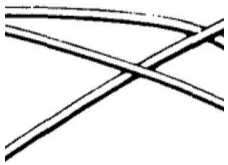
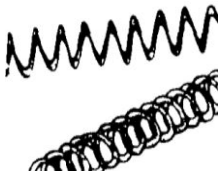
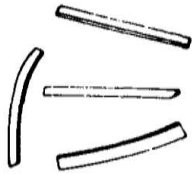
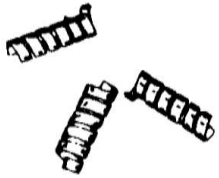
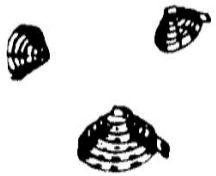
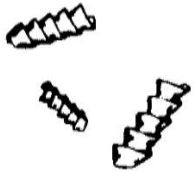
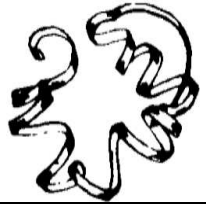
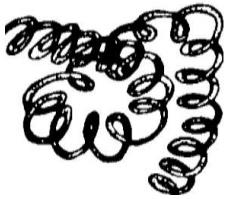
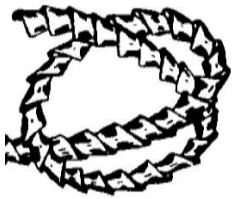
6. Emplear un software de simulación que permita el análisis y predicción del proceso de remoción de material que involucre el tipo de viruta obtenida y las fuerzas involucradas.

7. Finalmente, sería deseable realizar un estudio de optimización de la operación de torneado analizando los costos involucrados y los tiempos de ejecución, con lo que se tendría una visión general de la operación que permitiría optimizar los recursos empleados.

# APÉNDICES

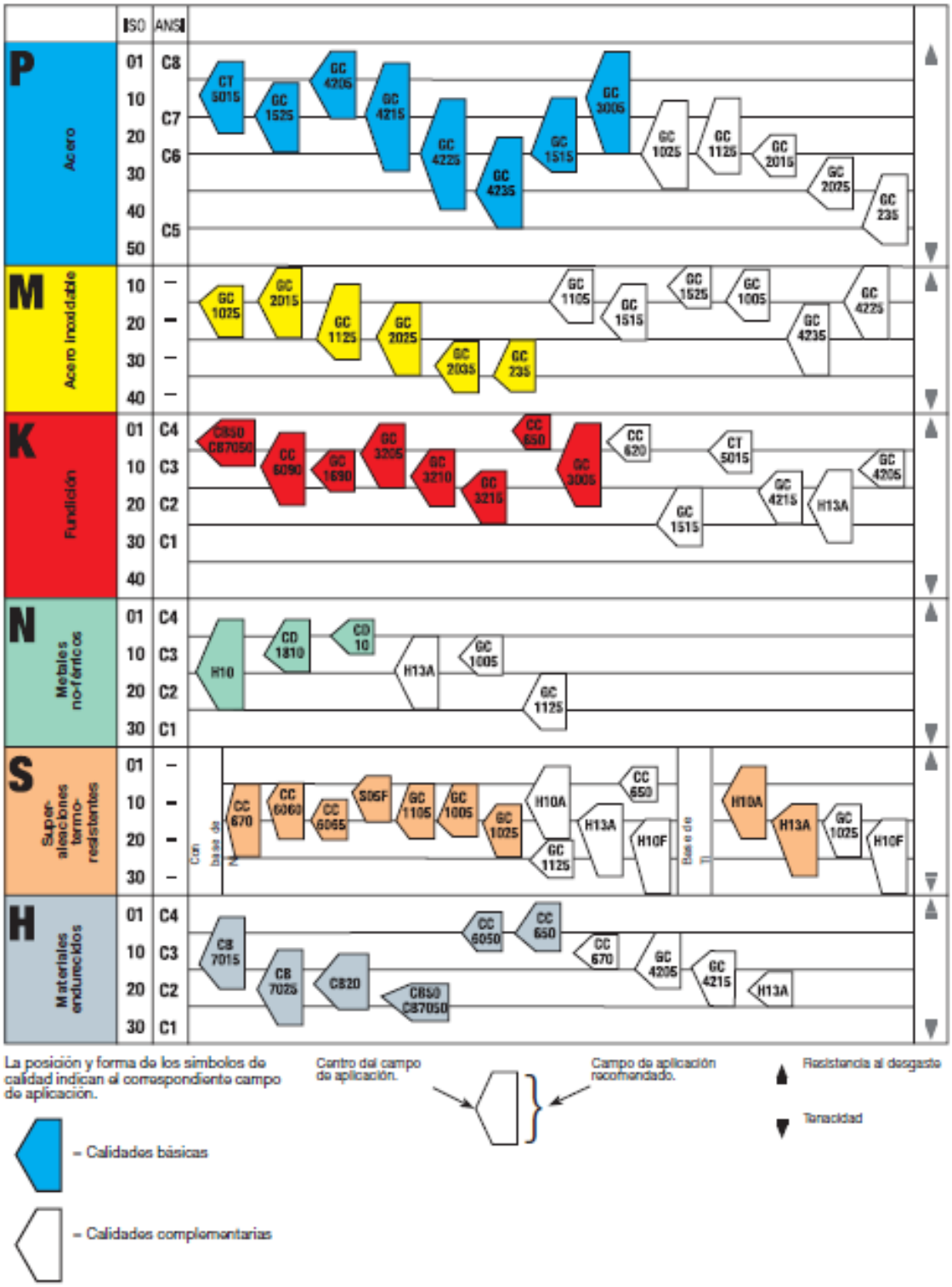
## APÉNDICE A

## CLASIFICACIÓN DE LA VIRUTA SEGÚN LA NORMA ANSI/ASME B94.55M

| 1.VIRUTA DE CINTA | 2.VIRUTA TUBULAR | 3.VIRUTA ESPIRAL | 4.VIRUTA TIPO ARANDELA HELICOIDAL | 5.VIRUTA CONICA HELICOIDAL | 6.VIRUTA ARQUEADA | 7.VIRUTA ELEMENTAL | 8.VIRUTA DE AGUIJON |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 Alargada  | 2.1 Alargada | 3.1 Plana | 4.1 Alargada  | 5.1 Alargada | 6.1 Conectadas | | |
| 1.2 Corta  | 2.2 Corta  | 3.2 Cónica  | 4.2 Cónica | 5.2 Cónica  | 6.2 Sueltas | | |
| 1.3 Ensortijada | 2.3 Ensortijada  | | 4.3 Ensortijada  | 5.3 Ensortijada  | | | |

## APÉNDICE B

## CALIDADES PARA TORNEADO GENERAL



## APÉNDICE C

## FACTORES QUE AFECTAN LA ELECCIÓN DE LA FORMA DE LA PLAQUITA.

| Designación de la forma básica, ángulo de punta | R | S<br>90° | C<br>80° | W<br>80° | T<br>60° | D<br>55° | V<br>35° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Desbaste (resistencia) | ● | ● | ● | ○ | ○ | | |
| Desbaste ligero/semiacabado (n.º de filos) | | ○ | ● | ● | ● | ● | |
| Acabado (n.º de filos) | | | ○ | ○ | ● | ● | ● |
| Torneado longitudinal (dirección de avance) | | | ● | ○ | ○ | ● | ● |
| Perfilado (accesibilidad) | | | ○ | ○ | ○ | ● | ● |
| Refrentado (dirección de avance) | ○ | ● | ● | ● | ○ | ○ | |
| Versatilidad de operaciones | ○ | | ● | ○ | ○ | ● | ○ |
| Potencia limitada en la máquina | | | ○ | ○ | ● | ● | ● |
| Tendencia a la vibración | | | | ○ | ● | ● | ● |
| Materiales duros | ● | ● | | | | | |
| Mecanizado discontinuo. | ● | ● | ○ | ○ | ○ | | |
| Ángulo de posición amplio | | | ● | ● | ● | ● | |
| Ángulo de posición reducido | ● | ● | | ● | ● | | |

● Más adecuada ○ Adecuada

## APÉNDICE D

## CLAVE DE CÓDIGOS PARA EL DISPOSITIVO DE SUJECIÓN

| P | T | G | N | R | 20 | 20 | K | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 |

**1** Tamaño de acoplamiento, mm

C = Coromant Capto®
$D_{sm}$ = Tamaño de acoplamiento

C3 $D_{sm}$ = 32
C4 $D_{sm}$ = 40
C5 $D_{sm}$ = 50
C6 $D_{sm}$ = 63
C8 $D_{sm}$ = 80

Coromant Capto®

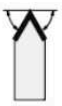
**2** Sistema de sujeción

| C | D | M | P | S |
|---|---|---|---|---|
| | | | | |
| Sujeción por cara superior | Sujeción por la cara superior y por el agujero (RC) | Sujeción por cara superior y por el agujero | Sujeción por el agujero | Sujeción por tornillo |

**3** Forma de la plaquita

| C | D | K | R | S | T | V | W |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | |

**4** Tipo de portaplaquitas

| A | B | D | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 90° | 75° | 45° | 60° | 91° | 91° | 107° 30' |
| | | |  | | | |

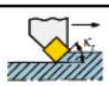
| J | K | L | M | N | Q | R |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 93° | 75° | 95° | 50° | 63° 30' | 117° 30' | 75° |
| | | | | | | |

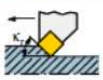
| S | T | U | V | Y(X) | Y(Z) | P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 45° | 60° | 93° | 72° 30' | 85° | 85° | 117° 30' |
| | | | | | | |

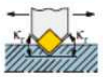
**5** Ángulo de incidencia de la plaquita

| | | | |
|---|---|---|---|
| B | | C | |
| E | | N | |
| P | | O | Descripción específica |

**6** Sentido de la herramienta

R  

L  

N  

**7** Altura del mango, *h* mm

Los números enteros van precedidos de 0, p. ej. h=8, indicado como 08

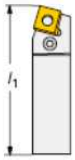
**8** Anchura del mango, *b* mm

Los números enteros van precedidos de 0, p. ej. b=8, indicado como 08

**9** $f_1$ dimensiones, mm

**10** Longitud de la herramienta, $l_1$ mm

Mango

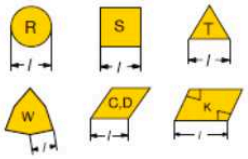


| | |
|---|---|
| A = 32 | N = 160 |
| B = 40 | P = 170 |
| C = 50 | Q = 180 |
| D = 60 | R = 200 |
| E = 70 | S = 250 |
| F = 80 | T = 300 |
| G = 90 | U = 350 |
| H = 100 | V = 400 |
| J = 110 | W = 450 |
| K = 125 | Y = 500 |
| L = 140 | X = Especial |
| M = 150 | |

Coromant Capto®

$l_1$ dimensión en mm (3 dígitos)

**11** Longitud de arista de corte, *l* mm




**12** Opción del fabricante

Cuando se requiera un símbolo suplementario de un máximo de 3 letras, se debe añadir al código ISO, separado por un guión, p. ej. W para diseño de cuña.

**13** Sistema de sujeción para cerámica

-2 = Portaplaquitas CoroTurn® RC para plaquitas con agujero

-4 = Portaplaquitas CoroTurn® RC para plaquitas sin agujero

# APÉNDICE E

## CLAVE DE CÓDIGOS DE PLAQUITAS PARA TORNEADO EN GENERAL

| C | N | M | G | 12 | 04 | 08 | - | | | - | PF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | | 8 | 9 | | 12 |

**1** Forma de la plaquita

| | | | |
|---|---|---|---|
| C | 80° | D | 55° |
| K | 55° | R | |
| S | | T | |
| V | 35° | W | 80° |

**2** Ángulo de incidencia de la plaquita

| | | | |
|---|---|---|---|
| B | 5° | C | 7° |
| E | 20° | N | 0° |
| P | 11° | O | Descripción específica |

**4** Tipo de plaquita

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | | Q | |
| G | | R | |
| M | | T | |
| N | | W | |
| P | | X | Diseño especial |

**3** Tolerancias ± en *S* y *IC*/*IW*

| Tipo | *S* | *IC* / *IW* |
|---|---|---|
| G | ±0.13 | ±0.025 |
| M | ±0.13 | ±0.05 – ±0.15[1] |
| U | ±0.13 | ±0.08 – ±0.25[1] |
| E | ±0.025 | ±0.025 |

1)Varía según el tamaño de *IC*. Véase más abajo.

| Círculo inscrito *IC* mm | Tipo de tolerancia M | U |
|---|---|---|
| 3.97<br>5.0<br>5.56<br>6.0<br>6.35<br>8.0<br>9.525<br>10.0 | ±0.05 | ±0.08 |
| 12.0<br>12.7 | ±0.08 | ±0.13 |
| 15.875<br>16.0<br>19.05<br>20.0 | ±0.10 | ±0.18 |
| 25.0<br>25.4 | ±0.13 | ±0.25 |
| 31.75<br>32.0 | ±0.15 | ±0.25 |

Para plaquitas positivas *IC* es el radio válido para un vértice agudo.

**5** Tamaño de plaquita = longitud de arista de corte, *l* mm

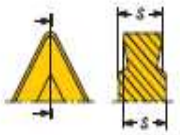
| *IC* mm | *IC* pulgadas | C | D | R | S | T | V | W | K |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.18 | 1/8" | | | | | 05 | | | |
| 3.97 | 5/32" | | | | | 06 | | | |
| 5.0 | | | | 05 | | | | | |
| 5.56 | 7/32" | | | | | 09 | | | |
| 6.0 | | | | 06 | | | | | |
| 6.35 | 1/4" | 06 | 07 | | | 11 | 11 | | |
| 8.0 | | | | 08 | | | | | |
| 9.525 | 3/8" | 09 | 11 | 09 | 09 | 16 | 16 | 06 | 16[1] |
| 10.0 | | | | 10 | | | | | |
| 12.0 | | | | 12[1] | | | | | |
| 12.7 | 1/2" | 12 | 15 | 12[2] | 12 | 22 | 22 | 08 | |
| 15.875 | 5/8" | 16 | | 15 | 15 | 27 | | | |
| 16.0 | | | | 16 | | | | | |
| 19.05 | 3/4" | 19 | | 19 | 19 | 33 | | | |
| 20.0 | | | | 20 | | | | | |
| 25.0 | | | | 25[1] | | | | | |
| 25.4 | 1" | 25 | | 25[2] | 25 | | | | |
| 31.75 | | | | 31 | | | | | |
| 32 | | | | 32 | | | | | |

[1] Para la forma de plaquita K (KNMX, KNUX) sólo se indica la longitud teórica de la arista de corte.

[1] Diseño métrico

[2] Diseño en pulgadas

**6** Espesor de plaquita, $s$ mm




01 s = 1.59
T1 s = 1.98
02 s = 2.38
03 s = 3.18
T3 s = 3.97
04 s = 4.76
05 s = 5.56
06 s = 6.35
07 s = 7.94
09 s = 9.52
10 s = 10.00
12 s = 12.00

**7** Radio de punta, $r_\varepsilon$ mm

M0, 02 $r_\varepsilon$ = 0.2
04 $r_\varepsilon$ = 0.4
08 $r_\varepsilon$ = 0.8
12 $r_\varepsilon$ = 1.2
16 $r_\varepsilon$ = 1.6
24 $r_\varepsilon$ = 2.4

**8** Estado del filo

F Filo de corte agudo

E Arista de corte tratada ER

T Faceta negativa

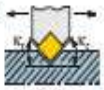
K Facetas negativa dobles

S Faceta negativa y filo de corte con tratamiento ER

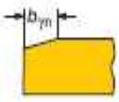
**9** Sentido de la herramienta

R Avance

L Avance

N Avance Avance 

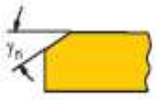
**10** Anchura de chaflán, mm




010 $b_{\gamma n}$ = 0.10
025 $b_{\gamma n}$ = 0.25
070 $b_{\gamma n}$ = 0.70
150 $b_{\gamma n}$ = 1.50
200 $b_{\gamma n}$ = 2.00

Para obtener más información, consultar los códigos en la página A60

**11** Ángulo de chaflán




15 $\gamma n = 15°$
20 $\gamma n = 20°$

**12** Opción del fabricante

El código ISO está compuesto por nueve símbolos incluyendo 8 y 9 que se utilizan solamente cuando sea necesario. Además, el fabricante puede añadir otros dos símbolos, p. ej.

WF = Wiper – acabado
- PF = ISO P – acabado
PR = ISO P – desbaste

## APÉNDICE F

## CÓDIGO CNC.

M03 S (Velocidad en rpm);
GOO U (-Profundidad de corte);
GO1 W (-Longitud mecanizada) F (Avance);
GOO U (Profundidad de corte);
GOOW (Longitud mecanizada);
M30;

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

**Operación:** Cilindrado.

**Parámetros de corte**:

Longitud Mecanizada = 364mm
Vc= 295m/min
D=70 mm
N=1341 rpm
ap= 1.2 mm
f= 0.25 mm/rev

### CÓDIGO CNC

M03 S1341;
GOO U-1.2;
GO1 W-364 F0.25;
GOO U1.2;
GOOW364;
M30;

# APÉNDICE G

# MEDICIONES DEL DESGASTE DE FLANCO

| ESPOL | | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F1 | 0.25 mm/rev | | 1.2 mm | | 295 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 1 | 72.86 | 87.6 | 0.067 | B | 0.072 | | |
| 2 | 106.54 | 66.1 | 0.078 | B | 0.083 | | |
| 3 | 154.25 | 91.5 | 0.098 | B | 0.101 | | |
| 4 | 196.25 | 79.0 | 0.110 | B | 0.112 | | |
| 5 | 226.63 | 55.2 | 0.112 | B | 0.115 | | |
| 6 | 296.87 | 78.4 | 0.130 | B | 0.131 | | |
| 7 | 355.17 | 64.8 | 0.135 | B | 0.139 | | |
| 8 | 449.09 | 101.0 | 0.155 | B | 0.160 | | |
| 9 | 526.51 | 83.1 | 0.159 | B | 0.169 | | |
| 10 | 590.47 | 68.7 | 0.170 | B | 0.170 | | |
| 11 | 640.82 | 53.8 | 0.172 | B | 0.173 | | |
| 12 | 724.36 | 88.3 | 0.178 | B | 0.181 | | |
| 13 | 797.98 | 78.3 | 0.183 | B | 0.183 | | |
| 14 | 859.17 | 70.0 | Falla | B | Falla | Tipo: 5.1 / 5.2 | Falla Catastrófica |

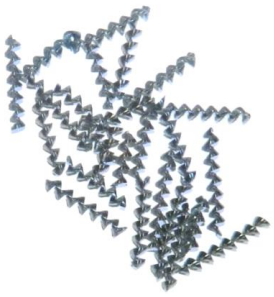
| ESPOL | | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F2 | 0.25 mm/rev | | 1.2 mm | | 350 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 2 | 65.03 | 88.8 | 0.074 | B | 0.077 | | |
| 3 | 94.10 | 67.3 | 0.087 | B | 0.090 | | |
| 4 | 134.71 | 92.5 | 0.105 | B | 0.108 | | |
| 5 | 171.23 | 80.2 | 0.115 | B | 0.117 | | |
| 6 | 199.76 | 58.0 | 0.119 | B | 0.122 | | |
| 7 | 260.49 | 79.7 | 0.151 | B | 0.158 | | |
| 8 | 310.79 | 65.9 | 0.165 | B | 0.170 | | |
| 9 | 389.66 | 99.9 | 0.169 | B | 0.173 | | |
| 10 | 453.95 | 81.8 | 0.171 | B | 0.175 | | |
| 11 | 507.13 | 68.0 | 0.182 | B | 0.188 | | |
| 12 | 587.48 | 101.5 | 0.208 | B | 0.220 | | |
| 13 | 588.31 | 87.2 | Falla | B | Falla | Tipo: 5.1 / 5.2 | Falla Catastrófica |

| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160412-PF CT5015 | F* | 0.25 mm/rev | 1.2 mm | 375 m/min | |

| Valores de Prueba | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 1 | 68.4 | 87.3 | 0.067 | B | 0.081 | | |
| 2 | 186.3 | 76 | 0.123 | B | 0.121 | | |
| 3 | 238.27 | 74.8 | 0.143 | B | 0.155 | | |
| 4 | 285.34 | 65.5 | 0.154 | B | 0.177 | | |
| 5 | 414.02 | 58.8 | 0.191 | B | 0.199 | Tipo: 2.2 / 5.2 | |

| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160412-PF CT5015 | F3 | 0.25 mm/rev | 1.2 mm | 400 m/min | |

| Valores de Prueba | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 3 | 83.51 | 68.5 | 0.077 | B | 0.079 | | |
| 4 | 120.13 | 93.8 | 0.098 | B | 0.105 | | |
| 5 | 152.93 | 81.3 | 0.113 | B | 0.117 | | |
| 6 | 178.41 | 62.4 | 0.117 | B | 0.122 | | |
| 7 | 232.17 | 80.9 | 0.141 | B | 0.147 | | |
| 8 | 276.58 | 67.0 | 0.177 | B | 0.181 | | |
| 9 | 344.77 | 98.5 | 0.185 | B | 0.194 | | |
| 10 | 400.75 | 80.7 | 0.200 | B | 0.212 | | |
| 11 | 448.19 | 66.8 | 0.295 | B | 0.305 | Tipo: 2.1 / 2.2 | Desgaste excesivo de Crater |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160408-PM GC4225 | | F1 | 0.3 mm/rev | | 1.6 mm | | 215 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 |  | |
| **1** | 31.30 | 50.6 | 0.049 | B | 0.052 | | |
| **2** | 88.72 | 96.9 | 0.080 | B | 0.084 | | |
| **3** | 130.53 | 71.4 | 0.092 | B | 0.097 | | |
| **4** | 188.77 | 96.4 | 0.097 | B | 0.102 | | |
| **5** | 233.37 | 73.0 | 0.103 | B | 0.106 | | |
| **6** | 266.94 | 54.0 | 0.118 | B | 0.118 | | |
| **7** | 359.49 | 90.3 | 0.118 | B | 0.120 | | |
| **8** | 429.94 | 68.6 | 0.119 | B | 0.120 | | |
| **9** | 483.55 | 52.2 | 0.120 | B | 0.121 | | |
| **10** | 577.84 | 88.6 | 0.120 | B | 0.121 | | |
| **11** | 658.14 | 88.6 | 0.122 | B | 0.122 | | |
| **12** | 787.56 | 63.1 | 0.124 | B | 0.125 | | |
| **13** | 990.72 | 90.3 | 0.125 | B | 0.126 | | |
| **14** | 1168.07 | 84.4 | 0.131 | B | 0.133 | | |
| **15** | 1328.08 | 80.4 | 0.135 | B | 0.137 | | |
| **16** | 1469.58 | 76.2 | 0.148 | B | 0.160 | | |
| **17** | 1602.19 | 72.1 | 0.156 | B | 0.168 | | |
| **18** | 1724.69 | 67.4 | 0.169 | B | 0.176 | | |
| **19** | 1831.01 | 64.4 | 0.170 | B | 0.177 | | |
| **20** | 1985.69 | 62.7 | 0.180 | B | 0.187 | | |
| **21** | 2247.84 | 57.6 | 0.186 | B | 0.196 | | |
| **22** | 2641.09 | 49.9 | 0.210 | B | 0.228 | | |
| **23** | 2751.19 | 96.5 | 0.213 | B | 0.234 | | |
| **24** | 2854.06 | 90.8 | 0.227 | B | 0.271 | | |
| **25** | 2945.86 | 81.5 | 0.256 | B | 0.286 | | |
| **26** | 3025.51 | 70.1 | 0.269 | B | 0.308 | | |
| **27** | 3094.67 | 61.9 | 0.414 | B | 0.453 | Tipo: 5.1 | |

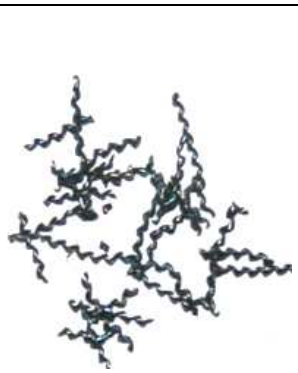
| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160408-PM GC4225 | F2 | 0.3 mm/rev | | 1.6 mm | | 305 m/min | |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (seg) (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max Zona | $VB_B$ max mm | | |
| 0 | - | 0 | - | 0 | | | |
| 1 | 23.98 | 53.3 | 0.064 | B | 0.068 | | |
| 2 | 63.61 | 95.5 | 0.083 | B | 0.086 | | |
| 3 | 93.81 | 73.0 | 0.090 | B | 0.092 | | |
| 4 | 135.55 | 97.9 | 0.104 | B | 0.107 | | |
| 5 | 168.06 | 74.6 | 0.107 | B | 0.110 | | |
| 6 | 193.21 | 56.7 | 0.118 | B | 0.122 | | |
| 7 | 255.04 | 85.6 | 0.122 | B | 0.125 | | |
| 8 | 306.39 | 70.3 | 0.124 | B | 0.128 | | |
| 9 | 346.06 | 53.8 | 0.136 | B | 0.140 | | |
| 10 | 416.22 | 93.3 | 0.137 | B | 0.142 | | |
| 11 | 473.07 | 74.3 | 0.160 | B | 0.167 | | |
| 12 | 520.20 | 61.6 | 0.171 | B | 0.205 | | |
| 13 | 593.65 | 96.1 | 0.200 | B | 0.259 | | |
| 14 | 673.48 | 98.9 | 0.385 | B | 0.476 | Tipo: 5.2 / 6.2 | |

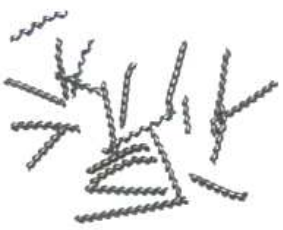
| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160408-PM GC4225 | F3 | 0.3 mm/rev | | 1.6 mm | | 345 m/min | |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max Zona | $VB_B$ max mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 1 | 22.40 | 54.9 | 0.069 | B | 0.073 | | |
| 2 | 57.02 | 94.0 | 0.085 | B | 0.090 | | |
| 3 | 84.80 | 74.5 | 0.091 | B | 0.094 | | |
| 4 | 122.57 | 99.5 | 0.100 | B | 0.102 | | |
| 5 | 152.24 | 76.2 | 0.104 | B | 0.106 | | |
| 6 | 175.83 | 59.5 | 0.112 | B | 0.116 | | |
| 7 | 232.46 | 87.2 | 0.121 | B | 0.128 | | |
| 8 | 279.63 | 71.9 | 0.141 | B | 0.144 | | |
| 9 | 317.52 | 55.6 | 0.144 | B | 0.144 | | |
| 10 | 379.33 | 91.7 | 0.156 | B | 0.163 | | |
| 11 | 427.36 | 72.8 | 0.187 | B | 0.191 | | |
| 12 | 468.39 | 60.0 | 0.211 | B | 0.325 | | |
| 13 | 532.65 | 94.4 | 0.392 | B | 0.548 | | |
| 14 | 604.69 | 100.5 | 0.606 | B | 0.964 | Tipo: 6.2 | |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160408-PM GC4225 | | F4 | 0.3 mm/rev | | 1.6 mm | | 460 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 1 | 28.50 | 99.5 | 0.071 | B | 0.075 | | |
| 2 | 54.46 | 92.5 | 0.099 | B | 0.107 | | |
| 3 | 76.66 | 76.1 | 0.106 | B | 0.110 | | |
| 4 | 106.06 | 100.9 | 0.125 | B | 0.131 | | |
| 5 | 129.06 | 77.7 | 0.132 | B | 0.138 | | |
| 6 | 151.17 | 61.1 | 0.148 | B | 0.157 | | |
| 7 | 195.84 | 88.9 | 0.158 | B | 0.161 | | |
| 8 | 232.04 | 73.3 | 0.178 | B | 0.185 | | |
| 9 | 284.38 | 102.4 | 0.212 | B | 0.213 | | |
| 10 | 331.80 | 90.2 | 0.339 | B | 0.387 | | |
| 11 | 385.10 | 102.0 | 0.647 | B | 0.721 | Tipo: 6.2 | |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F1 | 0.15 mm/rev | | 0.5 mm | | 305 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| 1 | 223.34 | 83.6 | 0.069 | C | 0.070 | | |
| 2 | 284.11 | 71.0 | 0.090 | C | 0.096 | | |
| 3 | 330.18 | 56.8 | 0.098 | C | 0.108 | | |
| 4 | 441.08 | 77.3 | 0.119 | C | 0.124 | | |
| 5 | 551.98 | 63.4 | 0.127 | C | 0.135 | | |
| 6 | 696.78 | 97.4 | 0.141 | C | 0.148 | | |
| 7 | 813.13 | 78.4 | 0.148 | C | 0.150 | | |
| 8 | 911.09 | 65.6 | 0.156 | C | 0.165 | | |
| 9 | 1070.96 | 100.3 | 0.161 | C | 0.168 | | |
| 10 | 1200.43 | 85.9 | 0.174 | C | 0.188 | | |
| 11 | 1335.32 | 85.4 | 0.180 | C | 0.200 | | |
| 12 | 1601.75 | 84.4 | 0.215 | C | 0.224 | | |
| 13 | 1734.13 | 83.8 | 0.240 | C | 0.243 | | |
| 14 | 1865.25 | 83.3 | 0.250 | C | 0.257 | Tipo: 4.3 | |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F2 | 0.5 mm/rev | | 0.5 mm | | 305 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| **1** | 49.15 | 60.5 | 0.062 | C | 0.064 | | |
| **2** | 70.34 | 84.0 | 0.071 | C | 0.077 | | |
| **3** | 102.78 | 56.3 | 0.073 | C | 0.078 | | |
| **4** | 135.95 | 76.7 | 0.086 | C | 0.090 | | |
| **5** | 163.34 | 76.7 | 0.088 | C | 0.094 | | |
| **6** | 270.25 | 65.1 | 0.103 | C | 0.110 | | |
| **7** | 359.97 | 99.8 | 0.118 | C | 0.120 | | |
| **8** | 437.17 | 85.4 | 0.136 | C | 0.141 | | |
| **9** | 507.19 | 77.2 | 0.144 | C | 0.150 | | |
| **10** | 569.66 | 68.8 | 0.146 | C | 0.158 | | |
| **11** | 600.66 | 67.8 | 0.150 | C | 0.159 | | |
| **12** | 627.20 | 58.1 | 0.152 | C | 0.163 | | |
| **13** | 651.78 | 53.1 | 0.164 | C | 0.168 | | |
| **14** | 700.76 | 52.7 | 0.174 | C | 0.179 | | |
| **15** | 749.78 | 52.6 | 0.178 | C | 0.188 | | |
| **16** | 815.98 | 46.7 | 0.197 | C | 0.206 | | |
| **17** | 879.80 | 45.0 | 0.200 | C | 0.209 | | |
| **18** | 943.62 | 46.7 | 0.211 | C | 0.225 | | |
| **19** | 1002.84 | 45.0 | 0.216 | C | 0.228 | | |
| **20** | 1047.98 | 94.8 | 0.227 | C | 0.231 | | |
| **21** | 1090.19 | 89.3 | 0.229 | C | 0.236 | | |
| **22** | 1165.79 | 80.0 | 0.234 | C | 0.242 | | |
| **23** | 1264.52 | 68.5 | 0.238 | C | 0.247 | | |
| **24** | 1350.72 | 60.2 | 0.243 | C | 0.252 | | |
| **25** | 1434.84 | 50.1 | 0.248 | C | 0.256 | | |
| **26** | 1556.31 | 50.1 | 0.252 | C | 0.257 | | |
| **27** | 1622.54 | 43.1 | 0.257 | C | 0.266 | Tipo: 4.1 | |

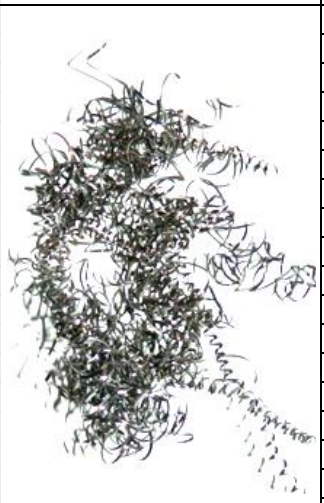
| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F3 | 0.15 mm/rev | | 1.5 mm | 305 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 |  | |
| 1 | 38.43 | 43.1 | 0.029 | B | 0.035 | | |
| 2 | 103.61 | 79.0 | 0.072 | B | 0.076 | | |
| 3 | 152.41 | 60.0 | 0.081 | B | 0.084 | | |
| 4 | 226.07 | 87.3 | 0.118 | B | 0.126 | | |
| 5 | 286.04 | 68.1 | 0.123 | B | 0.132 | | |
| 6 | 429.83 | 99.9 | 0.152 | B | 0.157 | | |
| 7 | 540.01 | 76.2 | 0.163 | B | 0.172 | | |
| 8 | 630.07 | 62.5 | 0.172 | B | 0.191 | | |
| 9 | 773.68 | 96.3 | 0.180 | B | 0.206 | | |
| 10 | 890.58 | 77.4 | 0.189 | B | 0.219 | | |
| 11 | 988.10 | 64.6 | 0.193 | B | 0.223 | | |
| 12 | 1138.23 | 99.5 | 0.200 | B | 0.233 | | |
| 13 | 1278.85 | 88.8 | 0.210 | B | 0.249 | | |
| 14 | 1526.80 | 79.0 | 0.242 | B | 0.272 | | |
| 15 | 1577.90 | 67.1 | Falla | B | Falla | Tipo: 5.1 | Falla Catastrófica |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160412-PF CT5015 | | F4 | 0.5 mm/rev | | 1.5 mm | 305 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | | Zona | mm | | |
| 0 | 0 | - | 0 | - | 0 |  | |
| 1 | 14.00 | 41.6 | 0.037 | B | 0.042 | | |
| 2 | 33.66 | 77.4 | 0.068 | B | 0.070 | | |
| 3 | 47.96 | 58.5 | 0.077 | B | 0.082 | | |
| 4 | 71.19 | 88.8 | 0.092 | B | 0.097 | | |
| 5 | 88.27 | 66.6 | 0.100 | B | 0.106 | | |
| 6 | 131.57 | 98.4 | 0.109 | B | 0.111 | | |
| 7 | 165.15 | 74.7 | 0.118 | B | 0.122 | | |
| 8 | 192.80 | 60.9 | 0.141 | B | 0.146 | | |
| 9 | 236.55 | 94.9 | Falla | B | Falla | Tipo: 5.1 | Falla Catastrófica |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | | Profundidad de Corte ap: | | Velocidad de Corte Vc: |
| TNMG160408-PM GC4225 | | F1 | 0.15 mm/rev | | 0.5 mm | | 305 m/min |
| Valores de Prueba | | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| **1** | 35.93 | 40.3 | 0.051 | C | 0.053 | | |
| **2** | 160.13 | 65.0 | 0.069 | C | 0.071 | | |
| **3** | 229.63 | 82.9 | 0.073 | C | 0.076 | | |
| **4** | 290.19 | 71.4 | 0.085 | C | 0.088 | | |
| **5** | 337.15 | 57.1 | 0.091 | C | 0.094 | | |
| **6** | 399.75 | 92.3 | 0.100 | C | 0.100 | | |
| **7** | 485.72 | 59.5 | 0.101 | C | 0.104 | | |
| **8** | 794.07 | 71.2 | 0.108 | C | 0.112 | | |
| **9** | 961.50 | 56.8 | 0.114 | C | 0.117 | | |
| **10** | 1695.64 | 74.7 | 0.145 | C | 0.147 | | |
| **11** | 2074.01 | 61.1 | 0.147 | C | 0.149 | | |
| **12** | 2238.03 | 54.5 | 0.152 | C | 0.155 | | |
| **13** | 2393.74 | 51.8 | 0.153 | C | 0.158 | | |
| **14** | 2751.86 | 45.3 | 0.158 | C | 0.161 | | |
| **15** | 3143.24 | 45.4 | 0.159 | C | 0.201 | | |
| **16** | 3320.20 | 43.7 | 0.172 | C | 0.213 | | |
| **17** | 3472.98 | 97.2 | 0.178 | C | 0.224 | | |
| **18** | 3769.58 | 94.4 | 0.181 | C | 0.254 | | |
| **19** | 4173.46 | 86.1 | 0.258 | C | 0.379 | | |
| **20** | 4444.44 | 73.6 | 0.272 | C | 0.396 | | |
| **21** | 4646.90 | 64.3 | 0.317 | C | 0.447 | | |
| **22** | 4733.64 | 54.7 | 0.371 | C | 0.486 | | |
| **23** | 4806.13 | 45.3 | 0.386 | C | 0.508 | Tipo: 1.3 | |

| ESPOL | | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | | |
| Nº Inserto | | Nº Filo | Avance fn: | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160408-PM GC4225 | | F2 | 0.5 mm/rev | 0.5 mm | 305 m/min | |
| Valores de Prueba | | | | | | |
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| **1** | 13.82 | 47.1 | 0.060 | C | 0.062 | | |
| **2** | 35.01 | 85.9 | 0.070 | C | 0.073 | | |
| **3** | 50.88 | 64.4 | 0.073 | C | 0.077 | | |
| **4** | 72.43 | 84.4 | 0.080 | C | 0.081 | | |
| **5** | 125.39 | 96.0 | 0.106 | C | 0.116 | | |
| **6** | 161.13 | 82.5 | 0.114 | C | 0.123 | | |
| **7** | 187.17 | 59.1 | 0.118 | C | 0.124 | | |
| **8** | 209.60 | 50.1 | 0.120 | C | 0.124 | | |
| **9** | 248.16 | 86.5 | 0.122 | C | 0.124 | | |
| **10** | 280.03 | 70.6 | 0.124 | C | 0.124 | | |
| **11** | 305.94 | 56.3 | 0.126 | C | 0.128 | | |
| **12** | 347.88 | 92.3 | 0.136 | C | 0.139 | | |
| **13** | 385.32 | 82.3 | 0.147 | C | 0.150 | | |
| **14** | 418.96 | 74.0 | 0.149 | C | 0.151 | | |
| **15** | 448.85 | 64.8 | 0.151 | C | 0.158 | | |
| **16** | 476.64 | 60.6 | 0.153 | C | 0.160 | | |
| **17** | 501.31 | 53.5 | 0.155 | C | 0.160 | | |
| **18** | 549.25 | 50.9 | 0.162 | C | 0.169 | | |
| **19** | 596.50 | 50.8 | 0.164 | C | 0.169 | | |
| **20** | 659.99 | 43.8 | 0.168 | C | 0.171 | | |
| **21** | 721.17 | 42.1 | 0.168 | C | 0.173 | | |
| **22** | 781.59 | 43.9 | 0.178 | C | 0.180 | | |
| **23** | 837.61 | 42.2 | 0.179 | C | 0.181 | | |
| **24** | 883.73 | 96.9 | 0.192 | C | 0.194 | | |
| **25** | 972.51 | 93.4 | 0.193 | C | 0.195 | | |
| **26** | 1093.17 | 84.6 | 0.205 | C | 0.209 | | |
| **27** | 1163.01 | 72.6 | 0.210 | C | 0.218 | | |
| **28** | 1253.55 | 63.3 | 0.223 | C | 0.236 | | |
| **29** | 1334.14 | 56.1 | 0.232 | C | 0.253 | | |
| **30** | 1451.63 | 47.7 | 0.261 | C | 0.265 | | |
| **31** | 1519.03 | 44.6 | 0.305 | C | 0.343 | Tipo: 2.2 | |

| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160408-PM GC4225 | F3 | 0.15 mm/rev | 1.5 mm | 305 m/min | |

| Valores de Prueba | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 |  | |
| **1** | 41.58 | 46.4 | 0.064 | B | 0.066 | | |
| **2** | 112.69 | 85.5 | 0.093 | B | 0.094 | | |
| **3** | 165.29 | 64.0 | 0.110 | B | 0.114 | | |
| **4** | 237.63 | 85.8 | 0.118 | B | 0.123 | | |
| **5** | 297.57 | 69.6 | 0.123 | B | 0.127 | | |
| **6** | 342.77 | 55.6 | 0.132 | B | 0.138 | | |
| **7** | 474.85 | 91.9 | 0.146 | B | 0.148 | | |
| **8** | 560.44 | 58.6 | 0.146 | B | 0.149 | | |
| **9** | 633.09 | 49.7 | 0.151 | B | 0.155 | | |
| **10** | 761.53 | 86.1 | 0.154 | B | 0.156 | | |
| **11** | 865.82 | 70.2 | 0.155 | B | 0.158 | | |
| **12** | 949.76 | 55.9 | 0.159 | B | 0.162 | | |
| **13** | 1088.90 | 91.9 | 0.175 | B | 0.188 | | |
| **14** | 1213.12 | 81.9 | 0.188 | B | 0.202 | | |
| **15** | 1325.42 | 73.7 | 0.210 | B | 0.331 | | |
| **16** | 1471.85 | 92.4 | 0.237 | B | 0.363 | | |
| **17** | 1603.28 | 83.1 | 0.260 | B | 0.366 | | |
| **18** | 1717.08 | 71.7 | 0.307 | B | 0.384 | Tipo: 4.3 | |

| ESPOL | Desgaste $VB_B$, vs Tiempo de Mecanización | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Prueba de Barras, Herramienta y Datos de Corte | | | | | |
| Nº Inserto | Nº Filo | Avance fn: | Profundidad de Corte ap: | Velocidad de Corte Vc: | |
| TNMG160408-PM GC4225 | F4 | 0.5 mm/rev | 1.5 mm | 305 m/min | |

| Valores de Prueba | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nº Medición | Tiempo T (s) | Diámetro D (mm) | Desgaste de Flanco | | | Forma de la viruta | Observaciones |
| | | | VBB (mm) | $VB_B$ max | | | |
| | | | | Zona | mm | | |
| **0** | 0 | - | 0 | - | 0 | | |
| **1** | 13.77 | 45.1 | 0.047 | B | 0.051 | | |
| **2** | 39.25 | 81.3 | 0.077 | B | 0.080 | | |
| **3** | 55.16 | 62.5 | 0.084 | B | 0.084 | | |
| **4** | 78.66 | 90.2 | 0.092 | B | 0.093 | | |
| **5** | 96.45 | 65.1 | 0.093 | B | 0.096 | | |
| **6** | 138.45 | 95.4 | 0.125 | B | 0.186 | | |
| **7** | 175.83 | 84.0 | 0.149 | B | 0.246 | | |
| **8** | 202.05 | 57.0 | 0.160 | B | 0.292 | | |
| **9** | 225.87 | 48.1 | 0.248 | B | 0.418 | | |
| **10** | 265.23 | 84.5 | 0.585 | B | 0.585 | Tipo: 5.1/ 5.2 | |

## APÉNDICE H

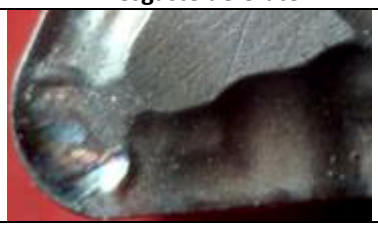
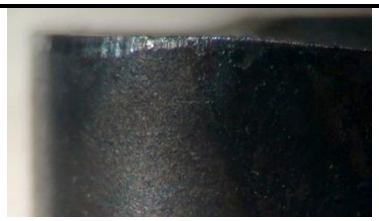
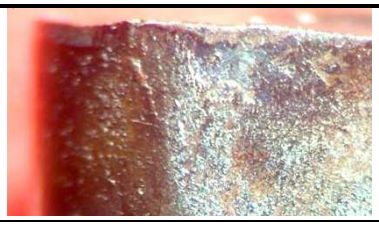
## PROGRAMA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS GRÁFICAS EN MATLAB

```
%Ingreso de resultados experimentales según la hoja  de datos " Mediciones
%del desgaste de flanco"

A=xlsread('Carburo.xls',1,'B74:B97');
B=xlsread('Carburo.xls',1,'D74:D97');
C=xlsread('Carburo.xls',2,'B76:B107');
D=xlsread('Carburo.xls',2,'D76:D107');
E=xlsread('Carburo.xls',3,'B40:B58');
F=xlsread('Carburo.xls',3,'D40:D58');
G=xlsread('Carburo.xls',4,'B31:B41');
H=xlsread('Carburo.xls',4,'D31:D41');

%F1
p = polyfit(A,B,9)
plot(A,B,'yo','LineWidth',2) % Curva real
hold on
xfit = 0:0.05:4806.13;
yfit = polyval(p,xfit);
h1=plot(xfit,yfit,'y','LineWidth',2) % Curva suavizada
ylim([0,0.6])
grid on

%F2
q = polyfit(C,D,7)
plot(C,D,'go','LineWidth',2) % Curva real
hold on
ofit = 0:0.05:1519.03;
yfit = polyval(q,ofit);
h2=plot(ofit,yfit,'g','LineWidth',2) % Curva suavizada
grid on

%F3
r = polyfit(E,F,5)
plot(E,F,'ro','LineWidth',2) % Curva real
hold on
rfit = 0:0.05:1717.08;
yfit = polyval(r,rfit);
h3=plot(rfit,yfit,'r','LineWidth',2) % Curva suavizada
grid on

%F4
s = polyfit(G,H,5)
plot(G,H,'bo','LineWidth',2) % Curva real
hold on
sfit = 0:0.05:265.23;
```

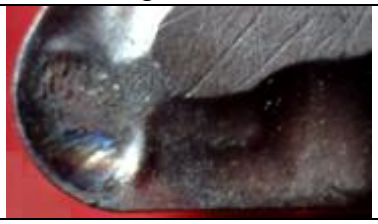
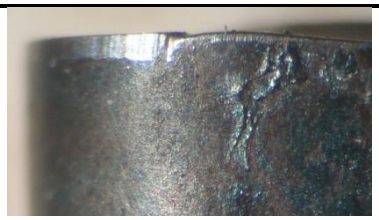
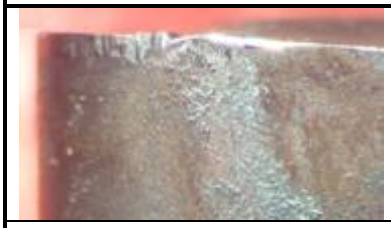
```
yfit = polyval(s,sfit);
h4=plot(sfit,yfit,'b','LineWidth',2) % Curva suavizada
grid on

%Valor del Criterio de desgaste
t=0:1:5000;
y=0.3;
h5=plot(t,y,'k','LineWidth',1);
hold off

%Rotulación de gráfica
legend( [h1 h2 h3 h4],'F1(ap=0.5/f =0.15/v=305)', 'F2(ap=0.5/f
=0.5/v=305)', 'F3(ap=1.5/f =0.15/v=305)','F4(ap=1.5/f =0.5/v=305)')
title('Desgaste de Flanco Vs Tiempo de Mecanización ')
xlabel('Tiempo de Mecanización  (seg)')
ylabel('Desgaste de Flanco (mm)')
```

# APÉNDICE I

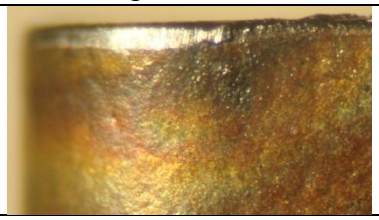
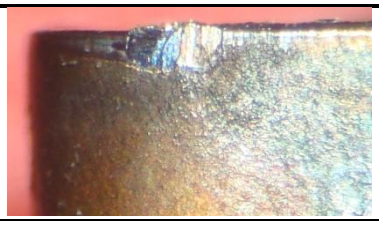
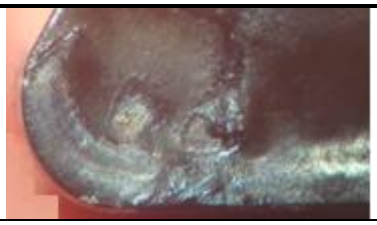
## EVOLUCIÓN DE DESGASTE DE FLANCO Y DESGASTE DE CRÁTER

| **Nº Inserto :** TNMG160412-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº Filo :** F2 | **fn:**0.25 mm/rev | **ap:**1.2 mm | **Vc:**350 m/min |
| **Desgaste de Flanco** | | **Desgaste de Crater** | |
| | |  | |
| **t=**134.71 s | | **t=**134.71 s | |
|  | | | |
| **t**=260.49 s | | **t**=260.49 s | |
|  | | | |
| **t**=453.95 s | | **t**=453.95 s | |
| | | | |
| **t**=588.31 s | | **t**=588.31 s | |

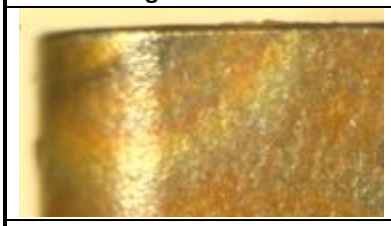
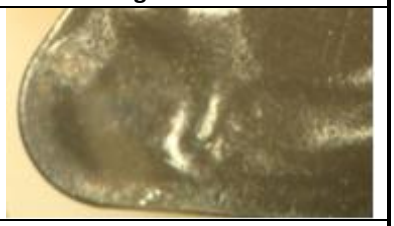
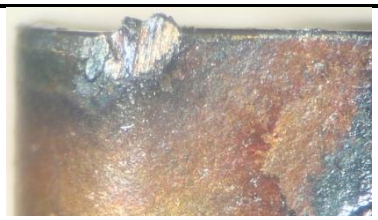
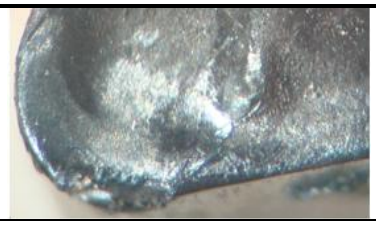
| **Nº Inserto :** TNMG160412-PF CT5015 | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº Filo :** F3 | **fn:**0.15 mm/rev | **ap:**1.5 mm | **Vc:**305 m/min |

| **Desgaste de Flanco** | **Desgaste de Crater** |
|---|---|
| |  |
| **t=**226.07 s | **t=**226.07 s |
|  | |
| **t**=540.01 s | **t**=540.01 s |
|  | |
| **t**=988.1 s | **t**=988.1 s |
| | |
| **t**=1577.9 s | **t**=1577.9 s |

| **Nº Inserto :** TNMG160408-PM GC4225 | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº Filo :** F2 | **fn:**0.3 mm/rev | **ap:**1.6 mm | **Vc:**305 m/min |

| **Desgaste de Flanco** | **Desgaste de Crater** |
|---|---|
|  | |
| **t=**168.06 s | **t=**168.06 s |
| | |
| **t**=306.39 s | **t**=306.39 s |
| | |
| **t**=473.07 s | **t**=473.07 s |
|  |  |
| **t**=673.48 s | **t**=673.48 s |

| **Nº Inserto :** TNMG160408-PM GC4225 | | | |
|---|---|---|---|
| **Nº Filo :** F4 | **fn:**0.5 mm/rev | **ap:**1.5 mm | **Vc:**305 m/min |

| **Desgaste de Flanco** | **Desgaste de Cráter** |
|---|---|
|  |  |
| **t=**39.25 s | **t=**39.25 s |
| | |
| **t**=96.45 s | **t**=96.45 s |
|  | |
| **t**=202.05 s | **t**=202.05 s |
| |  |
| **t**=265.23 s | **t**=265.23 s |

## APÉNDICE J

## TABLA FISHER VALORES F DE LA DISTRIBUCIÓN F DE FISHER

$1 - \alpha = 0.95$ $\quad v_1$ = grados de libertad del numerador

$1 - \alpha = P ( F \leq f_{\alpha, v1, v2} )$ $\quad v_2$ = grados de libertad del denominador

| $v_2$ \ $v_1$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 161.446 | 199.499 | 215.707 | 224.583 | 230.160 | 233.988 | 236.767 | 238.884 | 240.543 | 241.882 | 242.981 | 243.905 | 244.690 | 245.363 | 245.949 | 246.466 | 246.917 | 247.324 | 247.688 | 248.016 |
| 2 | 18.513 | 19.000 | 19.164 | 19.247 | 19.296 | 19.329 | 19.353 | 19.371 | 19.385 | 19.396 | 19.405 | 19.412 | 19.419 | 19.424 | 19.429 | 19.433 | 19.437 | 19.440 | 19.443 | 19.446 |
| 3 | 10.128 | 9.552 | 9.277 | 9.117 | 9.013 | 8.941 | 8.887 | 8.845 | 8.812 | 8.786 | 8.763 | 8.745 | 8.729 | 8.715 | 8.703 | 8.692 | 8.683 | 8.675 | 8.667 | 8.660 |
| 4 | 7.709 | 6.944 | 6.591 | 6.388 | 6.256 | 6.163 | 6.094 | 6.041 | 5.999 | 5.964 | 5.936 | 5.912 | 5.891 | 5.873 | 5.858 | 5.844 | 5.832 | 5.821 | 5.811 | 5.803 |
| 5 | 6.608 | 5.786 | 5.409 | 5.192 | 5.050 | 4.950 | 4.876 | 4.818 | 4.772 | 4.735 | 4.704 | 4.678 | 4.655 | 4.636 | 4.619 | 4.604 | 4.590 | 4.579 | 4.568 | 4.558 |
| 6 | 5.987 | 5.143 | 4.757 | 4.534 | 4.387 | 4.284 | 4.207 | 4.147 | 4.099 | 4.060 | 4.027 | 4.000 | 3.976 | 3.956 | 3.938 | 3.922 | 3.908 | 3.896 | 3.884 | 3.874 |
| 7 | 5.591 | 4.737 | 4.347 | 4.120 | 3.972 | 3.866 | 3.787 | 3.726 | 3.677 | 3.637 | 3.603 | 3.575 | 3.550 | 3.529 | 3.511 | 3.494 | 3.480 | 3.467 | 3.456 | 3.445 |
| 8 | 5.318 | 4.459 | 4.066 | 3.838 | 3.688 | 3.581 | 3.500 | 3.438 | 3.388 | 3.347 | 3.313 | 3.284 | 3.259 | 3.237 | 3.218 | 3.202 | 3.187 | 3.173 | 3.161 | 3.150 |
| 9 | 5.117 | 4.256 | 3.863 | 3.633 | 3.482 | 3.374 | 3.293 | 3.230 | 3.179 | 3.137 | 3.102 | 3.073 | 3.048 | 3.025 | 3.006 | 2.989 | 2.974 | 2.960 | 2.948 | 2.936 |
| 10 | 4.965 | 4.103 | 3.708 | 3.478 | 3.326 | 3.217 | 3.135 | 3.072 | 3.020 | 2.978 | 2.943 | 2.913 | 2.887 | 2.865 | 2.845 | 2.828 | 2.812 | 2.798 | 2.785 | 2.774 |
| 11 | 4.844 | 3.982 | 3.587 | 3.357 | 3.204 | 3.095 | 3.012 | 2.948 | 2.896 | 2.854 | 2.818 | 2.788 | 2.761 | 2.739 | 2.719 | 2.701 | 2.685 | 2.671 | 2.658 | 2.646 |
| 12 | 4.747 | 3.885 | 3.490 | 3.259 | 3.106 | 2.996 | 2.913 | 2.849 | 2.796 | 2.753 | 2.717 | 2.687 | 2.660 | 2.637 | 2.617 | 2.599 | 2.583 | 2.568 | 2.556 | 2.544 |
| 13 | 4.667 | 3.806 | 3.411 | 3.179 | 3.025 | 2.915 | 2.832 | 2.767 | 2.714 | 2.671 | 2.635 | 2.604 | 2.577 | 2.554 | 2.533 | 2.515 | 2.499 | 2.484 | 2.471 | 2.459 |
| 14 | 4.600 | 3.739 | 3.344 | 3.112 | 2.958 | 2.848 | 2.764 | 2.699 | 2.646 | 2.602 | 2.565 | 2.534 | 2.507 | 2.484 | 2.463 | 2.445 | 2.428 | 2.413 | 2.400 | 2.388 |
| 15 | 4.543 | 3.682 | 3.287 | 3.056 | 2.901 | 2.790 | 2.707 | 2.641 | 2.588 | 2.544 | 2.507 | 2.475 | 2.448 | 2.424 | 2.403 | 2.385 | 2.368 | 2.353 | 2.340 | 2.328 |
| 16 | 4.494 | 3.634 | 3.239 | 3.007 | 2.852 | 2.741 | 2.657 | 2.591 | 2.538 | 2.494 | 2.456 | 2.425 | 2.397 | 2.373 | 2.352 | 2.333 | 2.317 | 2.302 | 2.288 | 2.276 |
| 17 | 4.451 | 3.592 | 3.197 | 2.965 | 2.810 | 2.699 | 2.614 | 2.548 | 2.494 | 2.450 | 2.413 | 2.381 | 2.353 | 2.329 | 2.308 | 2.289 | 2.272 | 2.257 | 2.243 | 2.230 |
| 18 | 4.414 | 3.555 | 3.160 | 2.928 | 2.773 | 2.661 | 2.577 | 2.510 | 2.456 | 2.412 | 2.374 | 2.342 | 2.314 | 2.290 | 2.269 | 2.250 | 2.233 | 2.217 | 2.203 | 2.191 |
| 19 | 4.381 | 3.522 | 3.127 | 2.895 | 2.740 | 2.628 | 2.544 | 2.477 | 2.423 | 2.378 | 2.340 | 2.308 | 2.280 | 2.256 | 2.234 | 2.215 | 2.198 | 2.182 | 2.168 | 2.155 |
| 20 | 4.351 | 3.493 | 3.098 | 2.866 | 2.711 | 2.599 | 2.514 | 2.447 | 2.393 | 2.348 | 2.310 | 2.278 | 2.250 | 2.225 | 2.203 | 2.184 | 2.167 | 2.151 | 2.137 | 2.124 |
| 21 | 4.325 | 3.467 | 3.072 | 2.840 | 2.685 | 2.573 | 2.488 | 2.420 | 2.366 | 2.321 | 2.283 | 2.250 | 2.222 | 2.197 | 2.176 | 2.156 | 2.139 | 2.123 | 2.109 | 2.096 |
| 22 | 4.301 | 3.443 | 3.049 | 2.817 | 2.661 | 2.549 | 2.464 | 2.397 | 2.342 | 2.297 | 2.259 | 2.226 | 2.198 | 2.173 | 2.151 | 2.131 | 2.114 | 2.098 | 2.084 | 2.071 |
| 23 | 4.279 | 3.422 | 3.028 | 2.796 | 2.640 | 2.528 | 2.442 | 2.375 | 2.320 | 2.275 | 2.236 | 2.204 | 2.175 | 2.150 | 2.128 | 2.109 | 2.091 | 2.075 | 2.061 | 2.048 |
| 24 | 4.260 | 3.403 | 3.009 | 2.776 | 2.621 | 2.508 | 2.423 | 2.355 | 2.300 | 2.255 | 2.216 | 2.183 | 2.155 | 2.130 | 2.108 | 2.088 | 2.070 | 2.054 | 2.040 | 2.027 |
| 25 | 4.242 | 3.385 | 2.991 | 2.759 | 2.603 | 2.490 | 2.405 | 2.337 | 2.282 | 2.236 | 2.198 | 2.165 | 2.136 | 2.111 | 2.089 | 2.069 | 2.051 | 2.035 | 2.021 | 2.007 |
| 26 | 4.225 | 3.369 | 2.975 | 2.743 | 2.587 | 2.474 | 2.388 | 2.321 | 2.265 | 2.220 | 2.181 | 2.148 | 2.119 | 2.094 | 2.072 | 2.052 | 2.034 | 2.018 | 2.003 | 1.990 |
| 27 | 4.210 | 3.354 | 2.960 | 2.728 | 2.572 | 2.459 | 2.373 | 2.305 | 2.250 | 2.204 | 2.166 | 2.132 | 2.103 | 2.078 | 2.056 | 2.036 | 2.018 | 2.002 | 1.987 | 1.974 |
| 28 | 4.196 | 3.340 | 2.947 | 2.714 | 2.558 | 2.445 | 2.359 | 2.291 | 2.236 | 2.190 | 2.151 | 2.118 | 2.089 | 2.064 | 2.041 | 2.021 | 2.003 | 1.987 | 1.972 | 1.959 |
| 29 | 4.183 | 3.328 | 2.934 | 2.701 | 2.545 | 2.432 | 2.346 | 2.278 | 2.223 | 2.177 | 2.138 | 2.104 | 2.075 | 2.050 | 2.027 | 2.007 | 1.989 | 1.973 | 1.958 | 1.945 |
| 30 | 4.171 | 3.316 | 2.922 | 2.690 | 2.534 | 2.421 | 2.334 | 2.266 | 2.211 | 2.165 | 2.126 | 2.092 | 2.063 | 2.037 | 2.015 | 1.995 | 1.976 | 1.960 | 1.945 | 1.932 |
| 40 | 4.085 | 3.232 | 2.839 | 2.606 | 2.449 | 2.336 | 2.249 | 2.180 | 2.124 | 2.077 | 2.038 | 2.003 | 1.974 | 1.948 | 1.924 | 1.904 | 1.885 | 1.868 | 1.853 | 1.839 |
| 50 | 4.034 | 3.183 | 2.790 | 2.557 | 2.400 | 2.286 | 2.199 | 2.130 | 2.073 | 2.026 | 1.986 | 1.952 | 1.921 | 1.895 | 1.871 | 1.850 | 1.831 | 1.814 | 1.798 | 1.784 |
| 60 | 4.001 | 3.150 | 2.758 | 2.525 | 2.368 | 2.254 | 2.167 | 2.097 | 2.040 | 1.993 | 1.952 | 1.917 | 1.887 | 1.860 | 1.836 | 1.815 | 1.796 | 1.778 | 1.763 | 1.748 |
| 70 | 3.978 | 3.128 | 2.736 | 2.503 | 2.346 | 2.231 | 2.143 | 2.074 | 2.017 | 1.969 | 1.928 | 1.893 | 1.863 | 1.836 | 1.812 | 1.790 | 1.771 | 1.753 | 1.737 | 1.722 |
| 80 | 3.960 | 3.111 | 2.719 | 2.486 | 2.329 | 2.214 | 2.126 | 2.056 | 1.999 | 1.951 | 1.910 | 1.875 | 1.845 | 1.817 | 1.793 | 1.772 | 1.752 | 1.734 | 1.718 | 1.703 |
| 90 | 3.947 | 3.098 | 2.706 | 2.473 | 2.316 | 2.201 | 2.113 | 2.043 | 1.986 | 1.938 | 1.897 | 1.861 | 1.830 | 1.803 | 1.779 | 1.757 | 1.737 | 1.720 | 1.703 | 1.688 |
| 100 | 3.936 | 3.087 | 2.696 | 2.463 | 2.305 | 2.191 | 2.103 | 2.032 | 1.975 | 1.927 | 1.886 | 1.850 | 1.819 | 1.792 | 1.768 | 1.746 | 1.726 | 1.708 | 1.691 | 1.676 |
| 200 | 3.888 | 3.041 | 2.650 | 2.417 | 2.259 | 2.144 | 2.056 | 1.985 | 1.927 | 1.878 | 1.837 | 1.801 | 1.769 | 1.742 | 1.717 | 1.694 | 1.674 | 1.656 | 1.639 | 1.623 |
| 500 | 3.860 | 3.014 | 2.623 | 2.390 | 2.232 | 2.117 | 2.028 | 1.957 | 1.899 | 1.850 | 1.808 | 1.772 | 1.740 | 1.712 | 1.686 | 1.664 | 1.643 | 1.625 | 1.607 | 1.592 |
| 1000 | 3.851 | 3.005 | 2.614 | 2.381 | 2.223 | 2.108 | 2.019 | 1.948 | 1.889 | 1.840 | 1.798 | 1.762 | 1.730 | 1.702 | 1.676 | 1.654 | 1.633 | 1.614 | 1.597 | 1.581 |

Elaborada por Irene Patricia Valdez y Alfaro.

# BIBLIOGRAFÍA


1. SANDVICK, Catálogo 2009, Torneado General.

2. GROOVER MIKELL P., Fundamentals of Modern Manufacturing, Tercera Edición, Editorial John Wiley & Sons, 2007.

3. MICHELETTI, G. F.: Mecanizado por Arranque de Viruta, Blume, Barcelona, 1980.

4. IVAN BOHMAN, Catálogo de Materiales, 2009.

5. UDDEHOLM AISI 01, W.-Nr. 1.2510 Data Sheet, Edition: 4, 06.2005.

6. AMERICAN NATIONAL STANDARD, ‘‘Tool Life Testing With Single-Point Turning Tools’’ ANSI/ASME B94.55M-1985’’, ASME, New York, 1985.

7. SEROPE KALPAKJIAN STEVEN R. SCHMID, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Cuarta Edición, Mexico 2002.

8. VIKTOR P. ASTAKHOV AND J. PAULO DAVIM, Tools (Geometry and Material) and Tool Wear, 2008, XIV, 361p. 222illus. Hardcover.

9. NACARÍ DEL CARMEN MARÍN CALVO, Análisis Termomecánico de la Influencia del Desgaste Geométrico de las Herramientas en Procesos de Corte Ortogonal de Aceros Inoxidables Austeníticos, Leganés, Diciembre de 2010.

10. 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.

11. L. W. HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, R. PÉREZ-RODRÍGUEZ, P. ZAMBRANO-ROBLED, Estudio del Desgaste del Flanco de Carburos Recubiertos y Cermet Durante el Torneado de Alta Velocidad en Seco del Acero AISI 1045, Revista de Metalurgia, Julio 2010.

12. JOSÉ MIGUEL CALVA CUMBICUS, Análisis del Tiempo de Vida de una Herramienta de Corte para el Maquinado del Acero AISI D6, Mediante el Uso de la Ecuación de Taylor y Criterios de Desgaste, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador, 2011.

13. GARCIA JARAMILLO, LINO ANDRES, ALBAN CHAPIRO, MARCELO ANTONIO, 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, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador, Diciembre 2011.

14. WASHINGTON XAVIER ORTIZ GARCÉS, JORGE LEANDRO VANEGAS ROBLES, Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador, Diciembre 2011, Septiembre 2011.