



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DEL DESGASTE PROGRESIVO EN LA  
HERRAMIENTA DE MAQUINADO UTILIZANDO LA  
ECUACIÓN DE TAYLOR**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**P R E S E N T A:**

**CLARO FLORES GALVAN**



**DIRECTOR DE TESIS  
DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO**

**Abril 2015**

## AGRADECIMIENTOS

# Índice

## INTRODUCCIÓN

<b>CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES DEL MAQUINADO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 TEORÍA DEL MAQUINADO EN METALES .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 El proceso de torneado.....	1
<b>1.2 HERRAMIENTAS DE CORTE.....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Fuerzas de corte.....	4
1.2.2 Formación de la viruta.....	6
1.2.3 Aproximación del proceso de torneado por el modelo de corte ortogonal .....	12
<b>1.3 FLUIDOS DE CORTE.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS.....</b>	<b>14</b>
<b>1.5 DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE .....</b>	<b>17</b>
<b>1.6 ECUACIÓN DE TAYLOR .....</b>	<b>24</b>
<b>1.7 CARACTERÍSTICAS DEL ACERO 8620 Y RECUBRIMIENTO PVD EN EL INSERTO DE CORTE.....</b>	<b>27</b>
<b>1.8 ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL “VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE” .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1. ENSAYO DE JOMINY .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2. TEMPLE .....</b>	<b>34</b>
<b>2.3 INSERTO DE CORTE DNMG 15 06 08-MF 1 125 .....</b>	<b>36</b>
<b>2.4 PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS.....</b>	<b>37</b>
<b>2.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE .....</b>	<b>42</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA .....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 RESULTADOS EN EL ENSAYO DE JOMINY Y TRATAMIENTO TÉRMICO (TEMPLE).....</b>	<b>44</b>
<b>3.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE MAQUINADO “DESGASTE DE LA HERRAMIENTA” .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3 CÁLCULOS DE C Y n (ECUACIÓN DE TAYLOR) PARA LA VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE MAQUINADO:.....</b>	<b>56</b>

<b>CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>60</b>
<b>4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 CONCLUSIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO (Lista de figuras) .....</b>	<b>67</b>

### INTRODUCCIÓN

El proceso de maquinado de metales es fundamental en la industria metalmeccánica; en especial el proceso de torneado, que es un proceso de maquinado por arranque de viruta realizado por la combinación de rotación de la pieza de trabajo, avance y profundidad de la herramienta, hasta lograr una geometría deseada.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Analizar el desgaste progresivo que se presenta en la herramienta durante el proceso de maquinado, empleando los mecanismos de desgaste y falla.
- Plantear un modelo experimental por el método de regresión lineal, con base en la ecuación de Taylor.

La importancia de esta investigación radica, que durante el proceso de maquinado las herramientas de corte están expuestas a ser afectadas por diversas condiciones, como son, temperatura, esfuerzos, deformaciones, tensiones residuales, fricción, adhesión, difusión, oxidación, así como el efecto abrasivo provocado por el deslizamiento de la viruta sobre la superficie de incidencia de la herramienta y también la influencia que tienen los parámetros de corte como son: velocidad de corte, profundidad de corte y avance.

Por tal motivo, se plantea realizar la presente investigación, orientada a determinar el desgaste y por consiguiente la reducción de vida útil de la herramienta durante el proceso de maquinado.

El presente trabajo está compuesto de cuatro capítulos que a continuación se mencionan:

En el primer capítulo se describen los conceptos generales del proceso de torneado; zonas de generación de calor, fuerzas de corte, formación de viruta, fluidos de corte. Así como también se describen las herramientas de corte, desde los recubrimientos utilizados para alargar la vida útil de la herramienta, hasta el desgaste y deformación que presentan durante el maquinado.

## Introducción

En el segundo capítulo se describe el desarrollo experimental: ensayo de Jominy en el acero 8620 para determinar el comportamiento de la dureza en el material, tratamiento térmico en el material, ensayos de desgaste en la herramienta de corte y cálculo de las constantes de la ecuación de Taylor de forma experimental.

En el tercer capítulo se realizó el análisis de los resultados obtenidos del desgaste de la herramienta de corte. En el primer análisis se obtuvieron imágenes y mediciones del desgaste del flanco con ayuda del microscopio electrónico de barrido. En el segundo análisis se obtuvieron las constantes de la ecuación de Taylor para conocer el tiempo de vida útil de la herramienta.

En el cuarto capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos y se obtiene las conclusiones respecto al estudio realizado.

## CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES DEL MAQUINADO

### 1.1 TEORÍA DEL MAQUINADO EN METALES

El proceso de maquinado de metales por arranque de viruta, se define mediante la interacción de la herramienta de corte y el material de trabajo, dicho proceso se realiza con el desplazamiento y corte de la herramienta sobre el material para remover el excedente de la pieza de trabajo y darle una forma deseada. En el momento que la herramienta realiza un corte en el material de trabajo se producen fuerzas de corte que desprenden el material excedente o también llamado viruta, en tal caso, las herramientas deben soportar dichas fuerzas de corte durante el maquinado para evitar algún defecto superficial en la herramienta y en el acabado superficial de la pieza de trabajo.

#### 1.1.1 El proceso de torneado

**El torneado** es un proceso de maquinado por arranque de viruta en combinación con la rotación de la pieza de trabajo, avance y profundidad de la herramienta (figura 1), cuya finalidad es lograr una geometría deseada y obtener un buen acabado superficial.

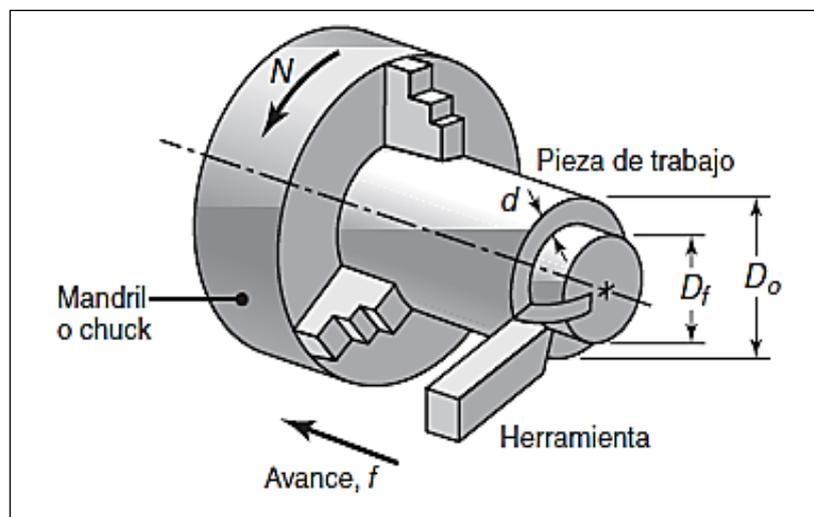


Figura 1. Esquema de la operación del proceso de torneado y condiciones en el proceso de torneado (Kalpakjian, Schmid, 2008).

En el proceso de torneado existen varias operaciones de maquinado, siendo las más comunes; cilindrado y refrentado (figura 1.1):

- Cilindrado: la herramienta se desplaza en dirección paralela al eje de la pieza.

- Refrentado: la herramienta se desplaza en dirección perpendicular al eje de giro de la pieza.

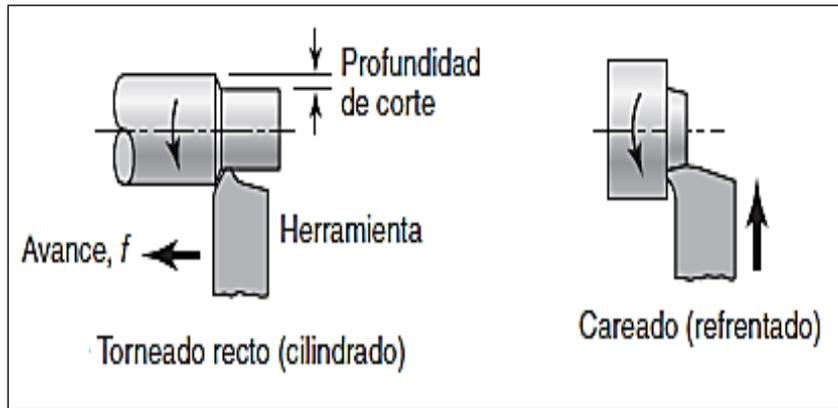


Figura 1.1. Operaciones básicas en el proceso de torneado (Kalpakjian, Schmid, 2008).

Así mismo, en el proceso de torneado se presentan zonas de deformación, por lo cual es necesario representar las zonas donde ocurren este tipo de deformaciones en el contacto herramienta-material. Obsérvese la sección transversal del proceso de maquinado (figura 1.2) se representan las zonas de deformación (primaria y secundaria). La *zona primaria* se presenta entre el material de trabajo y la viruta desprendida, la *zona secundaria* se presenta entre la herramienta y la zona de desprendimiento de la viruta.

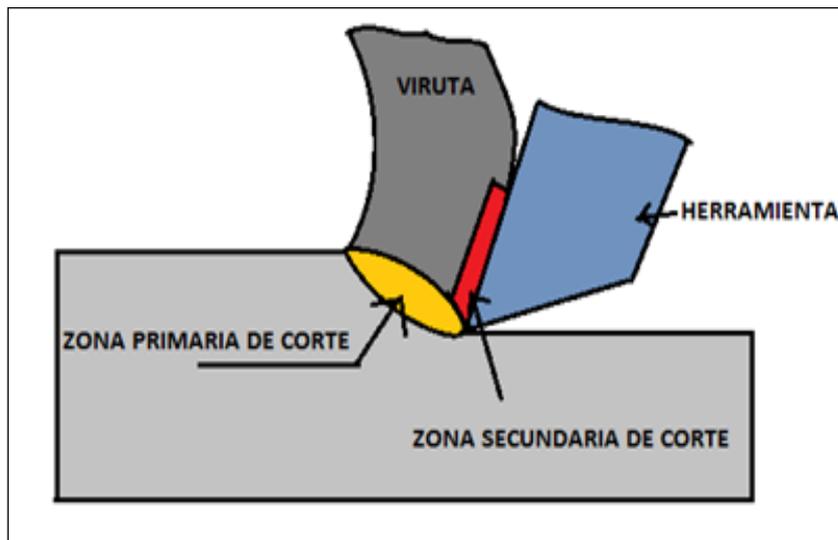


Figura 1.2. Sección transversal del proceso de maquinado (Zonas de deformación).

Las variables que se presentan durante el proceso de torneado son los siguientes: las herramientas de corte, fuerzas de corte, formación de viruta y los fluidos de corte.

## 1.2 HERRAMIENTAS DE CORTE

Las herramientas utilizadas en el proceso de maquinado están sometidas a temperaturas y esfuerzos elevados lo que implica un desgaste progresivo en la herramienta de corte, por lo tanto, esto nos lleva a considerar dos aspectos importantes de las herramientas, que son los siguientes:

1. Material de la herramienta: El material debe soportar temperaturas, esfuerzos y desgaste durante el maquinado.
2. Geometría de la herramienta: Optimización de la geometría de la herramienta para un cierto tipo de maquinado.

Así mismo, es importante considerar que las herramientas de corte pueden fallar por diversas causas, siendo las principales las siguientes:

- Falla por fractura: Se puede presentar debido al exceso de la fuerza de corte.
- Falla por temperatura: Las temperaturas elevadas durante el maquinado pueden deformar el material de la herramienta y reducir sus propiedades mecánicas.
- Falla por desgaste (desgaste gradual): se presenta como un desgaste excesivo en el borde la herramienta, por lo tanto, puede ocasionar una reducción en la calidad superficial de corte.

Los ángulos en las herramientas de corte juegan un papel importante durante el proceso de maquinado, estos son; ángulo de incidencia ( $\alpha$ ), ángulo de filo ( $\beta$ ), ángulo de desprendimiento ( $\gamma$ ), obsérvese la (figura 1.3):

- Ángulo de incidencia [ $\alpha$ ]: Ángulo formado entre la superficie de incidencia de la herramienta y la pieza de trabajo.
- Ángulo de filo [ $\beta$ ]: Ángulo formado por la cara de desprendimiento y la superficie de incidencia de la herramienta.
- Ángulo de desprendimiento [ $\gamma$ ]: Ángulo formado entre la cara de desprendimiento y perpendicular a la dirección de corte.

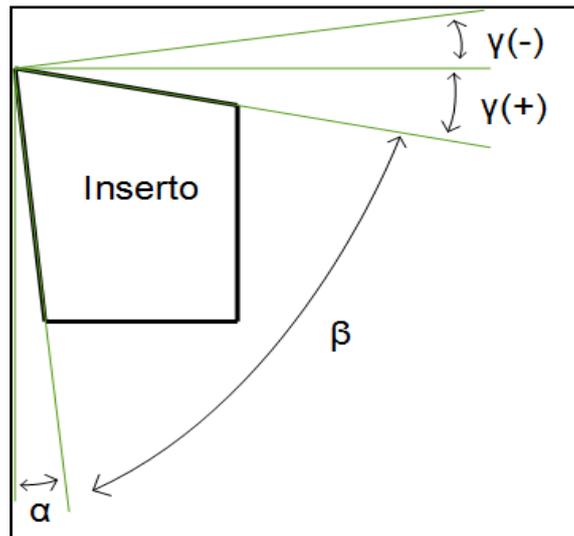


Figura 1.3. Ángulos en la herramienta de corte.

Por lo tanto, los ángulos de la herramienta (ángulo incidencia y ángulo de desprendimiento), pueden presentar variantes que reducen la vida de la herramienta, siendo las más comunes las siguientes:

- Al considerar un ángulo de incidencia ( $\alpha$ ) muy cerrado, la cara de incidencia de la herramienta estará en contacto con el material, por lo tanto, podría ocasionar un desgaste excesivo de la herramienta, además de generar fricción con la nueva superficie que se genera y aumentar la temperatura en esa zona.
- Al considerar un ángulo de desprendimiento mayor ( $\gamma$ ), la herramienta tendrá un buen corte y acabado superficial, pero una de las consideraciones que se debe tener en cuenta en este tipo de ángulo es que afecta considerablemente el filo y puede ocasionar fractura o astillamiento en la herramienta. En general, las herramientas de corte se clasifican con geometría positiva ( $\gamma > 0$ ) y con geometría negativa ( $\gamma < 0$ ).

### 1.2.1 Fuerzas de corte

Es de suma importancia conocer las fuerzas que actúan en la herramienta durante el proceso de torneado, obsérvese la figura 1.4; la componente  $F_t$  (fuerza de avance) actúa en la dirección longitudinal del avance,  $F_r$  (fuerza radial) actúa en la dirección del avance radial de la herramienta y  $F_c$  (fuerza de corte) actúa en dirección tangencial a la superficie de la pieza.

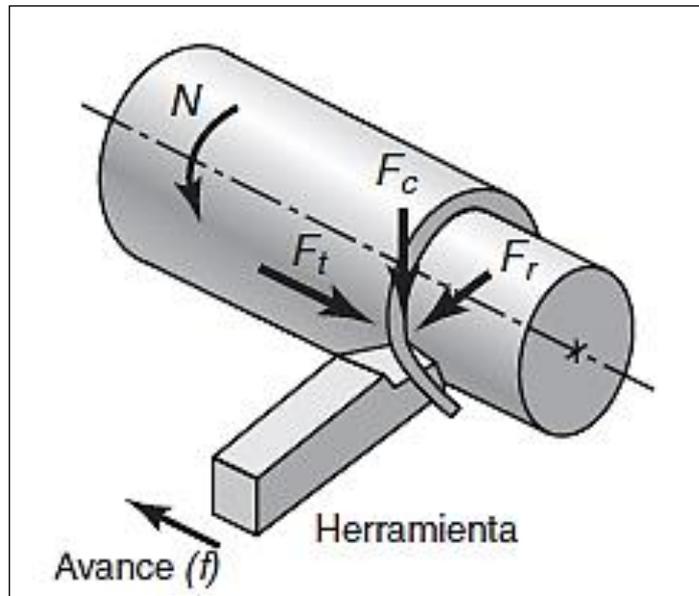


Figura 1.4. Representación de las fuerzas de corte que actúan en la herramienta (Kalpakjian, Schmid, 2008).

Las fuerzas que actúan sobre la herramienta en el corte ortogonal pueden observarse en la figura 1.5. Fuerza de corte [ $F_c$ ]: Se presenta tangencialmente a la pieza de trabajo, además su componente se presenta en la dirección del movimiento del corte. Fuerza de avance [ $F_t$ ]: Fuerza de empuje en dirección normal a la velocidad de corte, estas dos fuerzas producen la fuerza resultante  $R$ . (Shaw 2005).

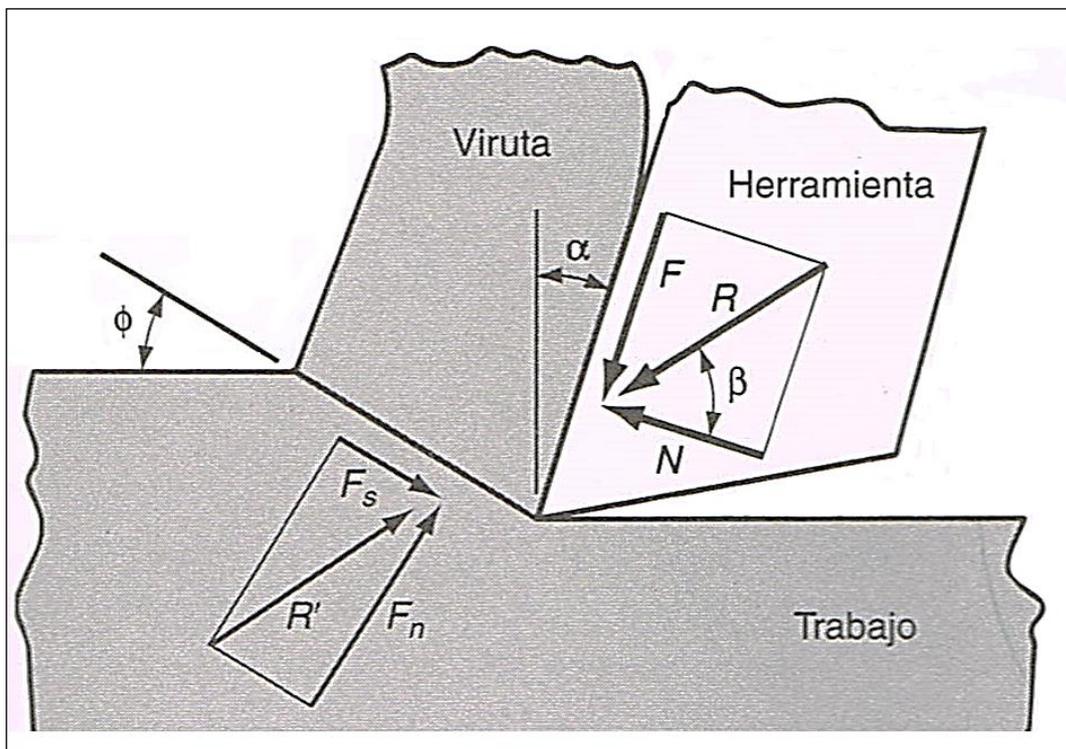


Fig. 1.5. Fuerzas que actúan en la herramienta en el corte ortogonal (Kalpakjian, 2002).

Análisis del sistema de fuerzas que actúan en la herramienta y el material de trabajo de acuerdo a la sección transversal del proceso de maquinado (figura 1.5); al descomponer la fuerza resultante en dos fuerzas sobre la cara de la herramienta se obtiene una fuerza de fricción  $F$ , que se presenta entre la cara de la herramienta y viruta, y una fuerza normal  $N$  perpendicular a ella. De acuerdo a la figura 1.5 se obtiene lo siguiente:

**Herramienta**

F: fuerza de fricción

N: fuerza normal

Ecuación 1.1  $F = R \text{ sen } (\beta)$

Ecuación 1.2  $N = R \text{ cos } (\beta)$

$\beta$ = ángulo de filo

R= fuerza resultante

**Pieza de trabajo**

$F_s$ = fuerza cortante

$F_n$ =fuerza normal

Ecuación 1.3  $F_s = F_c \text{ cos } \phi - F_t \text{ sen } \phi$

Ecuación 1.4  $F_n = F_c \text{ sen } \phi - F_t \text{ cos } \phi$

$\phi$ = ángulo del plano de corte

La relación de  $F$  y  $N$  es el coeficiente de fricción  $\mu$ , dicho coeficiente de fricción en el corte de metales se encuentra entre en el rango 0.5 y 2, el cual indica que la formación de la viruta se encuentra con una considerable resistencia de fricción al desplazarse sobre la cara de la herramienta. (Kalpalkjian, 2002), y se expresa de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{F_t + F_c \tan(\alpha)}{F_c - F_t \tan(\alpha)}$$

**1.2.2 Formación de la viruta**

La formación de la viruta tiene su origen en la zona primaria de deformación o zona de cizalladura para seguir su trayectoria hacia la zona secundaria de deformación que se presenta entre la herramienta de corte y formación de la viruta. Es importante mencionar que en las zonas de deformación primaria y secundaria se originan tensiones residuales, esfuerzos y altas temperaturas; por lo cual es necesario considerar el tipo de material y las condiciones de corte adecuadas, durante la formación de la viruta existen diversas formas que se pueden presentar, siendo las más comunes; discontinua, continua, segmentadas y BUE (figura 1.6):

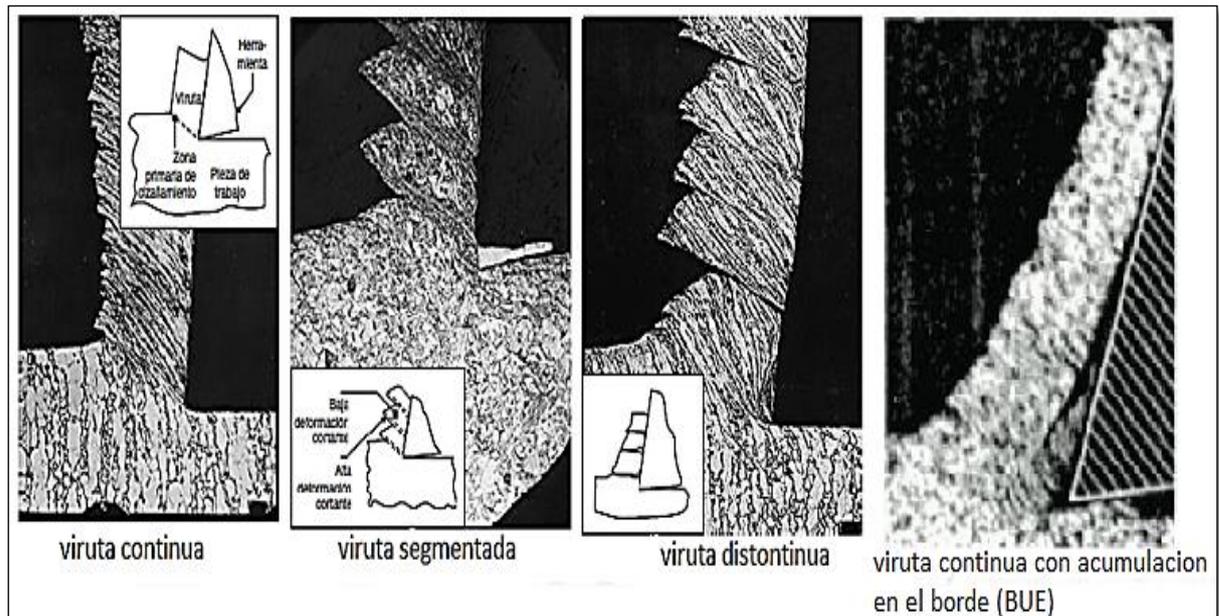


Figura 1.6. Tipos de formación de viruta (Kalpakjian, Schmid, 2008).

- *Virutas con elementos fragmentados y separados (viruta discontinua):* este tipo de viruta se origina en materiales duros, el material excedente se forma en segmentos separados y se obtiene un acabado irregular en el maquinado.
- *Virutas continúa:* se forman en materiales suaves o dúctiles, como son: acero con bajo contenido en carbono, aluminio, cuando se trabajan con este tipo de materiales se forman virutas largas y continuas y se obtiene un buen acabado superficial.
- *Virutas segmentadas:* se forman en metales de baja conductividad térmica y baja resistencia, al tener estas propiedades los materiales disminuyen su resistencia con el aumento de la temperatura, su peculiaridad es que tienen aspecto de diente de sierra en un solo lado de la superficie.
- *Viruta BUE:* se presenta en el maquinado de materiales dúctiles, la fricción que se genera entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones de material de trabajo en la geometría de la herramienta, en especial cerca del filo de corte.

En la figura 1.7 se representan las velocidades que actúan durante la formación de la viruta.

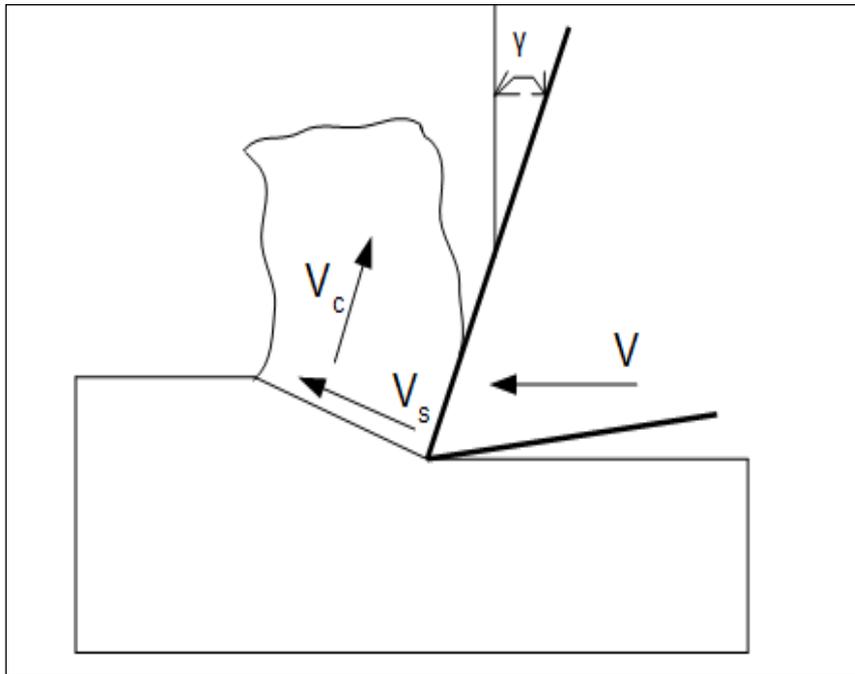


Fig. 1.7. Velocidades de trabajo durante la formación de viruta.

- Velocidad de corte ( $V$ ): velocidad que se presenta entre la herramienta y material de trabajo.
- Velocidad de deslizamiento ( $V_s$ ): velocidad relativa de la viruta con respecto a la pieza.
- Velocidad de la viruta con respecto a la herramienta ( $V_c$ ).

Si bien durante la formación de la viruta existen zonas de deformación, existen también zonas de generación de calor que se presentan durante el proceso de maquinado, es decir, el calor que se genera en el proceso de maquinado se propaga desde el material hacia el interior de la herramienta por medio de conducción térmica. En la (figura 1.8) se representan las zonas de generación de calor, las cuales son; *zona de deformación plástica primaria* "a" se genera en la zona de cizallamiento, *zona de deformación plástica secundaria* "b" se genera entre la viruta y herramienta, así como la fricción que se presenta entre la herramienta y la pieza de trabajo.

Temperatura en la zona de deformación primaria

$$\theta_s = \frac{(1 - \beta)Q_s}{\rho c v h b}$$

Dónde:

$Q_s$  = Calor generado en la zona de deformación primaria

$\beta$  = Porcentaje del calor generado en el plano de cizallamiento y transmitido a la pieza

$\rho$  = Densidad

$c$  = Calor específico

$h$  = Espesor de maquinado

$b$  = Ancho de corte (ancho de la viruta)

$v$  = velocidad de corte

Temperatura en la zona de deformación secundaria

$$\theta_{max} = \theta_o + \theta_s + \theta_m$$

Dónde:

$\theta_o$  = Temperatura inicial de la pieza

$\theta_s$  = Temperatura zona de deformación primaria

$\theta_m$  = Temperatura zona de deformación secundaria

Rapier estableció la hipótesis de que el calor generado debido a la interacción entre viruta y herramienta es plana y uniforme; con base en lo anterior dedujo la siguiente ecuación:

$$\frac{\theta_m}{\theta_a} = 1.13 \sqrt{\frac{R_T}{\alpha_1}}$$

$R_T$  = Rugosidad superficial (profundidad máxima del surco de cresta o valle)

$\alpha_1$  = ángulo de incidencia lateral

$\theta_a$  = aumento de la temperatura media debido al rozamiento

$Q_a$  = cantidad de calor por rozamiento

$$\theta_a = \frac{Q_a}{\rho c v h b}$$

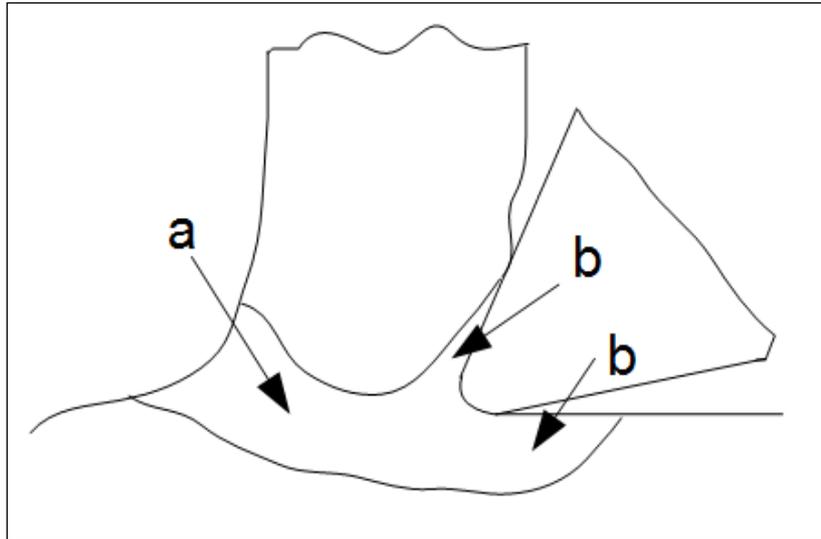


Figura1.8. Zonas de generación de calor en la formación de viruta.

Durante la formación de la viruta se presentan dos tipos de transferencia de calor, en la figura 1.9 se muestra la transferencia de calor por conducción y convección; *Conducción "1"*: transferencia de calor entre dos puntos (material y filo de la herramienta); *Convección "2"*: se transfiere calor debido al desprendimiento de la viruta.

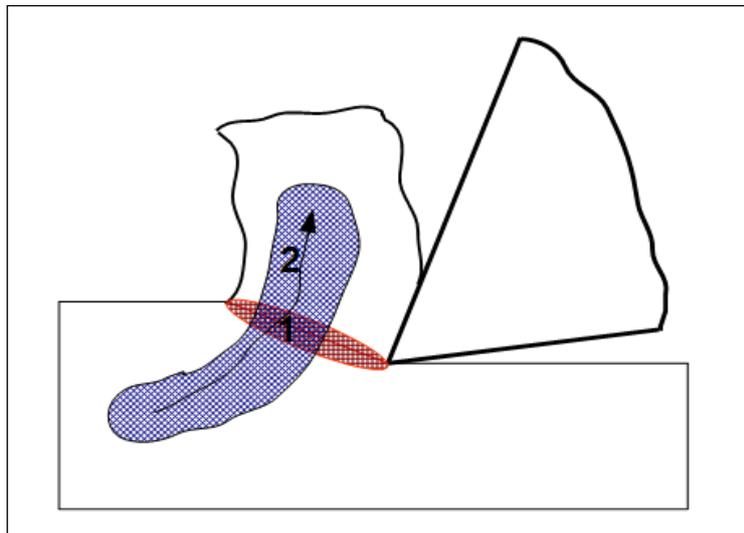
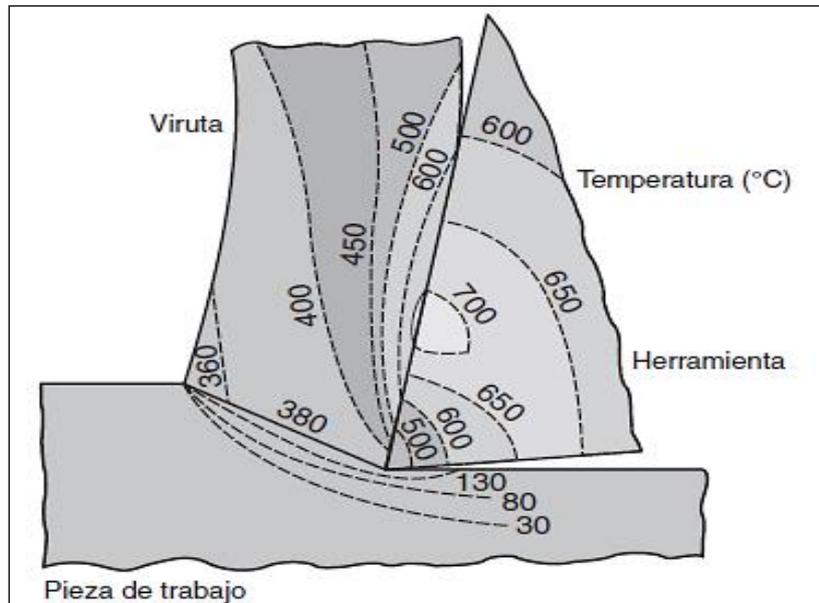


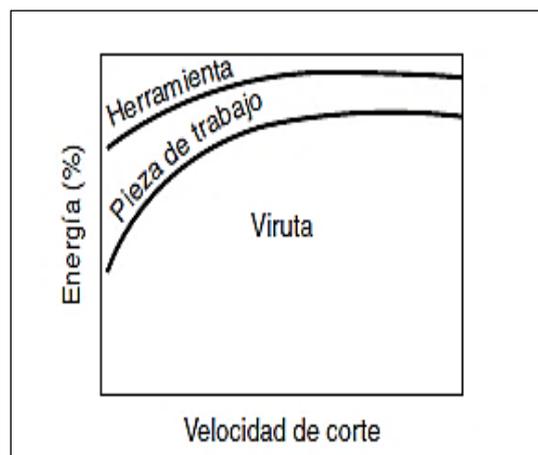
Figura 1.9. Zonas de transferencia de calor durante la formación de viruta.

Existen diversos métodos para visualizar la distribución de temperaturas durante el proceso de maquinado, uno de ellos es el método utilizado por Boothroyd que dedujo la distribución de temperaturas durante la formación de la viruta por el método fotográfico de rayos infrarrojos.



**Figura 1.10.** Distribución de los gradientes de temperatura en las zonas del proceso de maquinado (Herramienta y pieza de trabajo) (Kalpakjian, Schmid, 2008).

Obsérvese la figura 1.10 se muestra la distribución de temperaturas en la pieza de trabajo y la herramienta. Los gradientes de temperatura en la pieza de trabajo y viruta se generan en la zona primaria de corte o cizallamiento y posteriormente en el desplazamiento de la viruta, se ejemplifica la distribución hacia la zona secundaria de corte en el cual se generan las temperaturas más elevadas; Con base en la figura 1.10 se observa la distribución de temperaturas en la herramienta, las temperaturas más elevadas se presentan en la zona del filo de la herramienta (ángulo de desprendimiento), posteriormente las temperaturas disminuyen en la geometría más alejada al filo de corte.



**Figura 1.11.** Porcentaje de calor que se transfiere a la herramienta, pieza de trabajo y viruta (Kalpakjian, Schmid, 2008).

Obsérvese la figura 1.11 la transferencia de calor (% Energía) en función de la velocidad de corte; se ejemplifica la razón de la transferencia de calor hacia la viruta con un porcentaje mayor y, un menor porcentaje en la herramienta de corte y la pieza de trabajo. También se observa que con el incremento de la velocidad de corte la viruta transfiere un mayor porcentaje de calor con respecto a la herramienta y pieza.

### 1.2.3 Aproximación del proceso de torneado por el modelo de corte ortogonal

El modelo de corte ortogonal se puede utilizar para aproximar el proceso de torneado y otras operaciones de maquinado. En la tabla 1 se muestra la simplificación del modelo de corte ortogonal a la operación de torneado, así como también en la figura 1.12 se ejemplifican dichas conversiones.

Operaciones de torneado	Modelo de corte ortogonal
Avance $f$	Espesor de la viruta antes del corte $t_0$
Profundidad $d$	Ancho de corte $w$
Velocidad de corte $v$	Velocidad de corte $v$
Fuerza de corte $F_c$	Fuerza de corte $F_c$
Fuerza de avance $F_f$	Fuerza de empuje $F_t$

Tabla 1. Conversión del modelo de corte ortogonal a la operación de torneado.

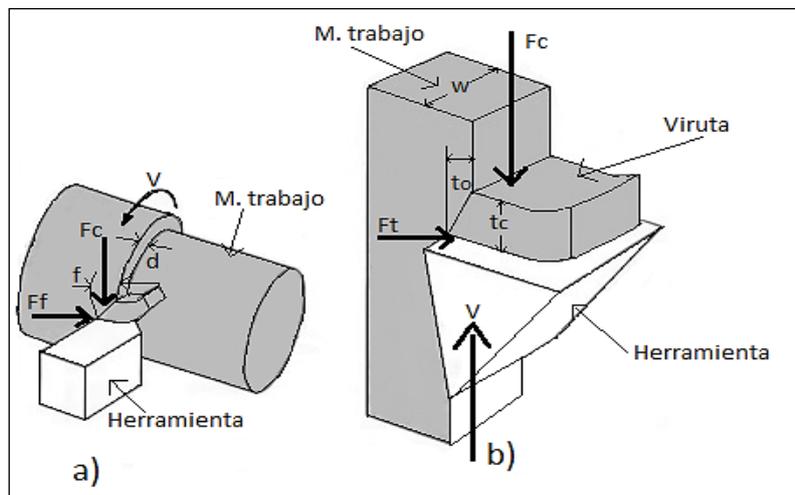


Figura 1.12. Visualización de la Conversión del modelo de corte ortogonal (b) a la operación de torneado (a).

### 1.3 FLUIDOS DE CORTE

Los fluidos de corte tienen sus inicios en el año 1890 cuando F.W.Taylor realizaba pruebas de corte, en sus inicios se utilizaba agua para disminuir el calor generado durante el maquinado, posteriormente se utilizaba una combinación de agua y sosa para evitar que la herramienta se oxidara, pero todos estos fluidos no tenían la parte adecuada de lubricación. Con el paso de los años se utilizaron aceites los cuales entre sus características principales tienen buena lubricación y disminuyen el calor generado durante el contacto de la herramienta-material.

Durante la generación de calor el 80% de la temperatura es absorbida por la viruta, 10% por la pieza de trabajo y 10% la herramienta. Para evitar el incremento de la temperatura en la herramienta y en el proceso de maquinado se utilizan fluidos de corte, los fluidos de corte tienen otra característica importante ya que funcionan como lubricantes que ayudan a disminuir el coeficiente de rozamiento entre material de trabajo y herramienta, por lo cual las características que deben satisfacer los fluidos de corte son los siguientes:

- Refrigeración: su principal función es evitar temperaturas elevadas en la herramienta, por lo cual este tipo de refrigerante debe tener baja viscosidad.
- Lubricación: permite reducir el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la cara de corte, el cual debe facilitar el flujo de la viruta. Otra característica importante de la lubricación es reducir la formación del filo aportado, las fuerzas de corte, potencia y temperatura.
- Eliminación de viruta: el fluido debe retirar la viruta de la zona de maquinado para evitar un ineficiente acabado superficial.
- Protección contra la corrosión: los diferentes fluidos podrían dañar la herramienta o máquina, por lo cual se incorporan aditivos adecuados para protegerlos de la corrosión.

Si bien los fluidos de corte reducen las condiciones de temperatura y fricción durante el maquinado, los residuos de los fluidos de corte se consideran dañinos para el medio ambiente y provocan severas consecuencias en la salud humana, esto se debe a los siguientes factores:

- Son contaminantes.
- Riesgos de salud en los operarios.
- El almacenamiento propicia la degradación de los fluidos de corte.

Pasos a seguir para la elección de un fluido de corte que se empleará en el proceso de maquinado:

- Material de la herramienta: normalmente para aceros al carbono se utilizan aceites solubles; para aceros rápidos se utilizan emulsiones de aceites.

- Material de la pieza de trabajo: tanto para materiales ferrosos y no ferrosos existen diversos tipos de aceites.
- Condiciones de maquinado con alto nivel de fricción: se deben utilizar aceites puros, con el fin de evitar el desgaste de la herramienta y lograr mejor acabado superficial de la pieza de trabajo.
- Tipo de maquinado: normalmente en tornos automáticos se utilizan aceites solubles o emulsiones.

#### 1.4 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS

Durante la elección del material de la herramienta es indispensable conocer los diversos factores que influyen durante el proceso de maquinado, es decir, los requerimientos que deben cumplir los materiales para herramienta:

- Dureza a elevada temperatura: el término de dureza en materiales se emplea para que exista una deformación entre materiales, la dureza de un material debe ser mayor a otro. Cabe destacar que es importante considerar el aumento de las temperaturas que se presentan durante la deformación que ejerce la herramienta sobre la viruta, la fricción entre viruta y herramienta (cara de desprendimiento); todos estos factores aumentan la temperatura de la herramienta por lo cual se debe considerar el valor de la dureza en función del aumento de temperatura.
- Resistencia al desgaste: este parámetro es muy importante en cuanto a la duración de la herramienta, ya que, el desgaste provoca cambios en la geometría de la herramienta.
- Resiliencia: es la capacidad que presentan las herramientas para recuperarse a los esfuerzos de cierta magnitud que se presentan durante el corte de los materiales.
- Propiedades térmicas: conductividad (esta propiedad favorece que exista un equilibrio térmico entre las zonas de mayor temperatura en la herramienta), calor específico y coeficiente de dilatación.

Tipos de materiales para herramientas

- Aceros al carbono: los aceros al carbono son limitados por sus rangos de dureza en función de temperaturas (200°.....250°), el porcentaje de carbono en el material de la herramienta influye en dureza y en la resistencia al desgaste.
- Aceros especiales: se obtienen por la adición a la aleación hierro carbono de otros elementos que tienden a producir variaciones en las características del acero; principalmente en la dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Cromo (mejora la resistencia al desgaste), tungsteno, cobalto, molibdeno, manganeso (mejora la dureza en caliente), níquel y vanadio (mejoran la tenacidad) y el silicio (mejora la resistencia a la abrasión).

- Aceros rápidos (HSS): la composición de algunos tipos de aceros rápidos (carbono, tungsteno, cromo, vanadio, molibdeno, cobalto). Las características de los aceros rápidos es mantener su dureza (a temperatura ambiente se encuentra en rangos 63 y 68 HRC), además a elevadas temperaturas (500°.....550° presentan una dureza de 55...59HRC).
- Aleaciones duras no ferrosas: se obtienen por la fusión de cobalto, cromo y tungsteno; este tipo de aleaciones mantienen una dureza considerable a temperaturas aproximadas de 850 [°C], cuando se trabajan a temperaturas inferiores a 500 [°C] estos materiales son más frágiles y están propensos a la fractura. Las estelitas permiten maquinar a velocidades muy altas, su dureza se encuentra en rangos aproximados de 60 y 65 HRC.
- Carburos metálicos: las características de este tipo de materiales son su elevada dureza que se mantiene hasta temperaturas de 900 [°C], poseen alta resistencia a la compresión, presentan buena resistencia al desgaste, a la corrosión y conductividad térmica superior a los aceros.
- Carburos metálicos especiales: Este tipo de materiales poseen una dureza menor a otros materiales y se utilizan en maquinados con menor velocidad.
- Carburos metálicos recubiertos: normalmente se utiliza un revestimiento de titanio el cual reduce el deterioro de la herramienta producido por el contacto (viruta y herramienta) y (herramienta y pieza de trabajo).
- Materiales cerámicos:
  - Cermets: materiales sinterizados, constituidos por un componente no metálico (óxidos, silicatos, carburo de silicio, carburo de boro) y por componentes metálicos de alto punto de fusión (Mo, Cr, V).
  - Óxidos sinterizados: en este tipo de material cerámico destaca la característica de conductividad térmica (presenta un calentamiento uniforme en el filo de la herramienta y una transferencia de calor hacia la viruta).
- Nitruro de boro cúbico: la dureza de este material es menor al del diamante; por lo que es frágil, tiene elevada estabilidad térmica por lo que permite trabajar durante largos períodos a temperaturas de 1000....1100 [°C].
- Diamantes naturales: una de las ventajas de este tipo de materiales es que se pueden utilizar velocidades de corte de 2.5 a 3.5 veces con respecto a materiales duros.

Hoy en día para mejorar las propiedades de las herramientas, estas son sometidas a un determinado recubrimiento, con este tipo de recubrimientos se pretenden mejorar las propiedades de la herramienta, a continuación se enlistan las principales propiedades con recubrimientos (fig. 1.13):

- Aumento de la dureza superficial de la herramienta
- Menor desgaste del filo
- Aumentar la resistencia a la abrasión

- Aislamiento térmicos, permite trabajar a temperaturas mayores
- Reducir el área de contacto



Fig. 1.13. Ejemplificación de recubrimientos en herramienta de corte (insertos).

El comportamiento que presentan los materiales para herramientas se ejemplifican en la figura 1.14, la variación de la dureza con respecto al cambio de temperatura de cada material; los materiales a una temperatura crítica tienden a disminuir su dureza estos son: acero al carbono, aceros rápidos, estelitas, carburos metálicos.

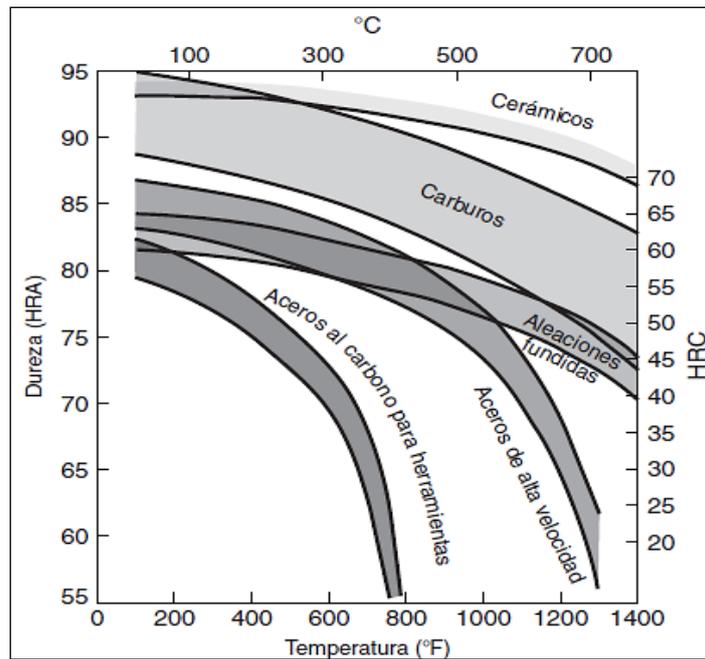


Fig. 1.14. Comportamiento de la dureza de los materiales para herramientas de corte en función de la temperatura (Kalpakjian, Schmid, 2008).

### 1.5 DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

Las herramientas durante el proceso de maquinado están sujetas a acciones mecánicas, térmicas y químicas, las cuales ejercen un desgaste progresivo en la herramienta de corte, es decir, una pérdida de material por el contacto virtual-herramienta y herramienta-material de trabajo.

El desgaste es un proceso gradual y depende de los materiales de la herramienta, geometría, pieza de trabajo, fluido de corte y los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad).

La vida útil de la herramienta está ligada al desgaste que sufre durante el proceso de maquinado, por lo cual es necesario definir las características de las superficies desgastadas en la herramienta (fig. 1.15): labio o ancho de la franja de desgaste en la cara de incidencia y el cráter en la cara de desprendimiento.

El desgaste en la cara de incidencia se manifiesta por el desgaste del “labio” determinado por VB y por la cota  $VB_{max}$ , el desgaste frontal se determina por la profundidad del cráter KT y cotas KB, KL, KM, son las que determinan la posición respecto al filo de corte. El desgaste del labio dorsal (cara de incidencia), la progresiva pérdida de material en esta zona determina el labio de desgaste dorsal (VB) que crece linealmente después del contacto herramienta-pieza de trabajo, lo cual puede provocar fractura o rotura del filo de corte (velocidad de desgaste elevada).

- VB: labio de desgaste
- KM, KL: posición del cráter
- $KS_\gamma, KS_\alpha$ : retroceso del filo debido al desgaste
- KT: profundidad del cráter
- KB: ancho del cráter

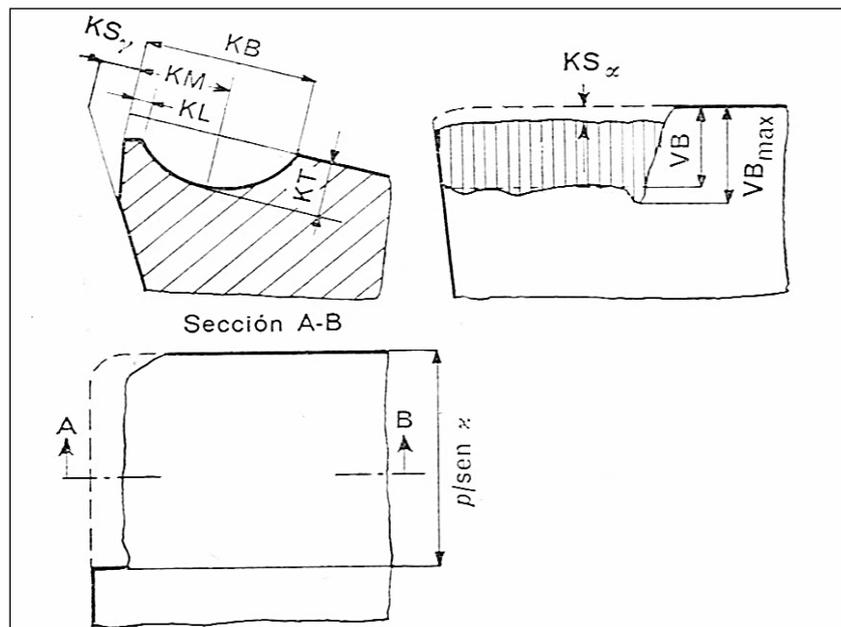


Fig. 1.15. Desgaste de la herramienta y datos indicativos.

En la figura 1.16 se ejemplifica la gráfica del desgaste dorsal VB en función del tiempo T de maquinado, se observan las tres zonas características de desgaste: zona de rotura del filo de corte, zona de desgaste lineal no sensible a la temperatura, zona sensible a la temperatura, entre los puntos X1 y X2; zona sensible a la temperatura [Trigger y Chao], más allá del punto crítico x2 [Takeyama, Mural, Usui].

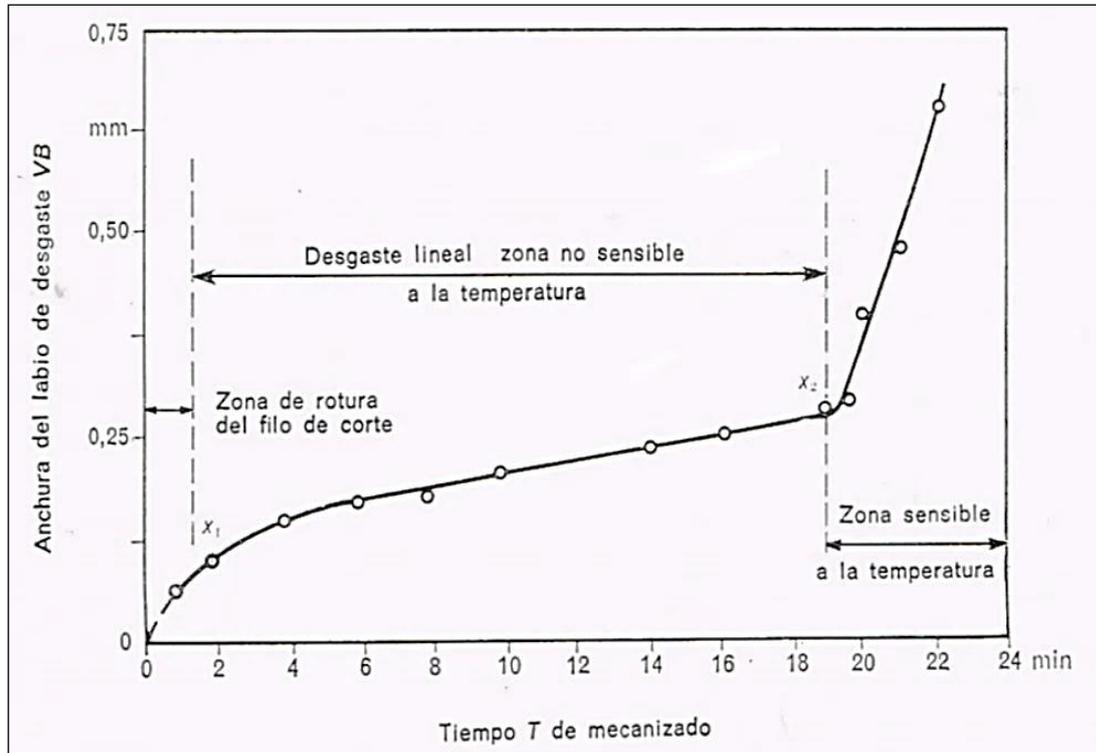


Fig. 1.16. Relación desgaste del labio o franja de desgaste y el tiempo de maquinado.

La variación del desgaste en la cara de incidencia es representada por las siguientes ecuaciones (Colding, Shaw y Dirke):

$$L = k VB$$

Y también por

$$L = kVB^2$$

Dónde:

L: longitud recorrida por la herramienta.

k: constante dependiente del material, de las condiciones de corte y de la geometría de la herramienta.

VB: desgaste del labio.

De la figura 1.16 en el punto crítico  $x_2$  desgaste lineal a la temperatura y desgaste acelerado más allá de dicho punto puede emplearse la siguiente expresión:

$$L = k'VB^2$$

$k'$  = función (n, c, K,  $\sigma_y$ , k,  $F_{\gamma n}$ )

Desgaste frontal en la cara de desprendimiento: es producido por la acción que ejerce la viruta sobre la herramienta y normalmente ocurre en materiales duros en el proceso de maquinado, por lo cual, para la medida del cráter es necesario conocer tres dimensiones (longitud, posición de la profundidad máxima y profundidad).

Para medir el desgaste de una herramienta es necesario medir tres parámetros (Opitz):

- La franja VB de desgaste en la cara de incidencia
- Profundidad del cráter
- La distancia KM entre el punto de mayor profundidad del cráter y filo de corte

Para carburos es válida la siguiente relación del desgaste del cráter:

$$KT = 0.10 + 0.3a$$

$$a = \text{avance mm/rev}$$

El desgaste gradual de la herramienta ocurre en dos lugares principales de la herramienta de corte (parte superior de la superficie de ataque y el flanco o superficie de incidencia). A partir de lo anterior se tiene que existen dos tipos principales de desgaste de la herramienta (cráter y flanco) como se muestra en la figura 1.17.

- Desgaste del cráter: se presenta en la superficie de ataque de la herramienta, se forma por el desplazamiento de la viruta sobre la superficie y la presencia de altas temperaturas y esfuerzos durante el contacto herramienta-viruta.
- Desgaste de flanco: se presenta en la superficie de incidencia de la herramienta y ocurre por el contacto de la superficie de trabajo y borde de la herramienta.

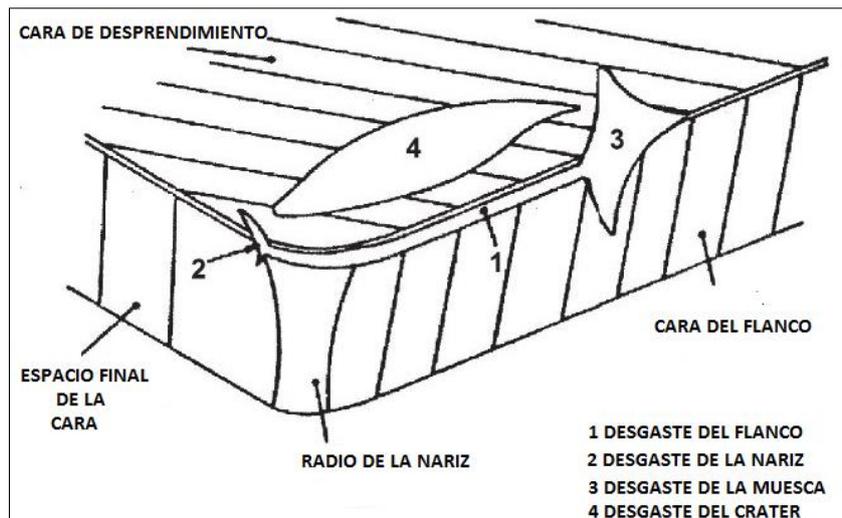


Figura 1.17. Representación de las zonas principales del desgaste en la herramienta de corte.

Existen varias causas del desgaste de las herramientas de corte y mecanismos de falla que se pueden presentar, obsérvese la (fig.1.18) y (fig.1.19), se presentan debido a la combinación de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, profundidad) y a la temperatura que se genera durante el maquinado; las causas de desgaste y falla de la herramienta en función de los parámetros de corte son los siguientes:

- **Abrasión mecánica:** Se presenta durante el contacto de dos superficies, normalmente la superficie más dura degrada a la más blanda (en teoría se sabe que la herramienta de corte es más dura que el material a maquinar). Este tipo de desgaste se presenta sobre la cara de incidencia de la herramienta, esto debido al contacto entre la pieza de trabajo y la herramienta de corte.
- **Oxidación:** Es un mecanismo de desgaste mediante procesos químicos, propiciado por las altas temperaturas y la composición química de la herramienta, material de trabajo y fluidos de corte.
- **Difusión:** Este tipo de desgaste se presenta microscópicamente y se lleva a cabo por los gradientes de temperatura y de composición entre viruta y herramienta.
- **Fatiga:** Se produce por un sistema de lubricación inadecuado, normalmente se llevan a cabo en procesos termo-mecánicos, por lo cual esta causa de desgaste hace más frágil a la herramienta.
- **Adhesión:** se presenta normalmente a altas temperaturas y presiones, lo cual genera que el material excedente se adhiera a la herramienta y produzca un cambio en la geometría de la misma.

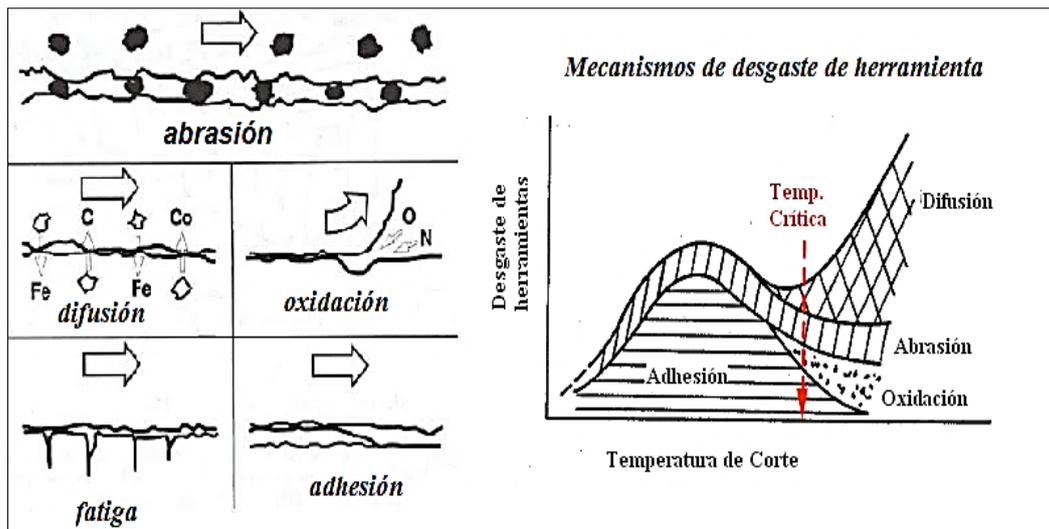


Figura. 1.18. Mecanismos de desgaste (Sandvik).

### MECANISMOS DE FALLA

- 1. Flanco: Este tipo de desgaste afecta el acabado superficial del material, normalmente se produce por mecanismos abrasivos, por el contacto de la herramienta con el material a maquinar.
- 2. Cráter: se produce por los mecanismos de abrasión y adhesión, en otras palabras se debe al contacto de la viruta-herramienta.
- 3. Deformación plástica: Se produce por altas temperaturas y presiones, lo cual genera que la herramienta se deforme plásticamente. Por otra parte las herramientas se deben de fabricar de materiales que trabajen a altas temperaturas para evitar que se produzca este tipo de desgaste.
- 4. Desgaste de entalla en la parte posterior del filo: Se debe por el endurecimiento por deformación plástica aunado a las altas temperaturas en la herramienta, así como a la profundidad de corte.
- 5. Fisuras térmicas: Debido a las variaciones térmicas durante el proceso de maquinado se generan este tipo de desgaste. Este tipo de fisuras se presentan perpendicularmente a la arista de corte.
- 6. Fisuras por fatiga mecánica: Se forman paralelas al filo de corte y se producen como consecuencia de las variaciones de las tensiones residuales durante el maquinado.
- 7. Astillamiento del filo: se producen fisuras en el filo.

- **8. Fractura:** se genera por la mala elección de los parámetros de corte y la selección inadecuada de la herramienta, se caracteriza por que se desprende parte del filo de la herramienta.
- **9. Formación del filo de aportación y formación de la capa:** normalmente se produce por altas temperaturas y velocidades de corte, esto da como resultado que el material de trabajo se adhiera a la herramienta.

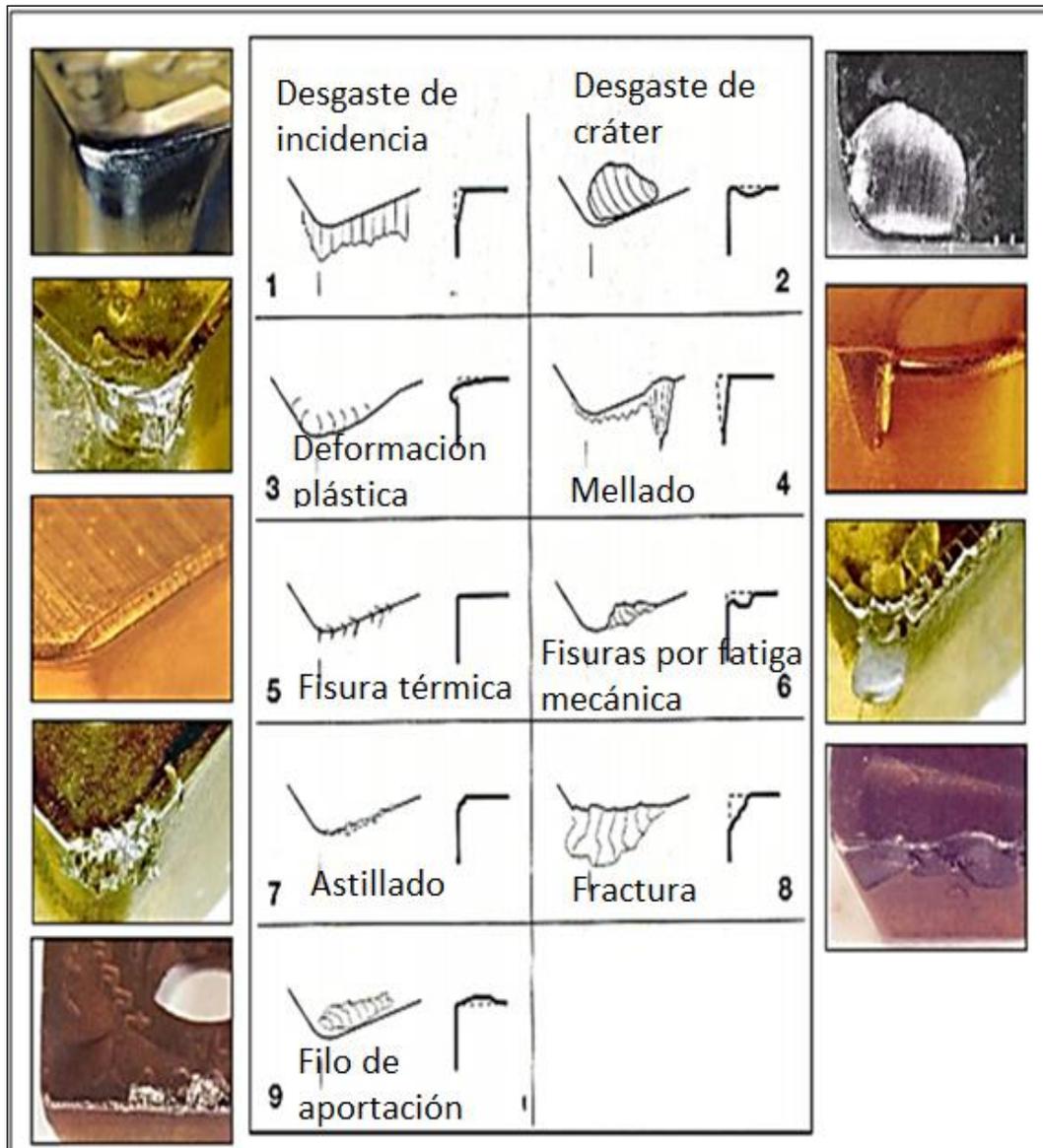


Figura 1.19. Criterios de falla en herramientas de maquinado (Sandvik Coromant).

El Efecto del desgaste de la herramienta de maquinado sobre el sistema de fuerzas, en la (fig. 1.20) se ejemplifican las fuerzas resultantes  $F_1$  y  $F_2$  que se presentan durante el contacto de la herramienta hacia la pieza de trabajo; Donde la fuerza  $F_1$  proyecta sus componentes  $F_\gamma$  y  $F_{\gamma n}$  que corresponden a la acción del proceso de maquinado durante el contacto viruta y herramienta. La fuerza  $F_2$  se presenta en el rozamiento dorsal entre herramienta y pieza de trabajo, debido a la franja de desgaste VB.

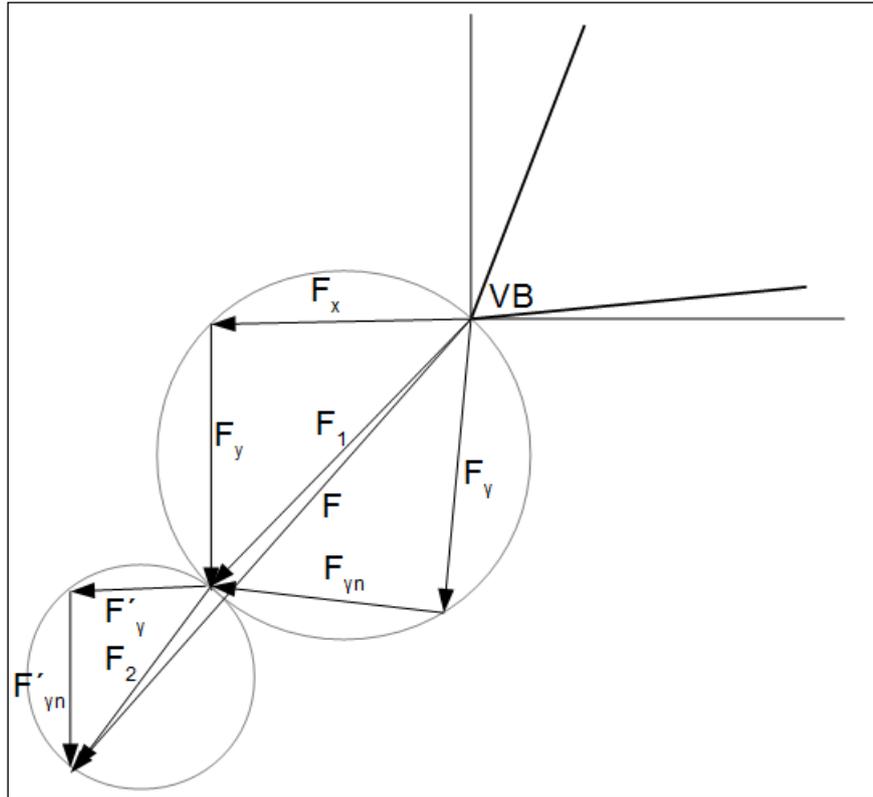


Figura 1.20. Efecto de desgaste en la cara de incidencia VB sobre las fuerzas de corte.

Sistema de fuerzas (Zorev):

$$F_\infty = F_{\gamma n} \cos \gamma + F_\gamma \operatorname{sen} \gamma + f'_\gamma$$

$$F_y = F_\gamma \cos \gamma - F_{\gamma n} \operatorname{sen} \gamma + F'_{\gamma n}$$

La resultante total  $F$  se presenta debido a las fuerzas  $F_1$  y  $F_2$ . Por lo tanto la fuerza  $F_2$  aumenta con el desgaste del flanco de la herramienta y la fuerza  $F_1$  disminuye con el incremento de la profundidad de cráter (KT)

## 1.6 ECUACIÓN DE TAYLOR

FREDERICK WINSLOW TAYLOR  
(Germantown, Pennsylvania, 1856 - Filadelfia, 1915)



Ingeniero norteamericano que ideó la organización científica del trabajo. Procedente de una familia acomodada, Frederick Taylor abandonó sus estudios universitarios de derecho por un problema en la vista y a partir de 1875 se dedicó a trabajar como obrero en una de las empresas industriales siderúrgicas de Filadelfia, Taylor organizó los métodos científicos y creó la Organización Racional del trabajo.

Administración científica es el nombre que recibió debido al intento de aplicar los métodos de la ciencia a los problemas de la administración para lograr una gran eficiencia industrial. Los principales métodos científicos aplicables a los problemas de la administración son la observación y la medición. La teoría de la administración científica surgió en parte por la necesidad de elevar la productividad. A mediados del siglo XX, en Estados Unidos en especial, había poca oferta de mano de obra. La única manera de elevar la productividad era elevando la eficiencia de los trabajadores. Así fue como Frederick W. Taylor, Henry L. Gantt y Frank y William Gilbreth inventaron el conjunto de principios que se conocen como la teoría de la administración científica.

- Principio de planeación: sustituir el criterio individual de obrero, la improvisación y la actuación empírica en el trabajo por métodos basados en procedimientos científicos. Cambiar la improvisación por la ciencia mediante la planeación del método.
- Principio de preparación: seleccionar científicamente los trabajadores de acuerdo con sus aptitudes; prepararlos y entrenarlos para que produzcan más y mejor, de acuerdo con el método planeado. Además de la preparación de la fuerza laboral. Se debe preparar también las máquinas y los equipos de producción, así como la distribución física y la disposición racional de las herramientas y los materiales.

- Principio de control: controlar el trabajo para certificar que se ejecute de acuerdo con las normas establecidas y según el plan previsto. La gerencia tiene que cooperar con los trabajadores para que la ejecución sea la mejor posible.
- Principio de ejecución: distribuir de manera distinta las funciones y las responsabilidades para que la ejecución del trabajo sea más disciplinada.

F.W Taylor realizó un estudio en el año de 1907 en el maquinado de aceros y estableció la siguiente ecuación de vida de la herramienta de maquinado:

$$VT^n = C$$

Dónde:

V= velocidad de corte

T= tiempo de vida de la herramienta (minutos)

n= exponente que depende del material de la herramienta, pieza de trabajo y parámetros de corte

C= constante

Así mismo los valores de "C" y de "n" se pueden obtener a partir de las siguientes ecuaciones y los despejes correspondientes.

$$v_1 T_1^n = C = v_2 T_2^n$$

$$v_1 T_1^n = v_2 T_2^n$$

$$\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right) = n \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

De igual forma, es pertinente destacar que los valores de n y C se obtienen de manera experimental durante el proceso de maquinado, como la tabla 1 ejemplos de valores para materiales para herramientas.

Material de herramienta	n	C	
		Corte de metal no ferroso (m/min)	Corte de metal ferroso (m/min)
Aceros para herramienta al carbono.	0.1	70	20
Aceros de alta velocidad.	0.125	120	70
Cermet.	0.25		600
Carburos cementados.	0.25	900	500
Carburos recubiertos.	0.25		700
Cerámicos.	0.6		3000

Tabla 2. Intervalo de valores de n y c para la ecuación de Taylor, materiales para herramienta (Groover, 2007).

La relación de vida de la herramienta está en función del valor de n, cuanto menor es el valor n menor será la vida útil de la herramienta; la ecuación de Taylor se puede reescribir como:

$$T = \left[ \frac{C}{V} \right]^{\frac{1}{n}}$$

La vida útil de la herramienta se representa por medio de gráficos cuyos datos se obtienen de manera experimental, en los cuales se establecen los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de corte), material de corte, herramienta y fluido de corte. Obsérvese la figura 1.21 la vida útil de la herramienta disminuye con el aumento de la velocidad de corte; el material de trabajo influye en la vida útil de la herramienta porque existe una notable diferencia entre la microestructura que presentan los diferentes materiales de trabajo.

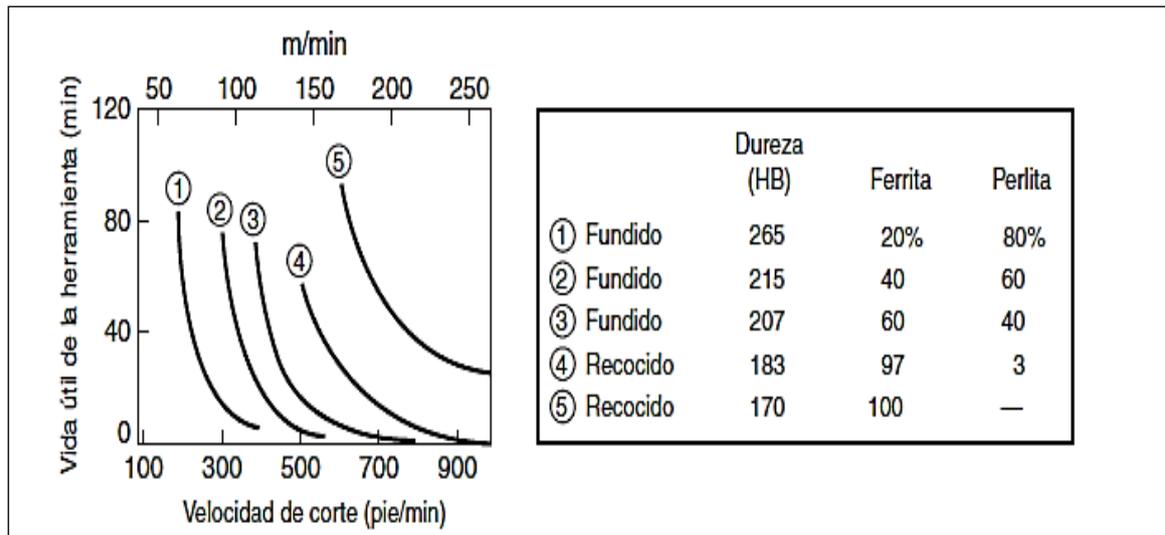


Figura 1.21. Comportamiento de la vida útil de la herramienta (Kalpakjian, Schmid, 2008).

Generalmente las curvas de la vida útil de la herramienta se trazan en la escala logarítmica decimal-logarítmica decimal. Obsérvese la figura 1.22 cuanto menor es el valor de  $n$  más aguda es la curva, por lo que la vida útil de la herramienta disminuye al aumentar la velocidad de corte. A bajas velocidades de corte el valor de  $n$  puede volverse negativo, esto es porque la vida útil de la herramienta tiende a un valor máximo y después la curva tiende drásticamente a disminuir.

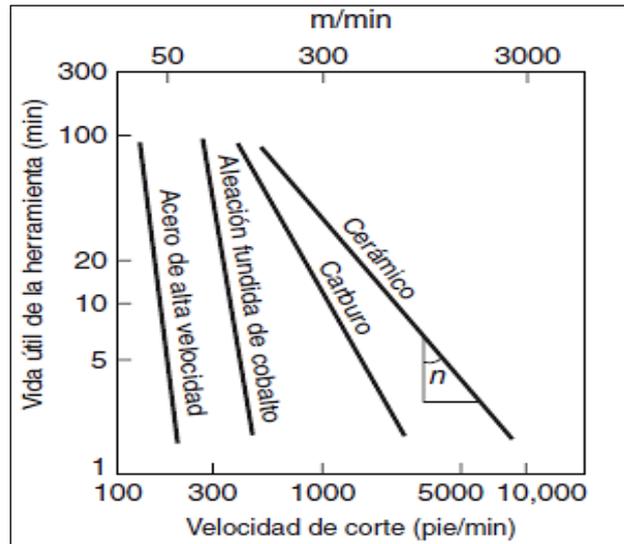


Figura 1.22. Curvas de vida útil de herramientas para diversos materiales (Kalpakjian, Schmid, 2008).

### 1.7 CARACTERISTICAS DEL ACERO 8620 Y RECUBRIMIENTO PVD EN EL INSERTO DE CORTE

El acero es una aleación de hierro y carbono (máximo 2.11% de carbono), al cual se le adicionan variados elementos de aleación, los cuales le confieren propiedades mecánicas específicas para sus diferentes aplicaciones en la industria. Las propiedades mecánicas de los aceros están ligadas a los diferentes procesos como son: laminación, tratamiento térmico, deformación, etc. A partir de estos procesos se deben considerar los criterios de selección de calidad y el tipo de material para una aplicación específica. El acero 8620 en estado cementado y templado ofrece muy buena dureza superficial y gran tenacidad en el núcleo. Además tiene aceptable profundidad de temple; Ausencias de zonas blandas en la parte cementada y baja distorsión.

El temple superficial se realiza calentando la capa superficial del acero hasta una temperatura superior al punto crítico (austenítico) y con el enfriamiento posterior a una velocidad superior a la crítica para la obtención de la martensita, Se entiende por templabilidad la capacidad del material de ser templado.

Los factores que intervienen en el temple del acero, pueden clasificarse en dos grupos:

- Por su composición y tamaño de grano; estas características influyen en la calidad del material.
- La forma y dimensiones de la pieza, estado superficial, conductividad térmica del acero y el medio de enfriamiento; influyen en la velocidad crítica de enfriamiento.



Figura 1.23. Acero 8620.

Acero SAE 8620 (figura 1.23) es un acero aleado al cromo-níquel-molibdeno, ofrece buena dureza superficial y elevada tenacidad. La presencia de níquel y molibdeno en el acero SAE 8620 juega un papel importante en sus propiedades.

*Composición química del acero 8620*

Composición química	C %	Mn %	P máx.	S máx.	Si %	Cr %	Ni %	Mo %
Análisis en %	0.16 0.23	0.70 0.90	0.035	0.040	0.15 0.35	0.40 0.60	0.40 0.70	0.15 0.25

*Propiedades mecánicas acero 8620:*

Estado	Resistencia a la tracción [Kg/mm <sup>2</sup> ]	Limite elástico [Kg/mm <sup>2</sup> ]	Alargamiento %	Reducción de área	Dureza Brinell aproximada
Laminado en caliente	65	35	20	40	200/220
calibrado	55	30	28	50	160/180

*Tratamientos térmicos*

Tratamiento	Temperatura [°C]	Enfriamiento
Normalizado	870-930	Aire
Recocido subcrítico	860-890	Horno/Aire
Cementación	900-920	Horno/Aceite
Temple capa cementada	840-870	Aceite
Revenido capa cementada	150-200	Aire

Aplicaciones

Se utiliza en la fabricación de engranes, piñones, árboles de levas, moldes para la industria del plástico, mordazas, coronas, entre otros.

**CARACTERISTICAS DEL INSERTO DE CORTE Y RECUBRIMIENTO PVD**

La herramienta de carburo de tungsteno con recubrimiento supone actualmente el 80-90% de todas las plaquitas para herramientas de corte. El éxito como material de herramienta se debe a su especial combinación de resistencia al desgaste y tenacidad, y a su capacidad para adoptar formas complejas (Sandvik Coromant).

La de tungsteno 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 maquinado contienen más del 80% de fase WC dura. El carbonitruro cúbico es otro componente importante, especialmente en calidades de gradiente sinterizado. El cuerpo de la herramienta se forma, bien mediante prensado del polvo o bien mediante técnicas de moldeo por inyección, para luego sinterizarlo hasta la densidad completa.

**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, por ejemplo, nitrógeno para formar un recubrimiento duro de nitruro en la superficie de la herramienta.

Los recubrimientos PVD (figura 1.23) aportan resistencia al desgaste ya que poseen buena dureza, su buena resistencia a la compresión añade tenacidad al filo y resistencia a la rotura.

Principales componentes PVD:

PVD-TiN: el nitruro de titanio fue el primer recubrimiento PVD. Tiene propiedades de aplicación general y color dorado.

PVD-Ti(C, N): el carbonitruro de titanio es más duro que el TiN y aporta resistencia al desgaste en incidencia.

PVD-(Ti, Al) N: el nitruro de titanio aluminio tiene elevada dureza y resistencia a la oxidación, por ello mejora la resistencia al desgaste global.

Óxido PVD: se utiliza por su estabilidad química y porque mejora la resistencia a formación de cráteres de desgaste.

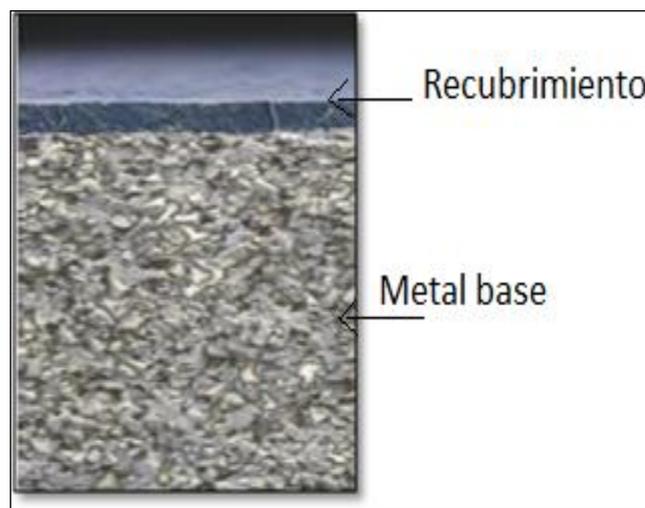


Figura 1.24. Ejemplificación por deposición física en fase de vapor PVD (Sandvik Coromant).

## 1.8 ESTADO DEL ARTE

Durante el proceso de maquinado se ha estudiado de forma teórica y experimental el desgaste de la herramienta de corte, sin embargo, los análisis experimentales y teóricos tienden a ciertas discrepancias con relación a las leyes de contacto y fricción durante el proceso.

Trigger y Chao calcularon el efecto del incremento del desgaste a través de la temperatura que se presenta en la superficie de contacto herramienta-pieza.

Por su parte Albrecht analizó los factores que influyen en el rayado, indicando las causas que provocan el flujo del filo desde una zona de alta presión en la punta de la herramienta.

F. Salvatorea, S. Saad, H. Hamdi realizaron pruebas de maquinado con una herramienta de carburo de tungsteno y lo validaron con un modelo numérico; en la prueba experimental para medir el desgaste de la herramienta, emplearon un microscopio para medir el desgaste en las caras de la herramienta (en función de  $V_c$ , profundidad, tiempo).

Remadna y Rigal realizaron estudios de la evolución de desgaste de la herramienta de corte y las fuerzas durante un tiempo determinado, durante el proceso de torneado duro con insertos de nitruro de boro cúbico (CBN). Encontraron que las fuerzas de corte aumentan gradualmente con el aumento de la distancia de corte y el desgaste de la herramienta (flanco).

La velocidad de desgaste es constante con respecto al tiempo y proporcional a la carga aplicada, siempre y cuando las condiciones químicas y metalúrgicas de la superficie no sean afectadas (Taylor, 1962). Aplicando el modelo de Takeyama y Murata para la determinación del desgaste de flanco indican que el desgaste inicial de flanco presenta un valor promedio de unos 0,05 mm.

D. Umbrelloa, R. M'Saoubib, J.C. Outeiroc presentaron un estudio de sensibilidad sobre la influencia de las constantes utilizadas en (J -C) ecuación constitutiva del material de Johnson- Cook; fuerzas, temperaturas, morfología de la viruta y tensiones residuales en los componentes maquinados de acero AISI 316L.

Existen varios modelos para verificar la transferencia de calor durante el proceso de torneado; [Stephenson et al] desarrolló un modelo analítico para predecir la temperatura de la herramienta de corte en condiciones transitorias, se basó en la solución analítica para la temperatura en un inserto rectangular sometido a un flujo de calor constante.

Por su parte Tamayo, Rodríguez, Robledo y otros realizaron pruebas experimentales en acero AISI 316L con insertos recubiertos, con velocidad de corte elevadas, realizaron el maquinado sin fluido de corte; los resultados para el inserto de tres capas no sobrepasó el criterio de vida útil de la herramienta, pero para el inserto de una capa sobrepasó el criterio de vida para una velocidad de corte mayor.

Manzini, Blanco, Iurman, Ziegler realizaron pruebas experimentales en acero 4140 templado y revenido para una dureza de 20-50 Rc, se utilizaron insertos recubiertos y realizaron el maquinado sin fluido de corte.

Los extractos de los estudios citados en líneas anteriores, demuestran que la vida útil de la herramienta de corte es de importancia para determinar los mecanismos de desgaste y falla, así como las formas de prevenir la reducción de la vida de la herramienta.

## CAPÍTULO II. DESARROLLO EXPERIMENTAL “VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE CORTE”

Material:

- Acero templado 8620
- Herramienta de corte “Inserto con recubrimiento DNMG 15 06 08-MF 1125”
- Lubricante “MOBILMET 426 NON-ACTIVE CUTTING OIL”

Equipo utilizado:

- Horno industrial Kintel AX-2
- Durómetro Rockwell
- Máquina de ensayos Jominy
- Photomakroskop
- Microscopio electrónico de barrido
- Torno de control numérico (EMCOTURN 242)

Para realizar los ensayos de maquinado se ha utilizado ACERO 8620 y se han establecido las dimensiones de las probetas a emplear en el proceso (figura 2.1):

Dimensión de las probetas:

- Longitud= 120 mm
- Diámetro= 25.4 mm



Figura 2.1. Probetas de Acero 8620.

## 2.1. ENSAYO DE JOMINY

Una vez establecidas las dimensiones de las probetas, se procedió a la realización del ensayo de Jominy con el fin de verificar la capacidad de endurecimiento de esta aleación.

Como se sabe el ensayo de Jominy es un procedimiento utilizado para medir la templabilidad de alguna aleación; el procedimiento y las dimensiones para llevar a cabo el ensayo son los siguientes:

- Dimensiones de la probeta para la realización del ensayo de Jominy.

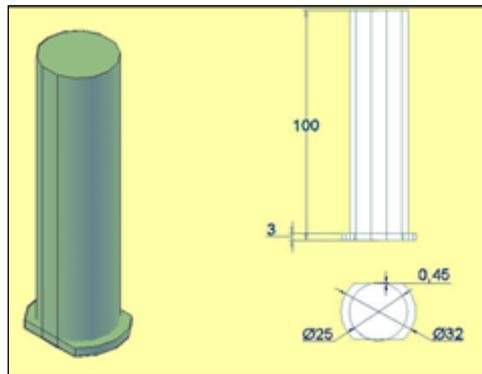


Figura 2.2. Dimensiones de las probetas de acero 8620 para el ensayo de Jominy.

- Colocar la probeta de acero 8620 dentro del horno KINTEL AX-2 a una temperatura de austenización y durante un tiempo determinado.
- Posteriormente sacar la probeta del horno industrial y colocarla en la máquina de ensayos de Jominy (figura 2.3); se observará que el extremo de la probeta se temple con un chorro de agua de caudal y a temperatura constante, de esta forma la velocidad de enfriamiento es máxima en el extremo templado y disminuye a lo largo de la probeta.



Figura 2.3. Ensayo de Jominy para determinar el grado de templabilidad del material.

- Una vez enfriada la probeta hasta la temperatura ambiente se procede a desbastar una tira de 0,4 mm y se determina la dureza en los primeros 50 mm (a una distancia de 1.6 mm entre cada lectura).
- Al trazar una curva de templabilidad (se representan las mediciones de la dureza en función de la distancia al extremo templado).

## 2.2. TEMPLE

El temple es un tratamiento térmico, el cual consiste en calentar el acero a una temperatura crítica (austenización) y posteriormente enfriar para disminuir su temperatura drásticamente; esto es para obtener una estructura martensítica que proporciona propiedades de dureza y resistencia (figura 2.4). En general el temple proporciona una superficie dura y un núcleo con buena tenacidad.

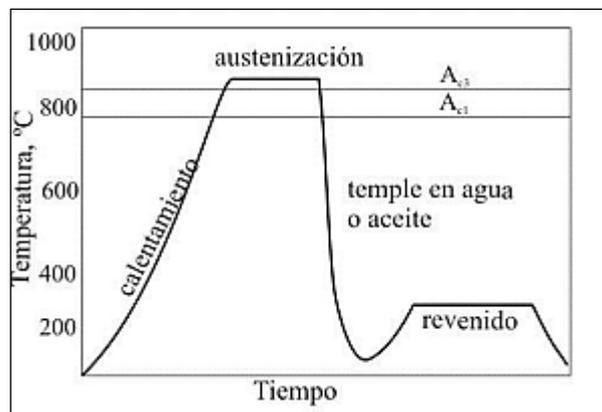


Figura 2.4. Gráfico del temple ordinario.

Una vez realizado el ensayo de Jominy para conocer el comportamiento del material (acero 8620) y el perfil de dureza que presenta, se procedió a realizar el tratamiento térmico en las probetas que serán maquinadas de acuerdo a lo siguiente:

- Su utilizaran probetas con las dimensiones especificadas anteriormente.
- Se realiza un calentamiento a la temperatura de austenización que para este material es de 910 °C o temperatura crítica del material.
- Introducir las probetas y mantenerlas durante un tiempo determinado [1 hr/pulg], a la temperatura de austenización del material.
- Una vez que el material ha alcanzado el tiempo de 1 hr dentro del horno industrial (figura 2.5), se procede a enfriar el material para realizar el tratamiento térmico, para este caso se ha utilizado agua como medio de enfriamiento, donde las probetas deben ser agitadas para prevenir que el vapor impida el enfriamiento en la probeta.



Figura 2.5. Horno industrial para tratamientos térmicos KINTEL AX-2.

- Realizado el tratamiento térmico (temple) en el material, se procede a medir la dureza superficial; para eso se utilizó un durómetro MITUTOYO ROCKWELL (figura 2.6) con las siguientes características:

Datos del durómetro MITUTOYO

Datos empleados en la medición de la dureza en el material:

- Medición de Dureza (HRC)
- Carga 150 Kg
- Penetrador cono de diamante



Figura 2.6. Durómetro MITUTOYO ROCKWELL.

## 2.3 INSERTO DE CORTE DNMG 15 06 08-MF 1125

El inserto de corte (figura 2.7) que fue empleado para realizar los ensayos tiene las siguientes especificaciones:

<b>INSERTO DNMG 15 06 08-MF 1125</b> <b>Código de pedido</b> <b>ISO: DNMG 15 06 08-MF 1125</b> <b>ANSI: DNMG 442-MF 1125</b> <b>Descripción del producto</b> <b>T-Max® P, plaquita para torneado</b>	
Longitud del filo	15.5038 mm
Grosor de plaquita (S)	6.35 mm
Diámetro de círculo inscrito (IC)	12.7 mm
Longitud efectiva del filo (LE)	14.7038 mm
Radio de punta (RE)	0.8 mm
Fijación del diámetro del agujero	5.156 mm
Mano	N
Código de modelo de herramienta	DNMG-MF
Calidad	1125
Código de forma de plaquita	D
Peso del elemento	0.016 kg
Clase de tolerancia de plaquita	M
Acoplamiento de sujeción de plaquita	INSCLPINT_2B
Tamaño y forma de plaquita	MISO_DN1506_1
Recubrimiento	PVD
Ángulo de incidencia principal	0 deg
Designación del fabricante del rompevirutas	MF
Código de estado del filo	E
número de filos	4
Ángulo incluido en plaquita	55 deg
Código de modelo de montaje de plaquita	2
Tipo de elemento	Inserto
Número de caras de un elemento de herramienta o elemento de corte	2
ID de paquete de emisión	08.2
Código de filo con punta	S
Propiedad filo Wiper	FALSE

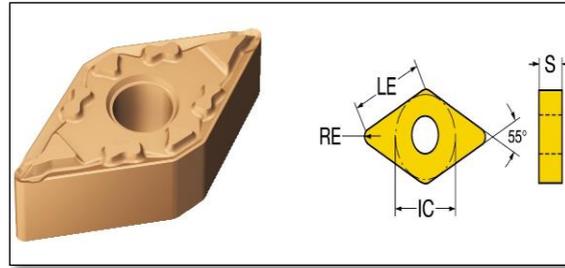


Figura 2.7. Inserto de corte DNMG 15 06 08-MF 1125 y relación de medidas.

El material empleado en la herramienta es el siguiente: la calidad del recubrimiento PVD (deposición física en fase de vapor) en el inserto de corte es de  $1-2\mu\text{m}$  TiN sobre un sustrato de grano fino (figura 2.8), además posee un buen rendimiento en los materiales P (acero), M (acero inoxidable), K (fundición).

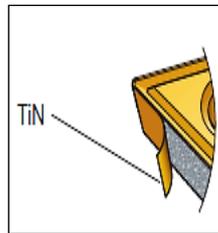


Figura 2.8. Calidad de recubrimiento PVD con un recubrimiento de  $1-2\mu\text{m}$  de TiN (Sandvik).

## 2.4 PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS

Para realizar los ensayos de corte se utilizó un centro de maquinado CNC EMCOTURN 242 (figura 2.9) y como sistema de lubricación se utilizó MOBILMET 426 NON-ACTIVE CUTTING OIL cuyas principales características son las siguientes:

- Los aceites Mobilmet 426 y Mobilmet 427 son recomendados para el maquinado crítico de metales y para operaciones automáticas en materiales con una dureza Brinell de hasta 300.
- Los fluidos de la serie Mobilmet controlan el borde acumulado y protegen las puntas de las herramientas contra el desgaste.



Figura 2.9. Centro de maquinado EMCOTURN 242.

Parámetros y fórmulas para plantear los parámetros de corte:

- ❖ N= velocidad del giro de la pieza de trabajo (rpm)
- ❖ f= avance (mm/rev-pulgadas/rev)
- ❖ l= longitud de corte (mm-pulgadas)
- ❖ d= profundidad de corte (mm-pulgadas)
- ❖ D<sub>o</sub>= diámetro inicial de la pieza de trabajo (mm-pulgadas)
- ❖ D<sub>f</sub>= diámetro final de la pieza de trabajo (mm-pulgadas)
- ❖ D<sub>prom</sub>= diámetro promedio de la pieza de trabajo (mm-pulgadas)=  

$$\left[ \frac{D_o + D_f}{2} \right]$$
- ❖ t= tiempo de corte (segundos-minutos)=  $\left[ \frac{l}{fN} \right]$
- ❖ Velocidad de rotación (N) =  $\frac{V_c}{\pi D}$
- ❖ Diámetro del material a maquinar (D)= 25.4mm
- ❖ Promedio del diámetro=  $\frac{25.4+13.4}{2} = 19.4 \text{ mm}$

Los parámetros de corte y el número de ensayos a realizar se especifican a continuación:

- Durante las pruebas de corte se realizan cinco ciclos en cada probeta de acero templado 8620, con una profundidad de corte de 1.2 mm en cada ciclo y una longitud de corte de 100 mm (figura 2.10).

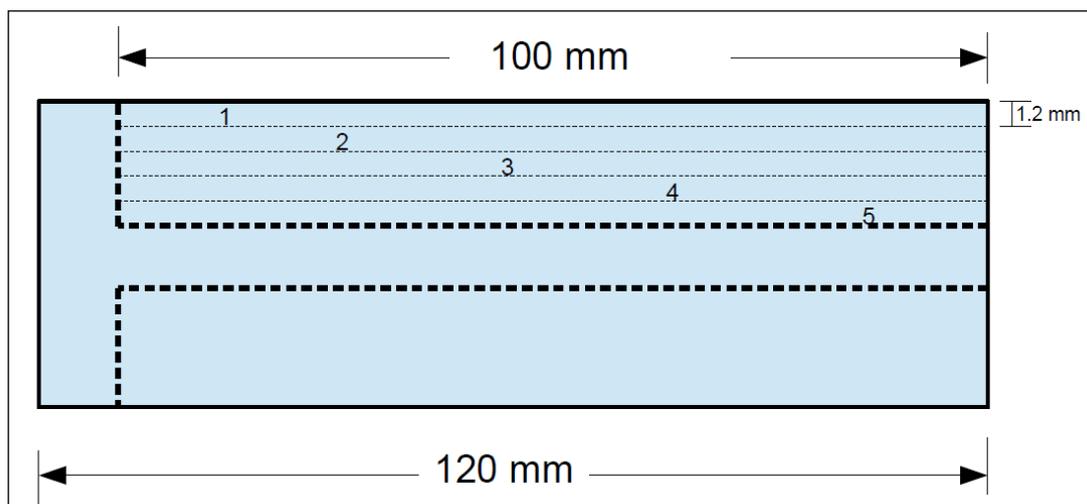


Figura 2.10. Número de ciclos durante los ensayos del proceso de maquinado.

- El número de pruebas y parámetros de corte que se utilizaran en los ensayos son los siguientes:

### Prueba # 1

#### Filo 1

"Inserto con recubrimiento DNMG 15 06 08-MF 1125"

Velocidad de corte  $V_c1 = 40 \text{ m/min}$

Profundidad de corte = 1.2 mm

Avance = 0.2 mm/rev

$$\text{Velocidad de giro} = S = N = \left[ \frac{(40 \frac{\text{m}}{\text{min}})(1000)}{\pi(19.4)} \right] = 670 \text{ r/min}$$

$$\text{Avance} = F = f = \left[ (0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}})(670 \frac{\text{rev}}{\text{min}}) \right] = 134 \text{ mm/min}$$

### Prueba # 2

#### Filo 2

"Inserto con recubrimiento DNMG 15 06 08-MF 1125"

Velocidad de corte  $V_c2 = 80 \text{ m/min}$

Profundidad de corte = 1.2 mm

Avance = 0.2 mm/rev

$$\text{Velocidad de giro} = S = N = \left[ \frac{(80 \frac{\text{m}}{\text{min}})(1000)}{\pi(19.4)} \right] = 1340 \text{ r/min}$$

$$\text{Avance} = F = f = \left[ (0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}})(1340 \frac{\text{rev}}{\text{min}}) \right] = 268 \text{ mm/min}$$

**Prueba # 3****Filo 3****"Inserto con recubrimiento DNMG 15 06 08-MF 1125"**Velocidad de corte  $V_{c3} = 120$  m/min

Profundidad de corte = 1.2 mm

Avance = 0.2 mm/rev

$$\text{Velocidad de giro} = S = N = \left[ \frac{(120 \frac{m}{min})(1000)}{\pi(19.4)} \right] = 2010 \text{ r/min}$$

$$\text{Avance} = F = f = \left[ (0.2 \frac{mm}{rev})(2010 \frac{rev}{min}) \right] = 402 \text{ mm/min}$$

- Seleccionado los parámetro de corte en cada prueba, se procede a realizar el programa de control numérico para cada ciclo; realizando un cilindrado como operación de maquinado.

❖ **Ciclo 1**

N00 G54(Desplazamiento) G71 (programación en mm) G94(avance x vuelta) G97 (rev/min) S # valor de giro de la pieza (rev/min)  
 N10 M04 (sentido de giro antihorario de la pieza) M08 (sistema de lubricación)  
 N20 T0101 (cortador izquierdo)  
 N30 G00 X25.4 Z5.0  
 N40 G84 X23.0 Z-100.0 D3=400 F # valor del avance en unidades (mm/min)  
 N50 G00 X50.0 Z50.0  
 N60 M30

❖ **Ciclo 2**

N00 G54(Desplazamiento) G71 (programación en mm) G94(avance x vuelta) G97 (rev/min) S (valor # en unidades rev/min)  
 N10 M04 (sentido de giro antihorario de la pieza) M08 (sistema de lubricación)  
 N20 T0101 (cortador izquierdo)  
 N30 G00 X23.0 Z5.0  
 N40 G84 X20.6 Z-100.0 D3=400 F avance(mm/min)

```
N50 G00 X50.0 Z50.0
N60 M30
```

### ❖ Ciclo 3

```
N00 G54(Desplazamiento) G71 (programación en mm) G94(avance x
vuelta) G97 (rev/min) S (#rev/min)
N10 M04 (sentido de giro antihorario de la pieza) M08 (sistema de
lubricación)
N20 T0101 (cortador izquierdo)
N30 G00 X20.6 Z5.0
N40 G84 X18.2 Z-100.0 D3=400 F avance(mm/min)
N50 G00 X50.0 Z50.0
N60 M30
```

### ❖ Ciclo 4

```
N00 G54(Desplazamiento) G71 (programación en mm) G94(avance x
vuelta) G97 (rev/min) S (#rev/min)
N10 M04 (sentido de giro antihorario de la pieza) M08 (sistema de
lubricación)
N20 T0101 (cortador izquierdo)
N30 G00 X18.2 Z5.0
N40 G84 X15.8 Z-100.0 D3=400 F avance(mm/min)
N50 G00 X50.0 Z50.0
N60 M30
```

### ❖ Ciclo 5

```
N00 G54(Desplazamiento) G71 (programación en mm) G94(avance x
vuelta) G97 (rev/min) S (#rev/min)
N10 M04 (sentido de giro antihorario de la pieza) M08 (sistema de
lubricación)
N20 T0101 (cortador izquierdo)
N30 G00 X15.8 Z5.0
N40 G84 X13.4 Z-100.0 D3=400 F avance(mm/min)
N50 G00 X50.0 Z50.0
N60 M30
```

- Para visualizar el deterioro de la herramienta en cada ciclo de corte se utilizará un microscopio WILD M400 Photomakroskop (figura 2.11 A) y para realizar las mediciones del desgaste de la herramienta (flanco) se utilizará el microscopio electrónico de barrido (figura 2.11 B).



Figura 2.11. WILD M400 Photomakroskop (A) y Microscopio electrónico de barrido (B).

## 2.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL SIMPLE

Analizado el desgaste de la herramienta de corte para cada prueba se debe evaluar por un análisis de regresión lineal simple.

El análisis de regresión lineal simple es un método estadístico, este método ayuda ajustar la línea a partir de un cierto conjunto de datos. La línea es ajustada por el método de mínimos cuadrados, el cual menciona que la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los puntos y la línea sea mínima.

A continuación se ejemplifica los cálculos que se deben llevar a cabo por el método de mínimos cuadrados, para encontrar los valores de n y C de la ecuación Taylor:

# De prueba	V <sub>c</sub> (m/min)	T (min)	X=log V <sub>c</sub>	Y=log T	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
1							
2							
3							
			$\sum X =$	$\sum Y =$	$\sum XY =$	$\sum X^2 =$	$\sum Y^2 =$
			$(\sum X)^2 =$	$\sum X * \sum Y =$			

	$\frac{(\sum X)^2}{N} =$	$\frac{\sum X * \sum Y}{N} =$	Donde N es el número de pruebas
--	--------------------------	-------------------------------	---------------------------------

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} =$$

$$a = \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} =$$

$$n = \frac{\sum XY - \left(\frac{\sum X * \sum Y}{N}\right)}{\sum X^2 - \left(\frac{(\sum X)^2}{N}\right)} =$$

$$n = - \underline{\hspace{2cm}}$$

$$-1/n = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\log C = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{n} =$$

$$C = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (m/min)}$$

Ecuación de Taylor para la vida útil de la herramienta:

$$V_c T^{\frac{-1}{n}} = C$$

Finalmente la transformación de la ecuación de vida útil de la herramienta de Taylor con respecto a los ejes queda de la siguiente forma:

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

Dónde:  $a = k(\bar{X} - \log C) = \bar{Y}$

### CAPÍTULO III. RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL DESGASTE DE LA HERRAMIENTA

#### 3.1 RESULTADOS EN EL ENSAYO DE JOMINY Y TRATAMIENTO TÉRMICO (TEMPLE)

Los resultados obtenidos en el ensayo de Jominy son los siguientes para lecturas de dureza en 50 mm (1.96 in) desde la distancia extrema templada.

	Distancia pulgadas(1/16)	Dureza HRC Probeta 1	Dureza HRC Probeta 2	Dureza HRC Probeta 3
	0,0625	31,4	35,3	33,2
	0,125	27,4	31,5	30,4
	0,1875	23,9	25,5	26,4
	0,25	20,5	22,3	21,3
	0,3125	20,1	20,3	20,6
	0,375	20,3	17,3	18,6
	0,4375	19,3	17,5	17,8
(1/2) pulgada	0,5	18,4	16,2	16,5
	0,6875	15,1	13,9	15,3
	0,875	11,8	12,5	13,2
	1,062	12,6	10,4	12,4
	1,25	10,2	8,3	11,6
	1,437	9,5	7,4	10,1
	1,625	10,5	8,4	9,2
	1,8125	7,7	7,9	7,6
2 pulgadas	2	3,8	6,9	6,5
	2,25	5,8	5,9	5,8
	2,5	4,8	3,6	4,6
	2,75	3	3,8	3,4
	3	2,8	3,3	2,6
	3,25	2	1,1	1,3
	3,5	1	1,1	1
	3,75	2,6	1,3	1,2
4 pulgadas	4	1,6	0,1	0,6

El comportamiento de templabilidad en el acero 8620 se muestra en la figura 3.1; la gráfica nos muestra el comportamiento de la dureza desde el punto de contacto del chorro de agua, hasta el extremo opuesto. Donde el primer punto presenta una mayor dureza y esta tiende a disminuir con respecto a la distancia de la base de la probeta.

La profundidad de corte para los ensayos de maquinado es de 1.2 mm, por lo tanto el diámetro final de la pieza a maquinarse será de 13.4 mm (0.52 in), lo cual corresponde a que la pieza presente una dureza entre 30-18 HRC, tratando de mantener una dureza uniforme en el proceso de maquinado.

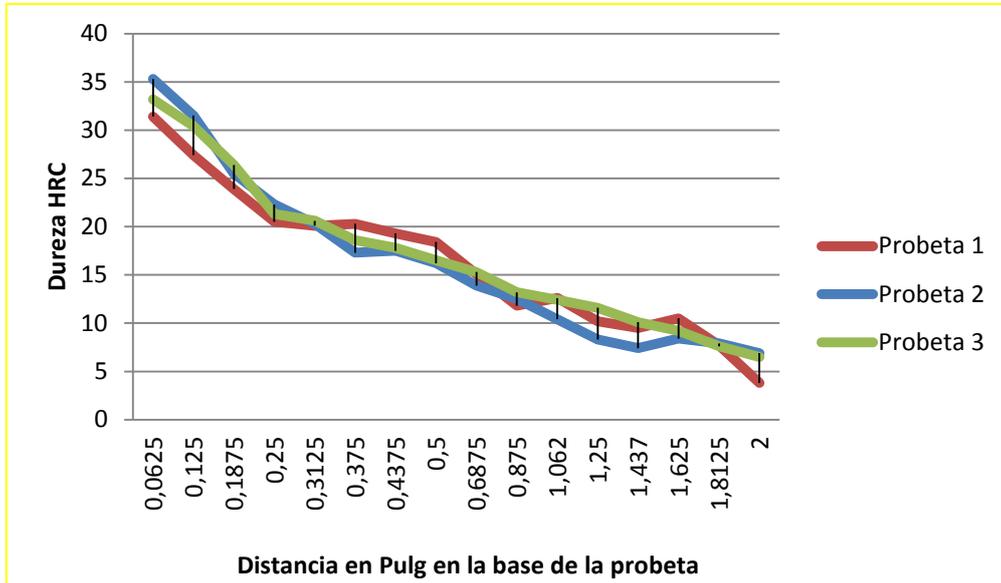


Figura 3.1. Gráfico del grado de templabilidad (Ensayo de Jominy).

El comportamiento que tiene el acero templado 8620 en el ensayo de Jominy con respecto a los ciclos de maquinado es el siguiente:

# ciclo	Diámetro inicial	Diámetro final	Dureza(HRC) en función de diámetro inicial
1	25.4	23	33.4
2	23	20.6	24.7
3	20.6	18.2	21.4
4	18.2	15.8	18.8
5	15.8	13.4	17.4

Los resultados obtenidos en la medición de la dureza promedio en el tratamiento térmico (temple) en el acero 8620 son los siguientes:

Material	Dureza HRC
Acero 8620 sin temple	13.38
Acero 8620 templado	35.2

### 3.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE MAQUINADO “DESGASTE DE LA HERRAMIENTA”

Con el fin de verificar el efecto del desgaste en las herramientas, se realizó una inspección de cada filo de la herramienta, donde se obtuvieron las siguientes imágenes a diferentes aumentos, haciendo uso del microscopio electrónico de barrido.

Los filos de las herramientas de corte (antes del maquinado) no presentaban algún tipo de desgaste o problema superficial que afectara el buen funcionamiento durante las pruebas (figura 3.2).

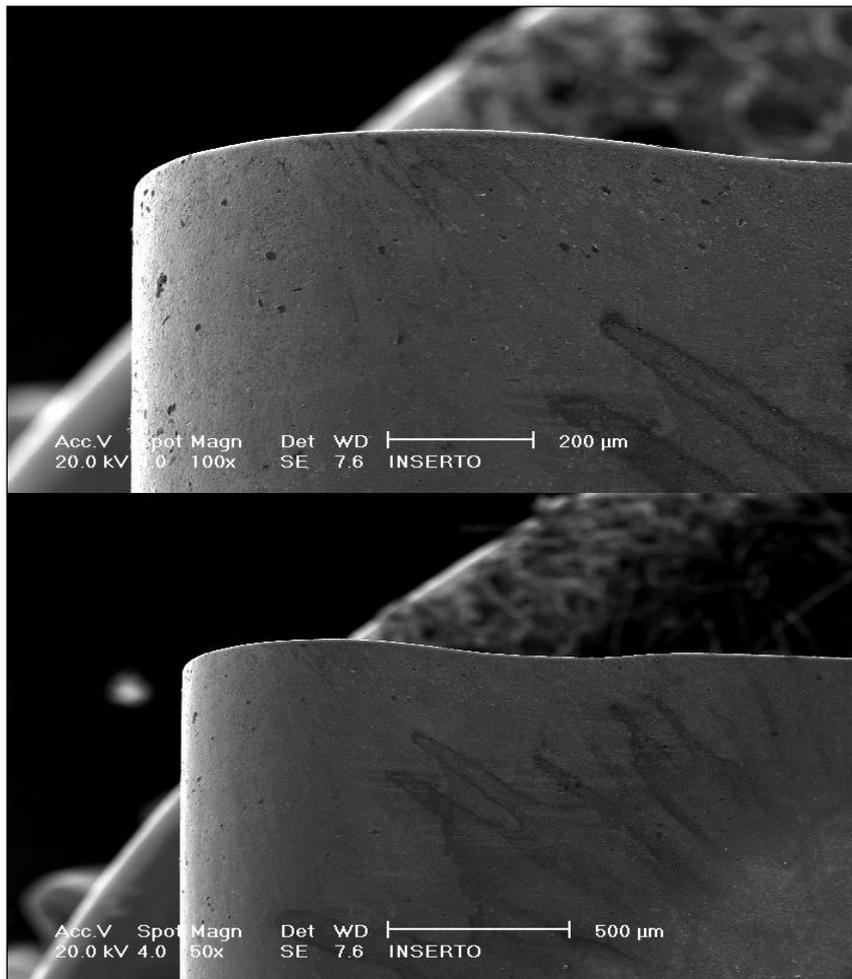


Figura 3.2. Imagen 100X y 50X Inspección del Filo de corte de la herramienta (sin maquinar).

Los resultados y consideraciones del desgaste de la herramienta para la prueba No.1 son los siguientes:

<b>PRUEBA No.1 FILO 1</b>
<p>Velocidad de corte <math>V_c1 = 40 \text{ m/min}</math>                      Profundidad de corte = <math>1.2 \text{ mm}</math>                      Avance = <math>0.2 \text{ mm/rev}</math></p> $N = \left[ \frac{(40 \frac{\text{m}}{\text{min}})(1000 \text{ mm/1m})}{\pi(19.4 \text{ mm})} \right] = 670 \text{ RPM}$ $f = \left[ (0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}})(670 \frac{\text{rev}}{\text{min}}) \right] = 134 \text{ mm/min}$

- En esta prueba se utilizó una velocidad de corte baja para medir el desgaste que se presenta en la herramienta, empleando como operación de corte un cilindrado, profundidad de corte constante y avance como función de la velocidad de corte.
- Para esta prueba se utilizaron 21 probetas de acero templado 8620 con una dureza promedio de 23 HRC y con las dimensiones especificadas anteriormente. El total de las probetas utilizadas representa el desgaste que se presentó en la herramienta durante el maquinado bajo estas condiciones de corte.
- Así mismo en la imagen mostrada (figura 3.3) se aprecia un desgaste significativo a partir del maquinado de la probeta No.16 de las 21 indicadas en el párrafo anterior; lo cual se hizo evidente al observar el filo de la herramienta en el microscopio electrónico de barrido, donde se aprecia un desgaste en el flanco de  $125\mu\text{m}$ , el cual no afecta el desempeño de la herramienta. (de acuerdo a la literatura se considera como fin de vida útil de la herramienta, un desgaste del flanco de  $300\mu\text{m}$ ).
- Las observaciones que se presentaron durante este maquinado son las siguientes:
  - A consecuencia de la baja velocidad y avance de esta operación, el proceso emitía un sonido agudo, con lo cual, se considera que se presentó un elevado nivel de rozamiento entre la superficie generada y el filo de la herramienta.

- La viruta que se obtuvo en este maquinado fue continua en el 50% de la longitud inicial de la barra y parcialmente segmentada en el resto de la longitud (discontinuo).
- En esta operación se observó que a partir del desgaste de  $125\mu\text{m}$  del flanco el acabado superficial de la pieza presentó ralladuras superficiales.

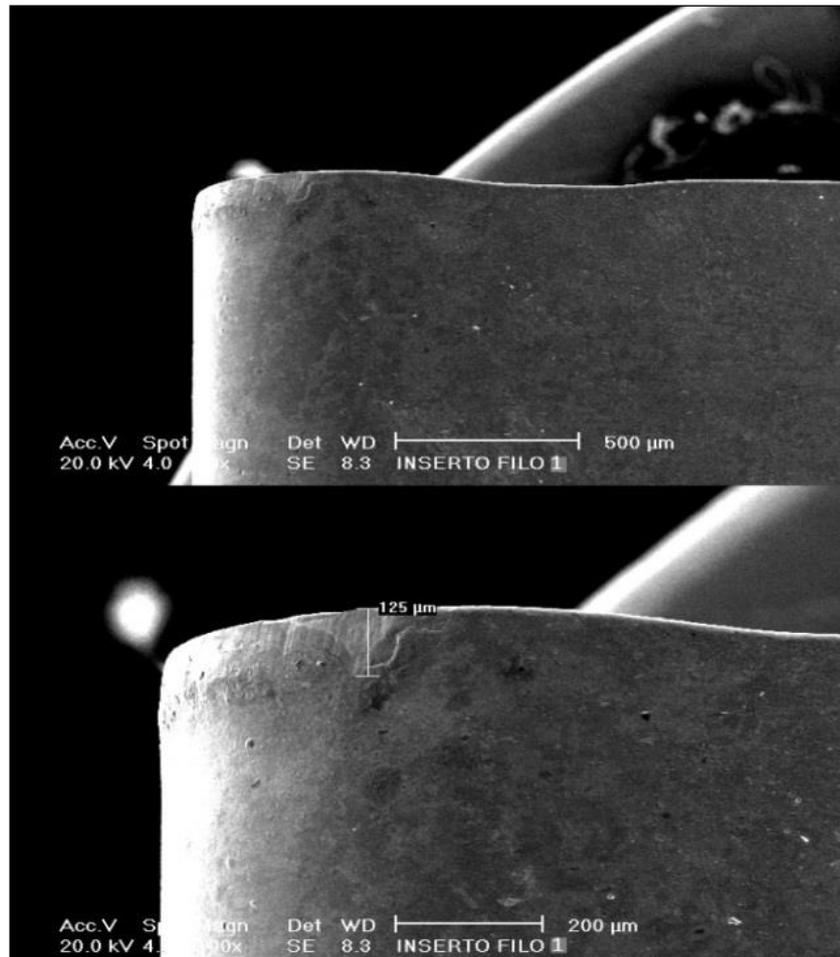


Figura 3.3. Imagen 100X Inspección del Filo de corte 1 y medición del desgaste del flanco de la herramienta.

En la figura 3.4 se muestra el desgaste que se presentó en la herramienta; se presentó un desgaste de flanco de  $196\mu\text{m}$  (al maquinar 21 probetas), los mecanismos de falla que se presentaron fueron: Astillamiento y filo recrecido de la herramienta.

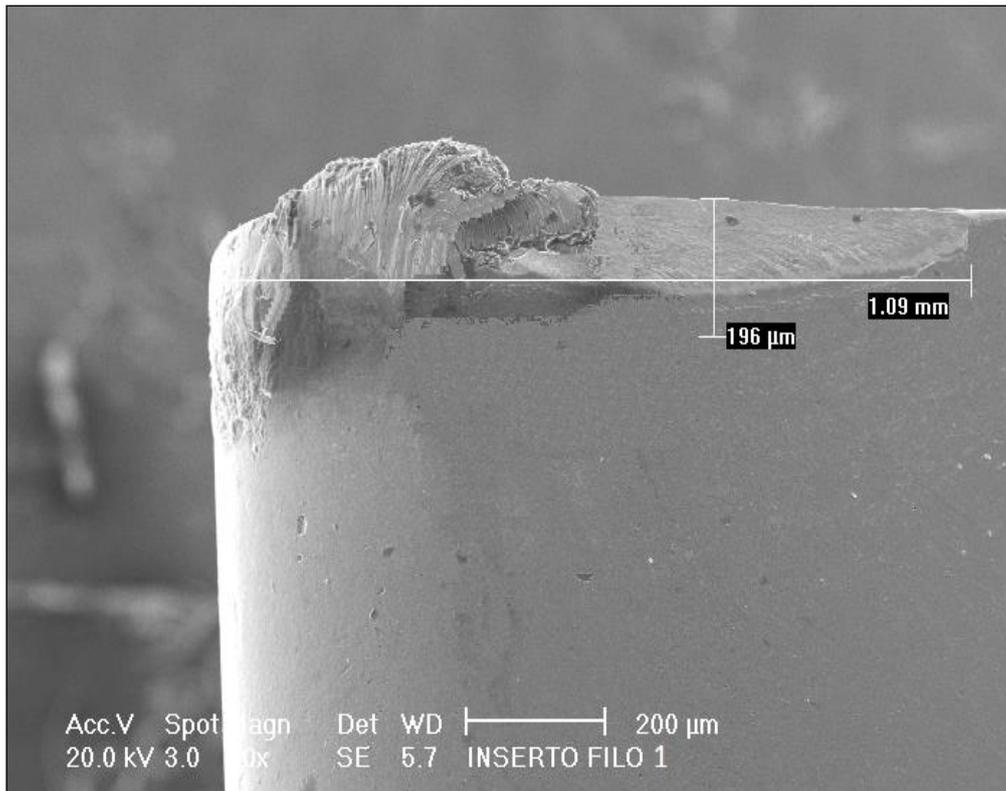


Figura 3.4. Desgaste del FILO 1, Astillamiento y filo recrecido.

El tiempo de corte para los cinco ciclos en la prueba No.1 fue de 3.73 min; en la figura 3.5 se muestra la gráfica del comportamiento del desgaste del flanco en función del tiempo de corte, de acuerdo a las medidas tomadas en el microscopio electrónico de barrido.

- Al realizar el ensayo en una probeta de acero templado se tiene un tiempo de corte de 3.73 min y se presenta desgaste en el flanco menor.
- Al maquinar 16 probetas de acero templado se tiene un tiempo de corte de 59.70 min y presenta un desgaste en el flanco de 125μm.
- El tiempo de corte que se presentó en el filo 1 es de 78.36 min; esto es cuando se presentó un astillamiento en el filo de la herramienta y un desgaste del flanco de 196μm.

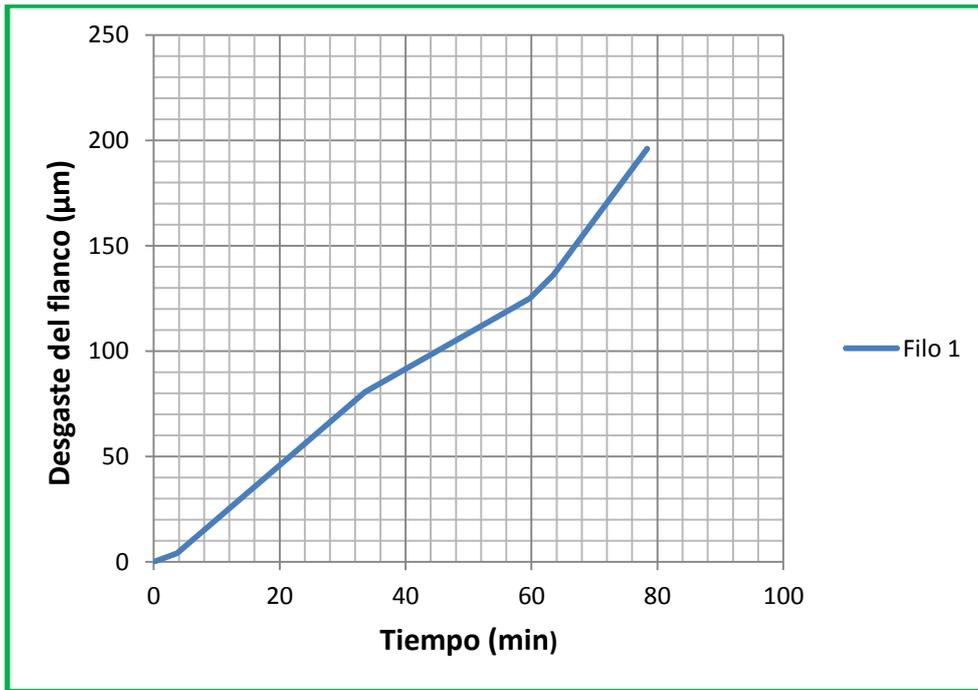


Figura 3.5. Comportamiento del desgaste del flanco en función del tiempo de corte (Filo 1), para una velocidad de corte de 40 m/min.

Los resultados y consideraciones del desgaste de la herramienta para la prueba No.2 son los siguientes:

**Prueba No.2**  
**Filo 2**

Velocidad de corte  $V_{c2} = 80 \text{ m/min}$   
Profundidad de corte = 1.2 mm  
Avance = 0.2 mm/rev

$$N = \left[ \frac{(80 \frac{m}{min})(1000 \text{ mm}/1m)}{\pi(19.4 \text{ mm})} \right] = 1340 \text{ RPM}$$

$$f = \left[ (0.2 \frac{mm}{rev})(1340 \frac{rev}{min}) \right] = 268 \text{ mm/min}$$

Para este ensayo se aumentó la velocidad de corte, profundidad de corte constante y avance como función de la velocidad de corte; las observaciones que se presentaron en el ensayo fueron los siguientes:

- Al ejecutar el cuarto ciclo de la primera probeta de maquinado se visualizó que se presentaba un desgaste en el recubrimiento de la herramienta. Lo cual se constató mediante la observación en el macroscopio.
- Con los parámetros de esta prueba, al maquinar la segunda probeta se presentó muestras de ralladuras superficiales.

En la figura 3.6 se muestra la evidencia de falla que se presentó en la herramienta; se considera que el tipo de falla presentado corresponde al tipo cráter (A), así como el efecto del desgaste provocado en la superficie de la herramienta (B).

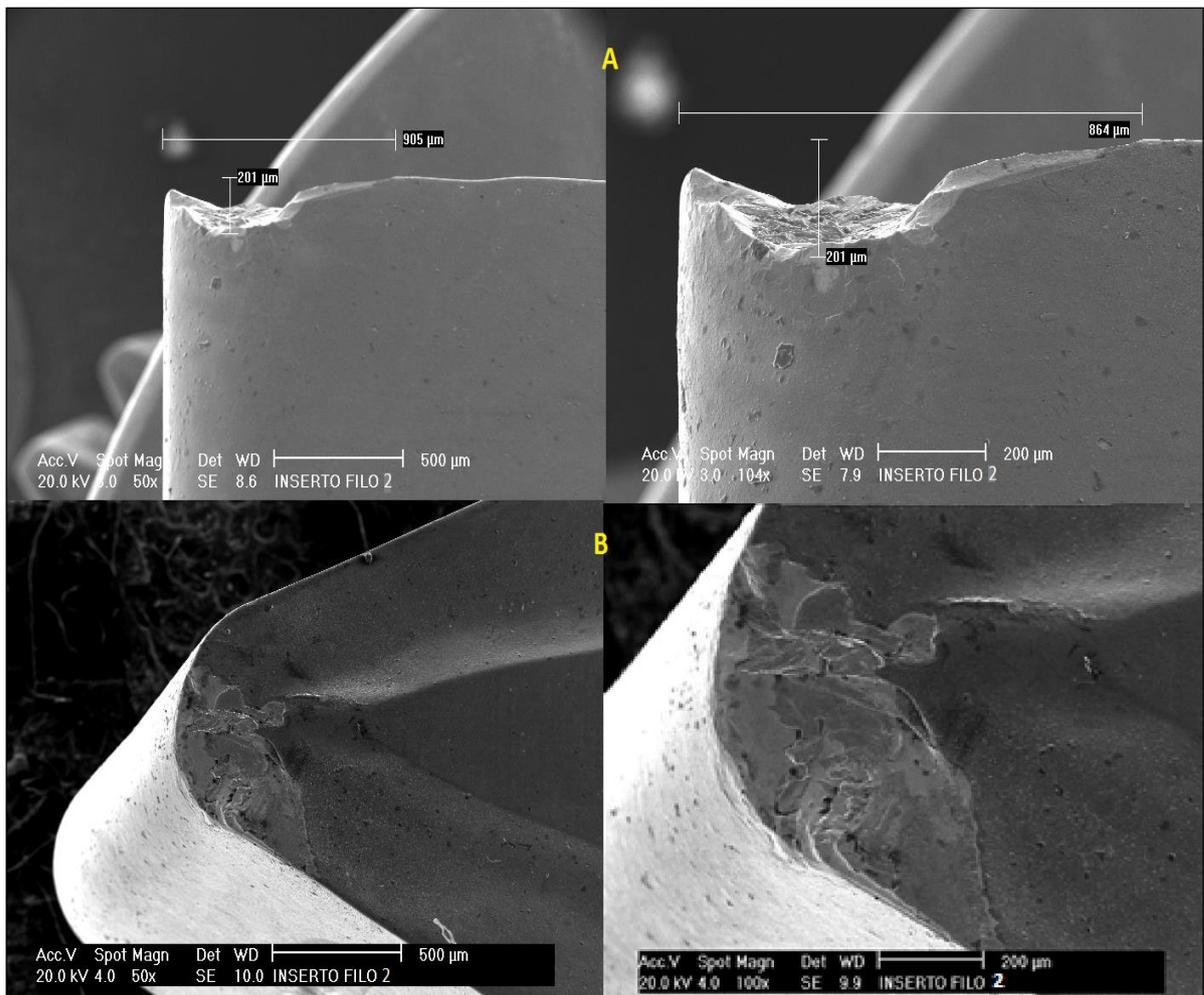


Figura 3.6. Desgaste del filo 2 de la herramienta.

El tiempo de corte al efectuar cinco ciclos en la prueba No.2 es de 1.86 min. En la figura 3.7 se muestra la gráfica del comportamiento del desgaste del flanco en función del tiempo de corte, de acuerdo a las mediciones tomadas en el microscopio electrónico.

- Al realizar el ensayo en una probeta se tiene un tiempo de corte de 1.86 min y se presenta un desgaste de flanco de  $60.2\mu\text{m}$ .
- El fin de vida útil de la herramienta se presentó para un tiempo de corte de 5.58 min; esto es cuando se presentó una fractura del tipo cráter en el filo de la herramienta y un desgaste del flanco de  $201\mu\text{m}$ .

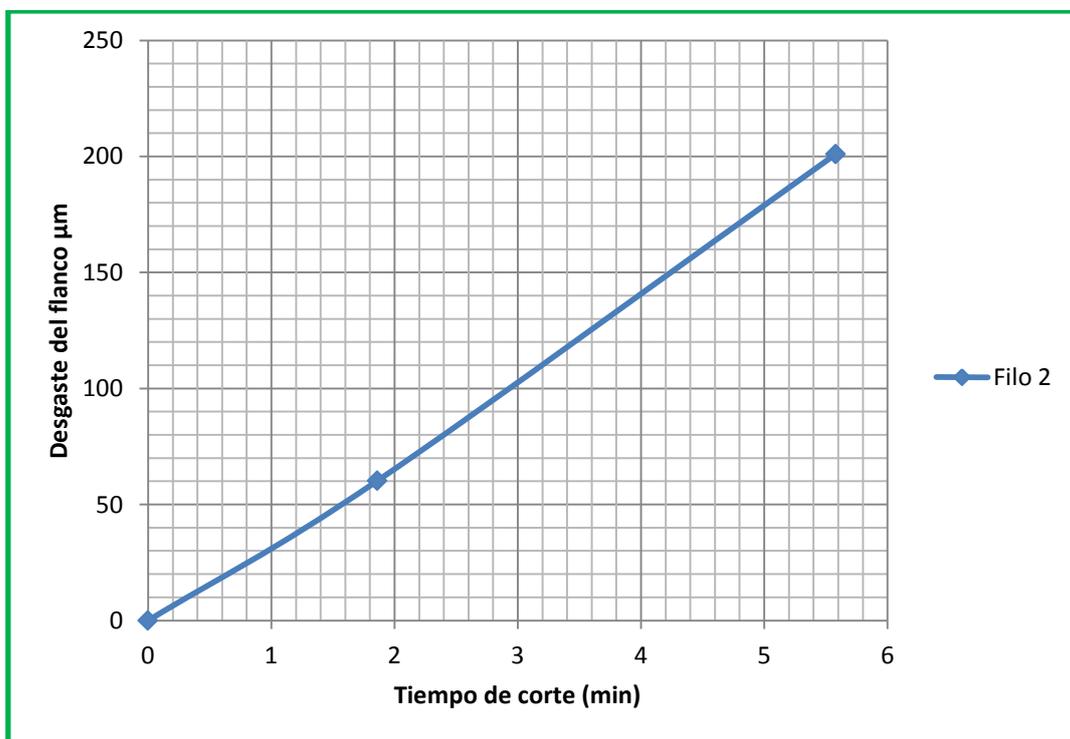


Figura 3.7. Comportamiento del desgaste del flanco (Filo 2) en función del tiempo de corte.

Los resultados y consideraciones del desgaste de la herramienta para la prueba No.3 son los siguientes:

<b>Prueba No. 3</b> <b>Filo 3</b>
<p>Velocidad de corte <math>V_{c3} = 120 \text{ m/min}</math>                      Profundidad de corte = <math>1.2 \text{ mm}</math>                      Avance = <math>0.2 \text{ mm/rev}</math></p> $N = \left[ \frac{(120 \frac{\text{m}}{\text{min}})(1000 \text{ mm/1m})}{\pi(19.4 \text{ mm})} \right] = 2010 \text{ RPM}$ $f = \left[ (0.2 \frac{\text{mm}}{\text{rev}})(2010 \frac{\text{rev}}{\text{min}}) \right] = 402 \text{ mm/min}$

Para este ensayo se incrementó la velocidad de corte, profundidad de corte constante y avance como función de la velocidad de corte; las observaciones que se presentaron en el ensayo fueron los siguientes:

- En el tercer ciclo de la probeta No.1 de maquinado se visualizó un desgaste en el recubrimiento de la herramienta. Lo cual se constató mediante el macroscópio.
- A partir del quinto ciclo de la probeta No.1 se presentó muestras de ralladuras superficiales en el material.
- En la segunda probeta el recubrimiento de la herramienta se deterioraba y se presentó un recrecimiento en el filo de la herramienta.

En la figura 3.8 se muestra la medición del desgaste del flanco y el filo recrecido que se presentó en la herramienta para esta prueba.

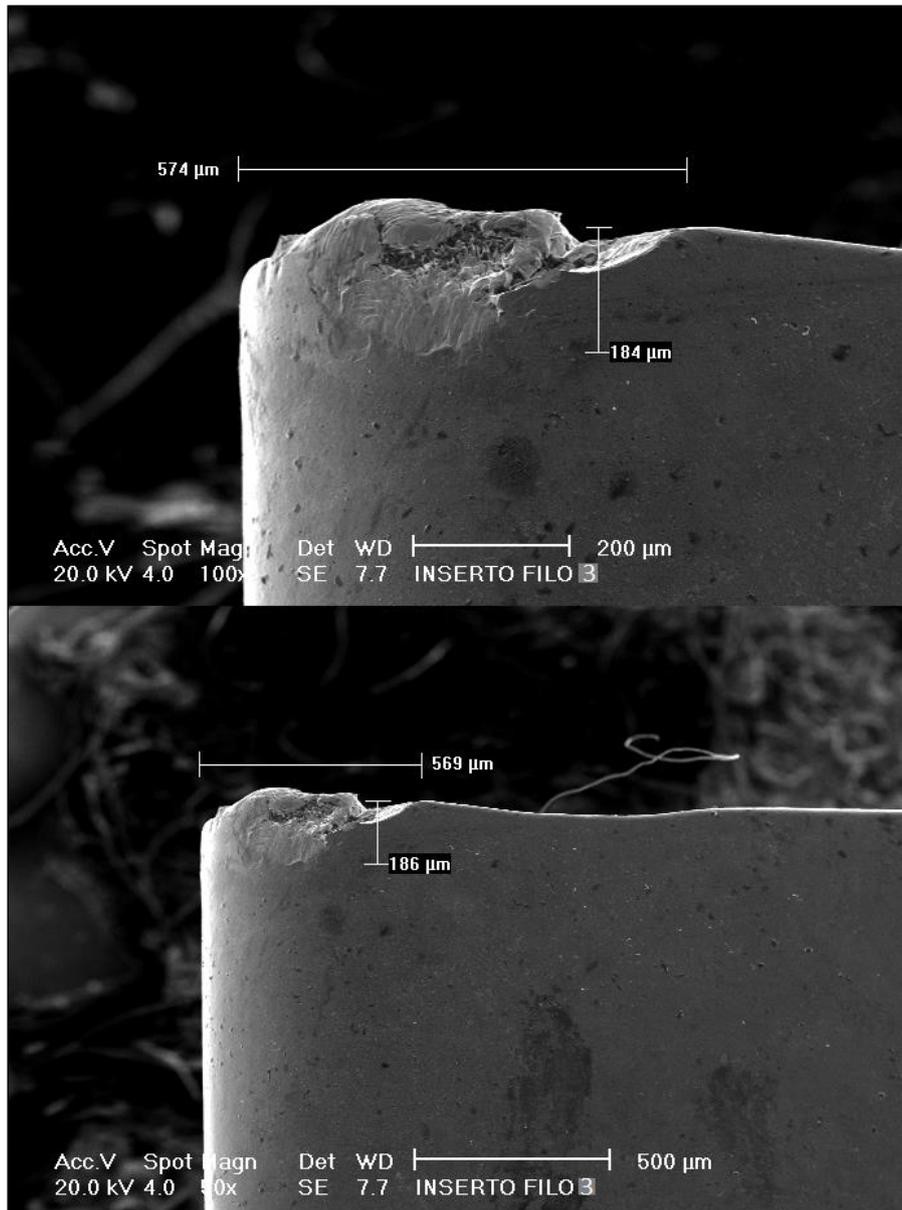


Figura 3.8. Desgaste del flanco (Filo 3) y deformación en el filo de la herramienta.

El tiempo de corte al efectuar los cinco ciclos en una probeta es de 1.24 min. En la figura 3.9 se muestra la gráfica del comportamiento del desgaste del flanco en función del tiempo de corte, de acuerdo a las mediciones tomadas en el microscopio electrónico de barrido se tiene lo siguiente:

- Al realizar el ensayo en una probeta de acero templado se tiene un tiempo de corte de 1.24 min y se presentó un desgaste de flanco de  $40,3\mu\text{m}$ .
- El fin de vida útil de la herramienta se presentó para un tiempo de corte de 3.72 min; se presentó una fractura en el filo de la herramienta y un desgaste del flanco de  $186\mu\text{m}$ .

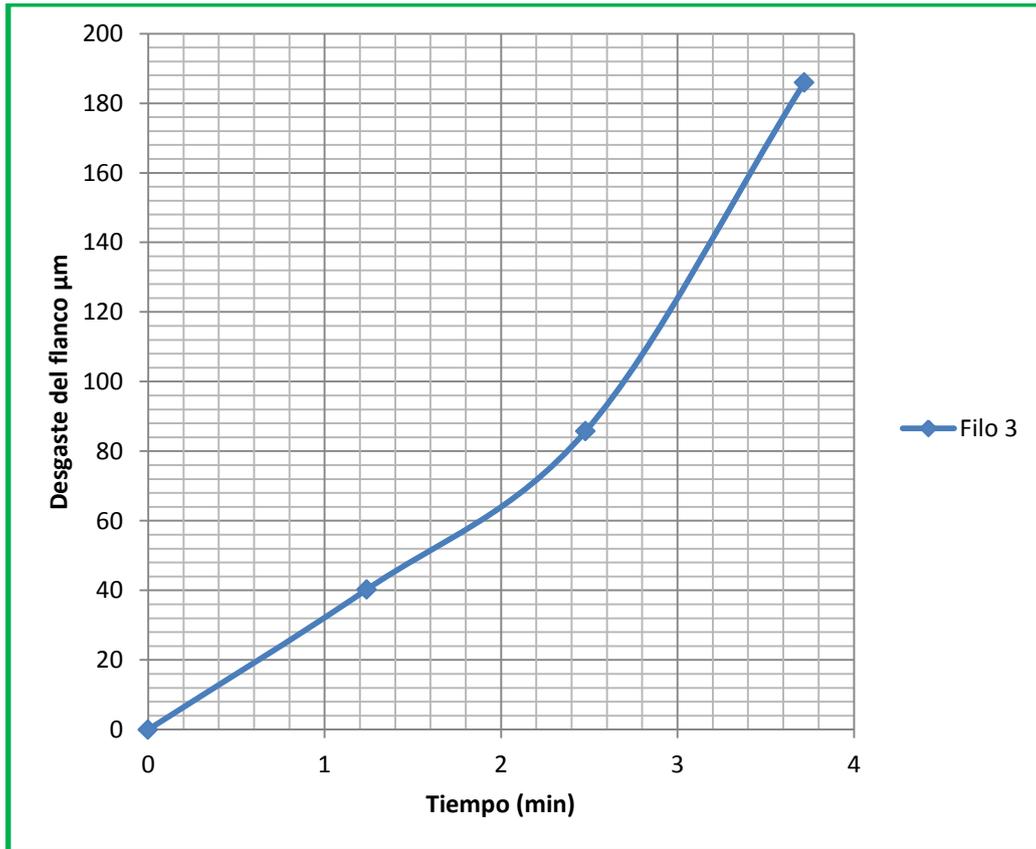


Figura 3.9. Gráfico del desgaste del flanco en función del tiempo de corte.

En la figura 3.10 se muestra el gráfico comparativo de las tres pruebas realizadas a velocidades de corte variables, las tendencias que se presentan son las siguientes:

- La tendencia que se presentó el filo 2 y 3 es muy similar de acuerdo al fin de vida útil en la herramienta; alcanzando valores máximos de desgaste del flanco en un tiempo de 8 y 2 minutos.
- La tendencia que presenta el filo 1 en un tiempo mayor a 70 minutos alcanzando un desgaste del flanco de  $196\mu\text{m}$ .

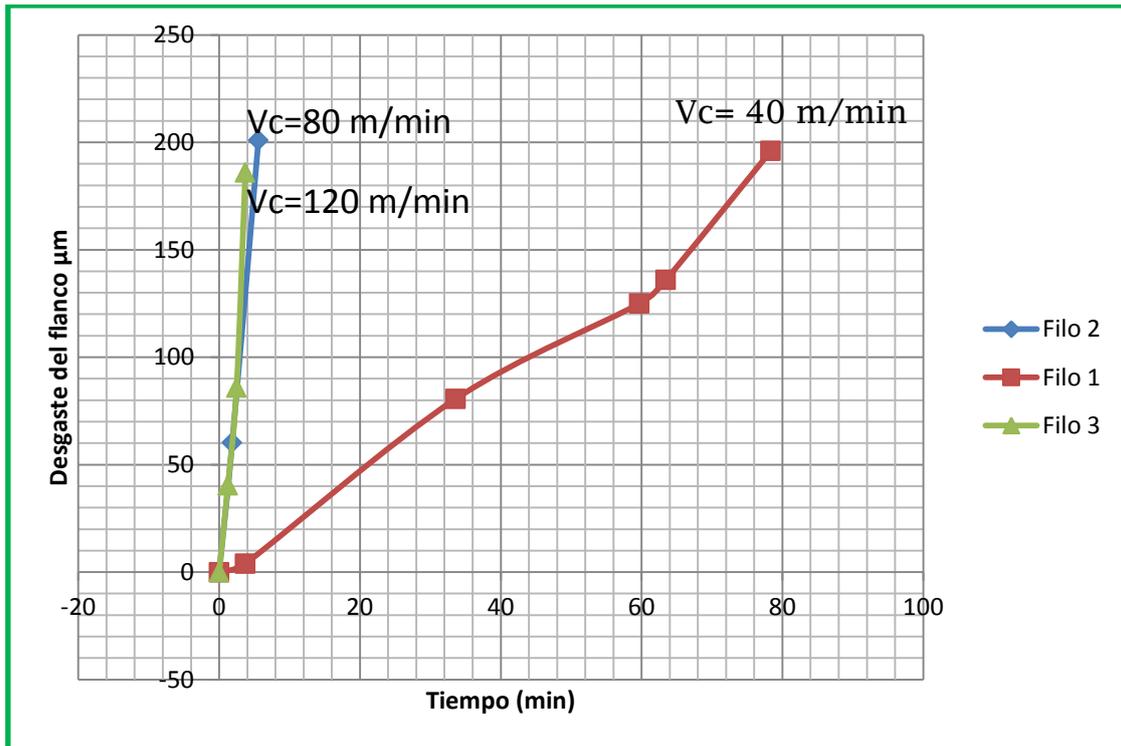


Figura 3.10. Gráfico del desgaste del flanco en función del tiempo de corte para las tres pruebas realizadas.

### 3.3 CÁLCULOS DE C Y n (ECUACIÓN DE TAYLOR) PARA LA VIDA ÚTIL DE LA HERRAMIENTA DE MAQUINADO:

# De prueba	Vc (m/min)	T (min)	X=log Vc	Y=log T	XY	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
1	40	78.36	1.6021	1.8941	3.0345	2.5666	3.5876
2	80	5.58	1.9031	0.7466	1.4209	3.6218	0.5575
3	120	3.72	2.0792	0.5705	1.1863	4.3230	0.3255
			$\Sigma X = 5.584$	$\Sigma Y = 3.211$	$\Sigma XY = 5.641$	$\Sigma X^2 = 10.511$	$\Sigma Y^2 = 4.470$
			$(\Sigma X)^2 = 31.184$	$\Sigma X * \Sigma Y = 17.932$	<b>Donde N es el número de pruebas</b>		
			$\frac{(\Sigma X)^2}{N} = 10.394$	$\frac{\Sigma X * \Sigma Y}{N} = 5.977$			

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} = 1.861$$

$$a = \bar{Y} = \frac{\sum Y}{N} = 1.070$$

$$n = \frac{\sum XY - \left(\frac{\sum X * \sum Y}{N}\right)}{\sum X^2 - \left(\frac{(\sum X)^2}{N}\right)} = -2.885$$

$$-1/n = 0.346$$

$$\text{Log } C = \bar{X} - \frac{\bar{Y}}{n} = 2.232$$

$$C = 170.608 \text{ (m/min)}$$

$$V_c T^{\frac{-1}{n}} = C$$

$$V_c T^{0,346} = 170$$

Calculo de la vida útil de la herramienta con relación a la ecuación de Taylor:

Velocidad de corte Vc (m/min)	Tiempo de vida (min)
40	65.48
80	8.83
120	2.73

Comportamiento de la vida de la herramienta (min) en función de la velocidad de corte (figura 3.11); se muestra que para una velocidad de 40 m/min se tiene una vida de la herramienta de 65.48 min, para 80 m/min el tiempo de vida es de 8.83 min y para 120 m/min el tiempo es de 2.73 min.

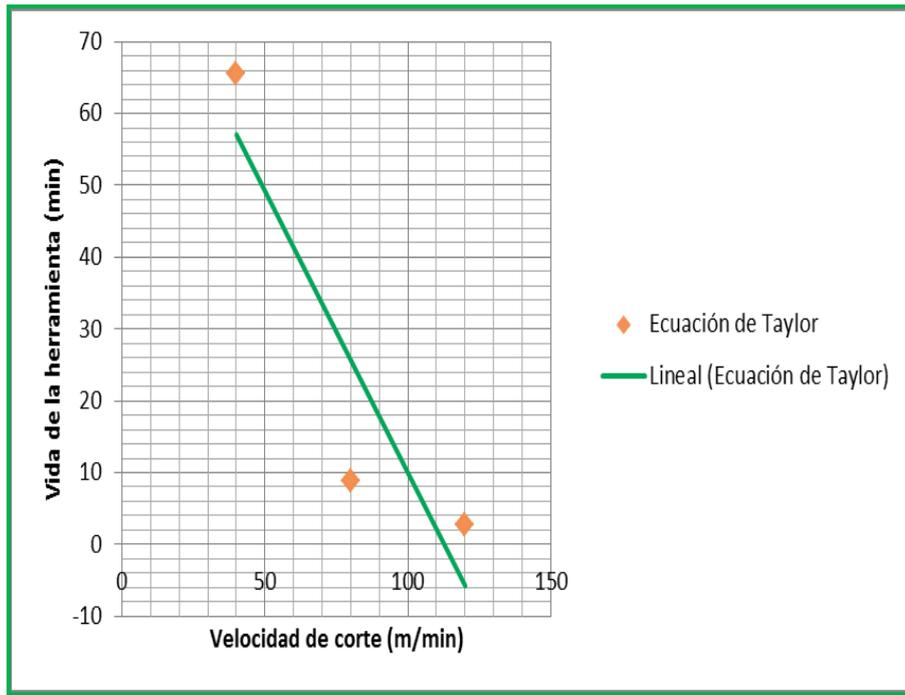


Figura 3.11. Gráficos Vida de la herramienta (min) en función de la velocidad de corte, obtenidos a partir de la ecuación de Taylor y de la velocidad de corte aplicada experimentalmente.

Los resultados obtenidos durante los ensayos realizados y empleando la ecuación de Taylor son los siguientes:

Resultados de las tres pruebas realizados:

Vc (m/min)	T (min)
40	78.36
80	5.58
120	3.72

Resultados empleando la ecuación de Taylor:

Velocidad de corte Vc (m/min)	Tiempo de vida (min)
40	65.48
80	8.83
120	2.73

En la figura 3.12 se muestra el comportamiento del tiempo de vida de la herramienta en función de la velocidad de corte. El comportamiento que se presentó en las pruebas experimentales con respecto a la ecuación de Taylor tiene variaciones considerables respecto al tiempo de vida de la herramienta.

El porcentaje de error que se obtuvo es el siguiente:

- Para la velocidad de corte de 40 m/min se obtuvo un error del 16 %
- Para la velocidad de corte de 80 m/min se obtuvo un error del 36%
- Para la velocidad de corte de 120 m/min se obtuvo un error del 26 %

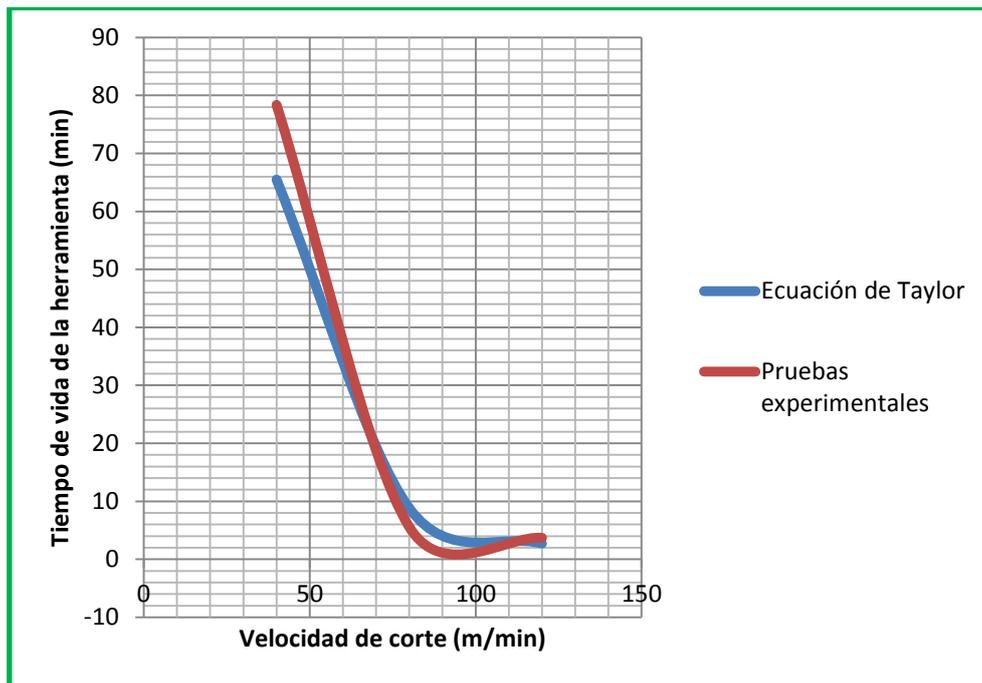


Figura 3.12. Gráfico comparativo entre la ecuación de Taylor y pruebas experimentales (Vida de la herramienta (min) en función de la velocidad de corte).

## CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las principales causas de reducción de vida útil de la herramienta que se presentaron en cada una de las pruebas son las siguientes:

- Para la velocidad de corte de 40 m/min, la herramienta presentó un mecanismo de falla en el filo, un desgaste del flanco 196 $\mu$ m y fractura en la cara de incidencia de la herramienta. Para un tiempo de maquinado de 78.36 min.
- Para la velocidad de corte de 80 m/min, la herramienta presentó una fractura tipo cráter y un desgaste del flanco de 201 $\mu$ m que ocasiono que la herramienta llegara a su fin de vida útil. Para un tiempo de maquinado de 5.58 min.
- Para la velocidad de corte de 120 m/min, la herramienta presentó un desgaste del flanco de 186 $\mu$ m y recrecimiento en el filo de la herramienta. Para un tiempo de maquinado de 3.72.

Así como también se compararon los valores obtenidos mediante la ecuación de Taylor, del tiempo de vida de la herramienta en función de la velocidad de corte. Los valores obtenidos mediante la ecuación de Taylor para la prueba No.1 (40 m/min) es de 65.48 min, para la prueba No.2 (80 m/min) es de 8.83 min y para la prueba No.3 (120 m/min) es de 2.73 min.

La ecuación de Taylor de vida útil de la herramienta durante el maquinado de acero templado que se obtuvo es la siguiente  $V_c T^{0,346} = 170$  con un desgaste promedio del flanco  $VB=0,193$  mm, utilizando como herramienta de corte un inserto DNMG 15 06 08-MF 1125 y como material de trabajo acero templado 8620; el tipo de operación que se realizó fue un cilindrado, con una velocidad de corte variable (40 m/min, 80 m/min, 120 m/min), con un avance de 0,2 mm/rev y una profundidad de corte de 1.2 mm.

Con base en la literatura se seleccionó el desgaste del flanco con un valor de  $VB=0,3$ mm, pero de acuerdo a la inspección que se realizó con ayuda del microscopio electrónico de barrido y WILD M400 Photomakroskop en cada una de las pruebas, existe un indicativo que a partir del valor promedio del desgaste del flanco de  $VB=0,19$  mm representa un valor crítico de desgaste.

Se compararon los valores de las pruebas experimentales y las obtenidas mediante la ecuación de Taylor; en los resultados se muestran variaciones y porcentajes de error considerables en el tiempo de vida de la herramienta.

## 4.2 CONCLUSIONES

1. Los objetivos planteados se cumplieron, se obtuvo el modelo de la ecuación de Taylor con base en las pruebas de maquinado, así como también se realizó la inspección de la herramienta para visualizar las condiciones de falla que se presentan durante el maquinado y se realizaron mediciones del desgaste del flanco que afectan la vida útil de la herramienta.
2. La selección de la herramienta de corte es muy importante, ya que el material base y recubrimiento en la herramienta influye en la vida útil; el material base de la herramienta empleada fue de carburo de tungsteno empleando como aglutinante cobalto, el recubrimiento es de 1-2 $\mu$ m de TiN de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Sandvik).
3. De acuerdo con el trabajo desarrollado se puede aseverar que la velocidad de corte es la principal variable que influye en el desgaste de la herramienta, seguido del avance y profundidad de corte, así como también el tipo de material de trabajo utilizado, lo cual concuerda con la teoría desarrollada por F.W Taylor.
4. Al realizar la actividad experimental de este trabajo se ha verificado que el incremento de desgaste de la herramienta se presentó al aumentar la velocidad de corte. Así mismo, se verificó que el desgaste del flanco se incrementa con el tiempo de maquinado.
5. Las pruebas realizadas han permitido verificar que el desgaste se presenta bajo las siguientes condiciones: al iniciar el proceso se presenta un desgaste inicial en el borde de la herramienta, seguido de un desgaste progresivo y finalmente un desgaste acelerado que algunos casos ocasiona algún tipo de deformación o falla acelerada en la herramienta. Lo cual se presenta con mayor intensidad a mayores velocidades de corte.

6. En la primera prueba realizada la herramienta presentó un tiempo de vida útil mayor y un comportamiento de desgaste gradual en la herramienta. Para la segunda prueba realizada el tiempo de vida útil de la herramienta disminuyó y se presentó una fractura del tipo cráter en la herramienta con el doble de incremento de la velocidad de corte de la prueba anterior. En la última prueba realizada se incrementó la velocidad de corte y el tiempo de vida útil disminuyó, se presentó un desgaste del flanco y recrecimiento del filo de la herramienta.
7. El promedio del porcentaje de error comparando la ecuación de Taylor con respecto a las pruebas experimentales fue de un 26 %, al considerar las velocidades empleadas en este trabajo y un material de acero 8620 endurecido, este error se debió en gran parte al comportamiento de la dureza en cada capa del material que se maquinaba.
8. De acuerdo a los resultados obtenidos en cada una de las pruebas de maquinado, a velocidades de corte mayores a 80 m/min la herramienta tiene un tiempo de vida útil menor a 5 minutos, por lo cual no es recomendable utilizarla con las velocidades antes mencionadas.
9. De acuerdo a la literatura la vida útil de la herramienta para este tipo de material empleado es de  $300\mu\text{m}$ , si comparamos con los resultados obtenidos del desgaste del flanco que fue de  $190\mu\text{m}$ , se presentó un desgaste del flanco menor, considerando un acero 8620 endurecido y con los parámetros de corte mencionados.

---

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Kalpakjian S, Schmid S.R. Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición. México, Prentice Hall, 2008.
2. Groover Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Tercera edición. Editorial McGraw Hill, México (2007).
3. R.M Julián, C.M Lucas, R.R Juan Carlos. Procesos industriales para materiales metálicos. Segunda edición. España. Grupo corporativo Visionnet.
4. C.C José Miguel, H. A Carlos Gabriel. Análisis del tiempo de vida de una herramienta de corte para el maquinado del acero AISI D6.
5. R. Castellanos Díaz, D. Martínez Krahmer, R. Ávila Rondón. Aplicación de la norma ISO 3685 en la evaluación de la maquinabilidad del acero SAE 1020 durante el proceso de torneado: 194 - 202, 2011.
6. Hernández-González. L. W, Pérez-Rodríguez R, P. Zambrano-Robledo, M. Guerrero-Mata, L. Dumitrescu. Estudio del desgaste del flanco de carburos recubiertos y cermet durante el torneado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045. *Revista metalúrgica*, 2011.
7. Micheletti G.F. Mecanizado por Arranque de Viruta. Primera Edición. Editorial Blume, Barcelona, 1980.
8. P.F Juan C, R.L Donato. Determinación experimental de las fuerzas de corte de la aleación AA A356 T6 en operaciones de torneado. *Revista ingeniería UC*, 2007.
9. F. Salvatore, S. Saad, H. Hamdi. Modeling and simulation of tool wear during the cutting process. *Journal of materials processing technology*, 2013.
10. A. Muñoz Sánchez, J.A Canteli, J.L Cantero, M.H. Miguélez. Numerical analysis of the tool wear effect in the machining induced residual stresses. *Journal of materials processing technology*, 2010.

11. Valery Marinov. Experimental study on the abrasive wear in metal cutting. Journal of materials processing technology, 1995.
12. E.A Manuel. Apuntes de ingeniería de fabricación. Cartagena, 2004.
13. Aceros Especiales Grados Herramienta y Maquinaria. México. [Consultada en septiembre 2014]. Disponible en: <http://sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%208620.pdf>
14. Sandvik Coromant. México. [Consultada en septiembre 2014]. Disponible en: <http://www.sandvik.coromant.com/es-es/products/pages/productdetails.aspx?c=DNMG%2015%2006%2008-MF%201125>
15. Sandvik Coromant. Metal duro con recubrimiento y catálogo de herramientas de corte, 2012.
16. M. Barge, H. Hamdi, J. Rech, J. M Bergheau. Numerical modelling of orthogonal cutting: influence of numerical parameters. Journal of materials processing technology, 2005.
17. Bin li, H. Zhang, H. Wang, J. Chang, X. Sun. Numerical simulation technology on tool wear of metal cutting. Journal of materials processing technology, 2010.
18. Arranz Merino Fernando, Vizán Idoipe Antonio, Labarga Ordoñez Julio E, Rincón Rincón Esther. Correlaciones para ensayos de herramientas y de maquinabilidad. Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente. Volumen 2, 2004.
19. Ortiz Garcés W, Venegas Robles J. 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.
20. Ja lay A.D, Bajalí A.K. Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: interactions with tool-coatings and tool Surface features. Journal of materials processing technology, 2009.
21. Kishawy H.A, Lei Pang, Ba lazinski M. Modeling of tool wear during hard turning with self-propelled rotary tolos. Journal of materials processing technology, 2011.

22. X. Luo, K. Cheng, R. Holt, X. Liu. Modeling flank wear of carbide tool insert in metal cutting. *Journal of materials processing technology*, 2005.
23. Z. Pálmai. Proposal for a new theoretical model of the cutting tool's flank wear. *Journal of materials processing technology*, 2013.
24. C. Chungchoo, D. Saini. A computer algorithm for flank and crater wear estimation in CNC turning operations. *Journal of materials processing technology*, 2002.
25. E.O. Ezugwu, C.I. Okeke. Tool life and wear mechanisms of TiN coated tools in an intermittent cutting operation. *Journal of materials processing technology*, (2001) 10-15.
26. Attanasio. A, Ceretti. E, Giardini. C. Analytical models for tool wear prediction during AISI 1045 turning operations. *Journal of materials processing technology*, (2013) 218-223.
27. N. Marín. Análisis termomecánico de la influencia del desgaste geométrico de las herramientas en procesos de corte ortogonal de aceros inoxidables austeníticos. Tesis doctoral, Madrid (2010).
28. J. Lorentzon, N. J. Modelling the influence of carbides on tool wear. *Computational materials science and Surface engineering*, (2009) 29-37.
29. Patil. M. N, Sarange. S. Numerical Analysis to Determine the Distribution of Tool Forces and Temperatures of Single Point Cutting Tool. *International journal of science and research*, 2014.
30. Marín et al. Análisis numérico de la influencia del desgaste de flanco en los procesos de corte ortogonal del acero inoxidable AISI 316L. España, 2009.
31. Marín et al. Efecto de la deformación del material en la dirección del filo en simulaciones numéricas 3D de procesos de corte ortogonal. España, 2010.
32. Nápoles. A, Salueña Berna Xavier. Mecanizado por arranque de viruta. *Tecnología mecánica*, 2000.
33. Muños. A. Análisis experimental y numérico de las tensiones residuales debidas al mecanizado de aceros inoxidables austeníticos. Tesis doctoral, Madrid (2008).

- 34.A. Fernández Valdivielso, A. Rodríguez Ezquerro, G. Urbicain, L.N. López de Lacalle, I. Zamakona, M. Espart. Análisis comparativo de herramientas avanzadas para el torneado de superaleaciones. XIX congreso de ingeniería mecánica.
35. 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. Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, 2007.

## ANEXO (Lista de figuras)

**Figura 1.** Esquema de la operación del proceso de torneado y condiciones en el proceso de torneado.

**Figura 1.1.** Operaciones básicas en el proceso de torneado.

**Figura 1.2.** Sección transversal del proceso de maquinado.

**Figura 1.3.** Ángulos en la herramienta de corte.

**Figura 1.4.** Representación de las fuerzas de corte que actúan en la herramienta.

**Figura 1.5.** Fuerzas que actúan en la herramienta de corte ortogonal.

**Figura 1.6.** Tipos de formación de viruta.

**Figura 1.7.** Velocidades de trabajo durante la formación de viruta.

**Figura 1.8.** Zonas de generación de calor en la formación de viruta.

**Figura 1.9.** Zonas de transferencia de calor durante la formación de viruta.

**Figura 1.10.** Distribución de los gradientes de temperatura en las zonas del proceso de maquinado (Herramienta y pieza de trabajo).

**Figura 1.11.** Porcentaje de calor que se transfiere a la herramienta, pieza de trabajo y viruta.

**Figura 1.12.** Visualización de la Conversión del modelo de corte ortogonal (b) a la operación de torneado (a).

**Figura 1.13.** Ejemplificación de recubrimientos en herramienta de corte (insertos).

**Figura 1.14.** Comportamiento de la dureza de los materiales para herramientas de corte en función de la temperatura.

**Figura 1.15.** Desgaste de la herramienta y datos indicativos.

**Figura 1.16.** Relación desgaste del labio o franja de desgaste y el tiempo de maquinado.

**Figura 1.17.** Representación de las zonas principales del desgaste en la herramienta de corte.

**Figura 1.18.** Mecanismos de desgaste.

**Figura 1.19.** Criterios de falla en herramientas de maquinado.

**Figura 1.20.** Efecto de desgaste en la cara de incidencia VB sobre las fuerzas de corte.

**Figura 1.21.** Comportamiento de la vida útil de la herramienta.

**Figura 1.22.** Curvas de vida útil de herramientas para diversos materiales.

**Figura 1.23.** Acero 8620.

**Figura 1.24.** Ejemplificación por deposición física en fase de vapor PVD.

**Figura 2.1.** Probetas de Acero 8620.

**Figura 2.2.** Dimensiones de las probetas de acero 8620 para el ensayo de Jominy.

**Figura 2.3.** Ensayo de Jominy para determinar el grado de templabilidad del material.

**Figura 2.4.** Gráfico del temple ordinario.

**Figura 2.5.** Horno industrial para tratamiento térmico KINTEL AX-2.

**Figura 2.6.** Durómetro MITUTOYO ROCKWELL.

**Figura 2.7.** Inserto de corte DNMG 15 06 08-MF 1125 y relación de medidas.

**Figura 2.8.** Calidad de recubrimiento PVD con un recubrimiento de 1-2 $\mu$ m de TiN.

**Figura 2.9.** Centro de maquinado EMCOTURN 242.

**Figura 2.10.** Número de ciclos durante los ensayos del proceso de maquinado.

**Figura 2.11.** WILD M400 Photomakroskop y Microscopio electrónico de barrido.

**Figura 3.1.** Gráfico del grado de templabilidad (Ensayo de Jominy).

**Figura 3.2.** Imagen 100X y 50X Inspección del Filo de corte de la herramienta (sin maquinar).

**Figura 3.3.** Imagen 100X Inspección del Filo de corte 1 y medición del desgaste del flanco de la herramienta.

**Figura 3.4.** Desgaste del FILO 1, Astillamiento y filo recrecido.

**Figura 3.5.** Comportamiento del desgaste del flanco en función del tiempo de corte (Filo 1).

**Figura 3.6.** Desgaste del filo 2 de la herramienta.

**Figura 3.7.** Comportamiento del desgaste del flanco (Filo 2) en función del tiempo de corte.

**Figura 3.8.** Desgaste del flanco (Filo 3) y deformación en el filo de la herramienta.

**Figura 3.9.** Gráfico del desgaste del flanco en función del tiempo de corte.

**Figura 3.10.** Gráfico del desgaste del flanco en función del tiempo de corte para las tres pruebas realizadas.

**Figura 3.11.** Gráfico Vida de la herramienta (min) en función de la velocidad de corte.

**Figura 3.12.** Gráfico comparativo entre la ecuación de Taylor y las pruebas experimentales (Vida de la herramienta (min) en función de la velocidad de corte).la velocidad de corte).