

2014

# Herramientas de corte: Determinación de vida útil en aceros de mediana y alta dureza

Proyecto de fin de carrera

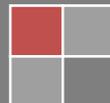
Se realizaron ensayos de laboratorio basados en norma ISO 3685 sobre probetas de acero para obtener una expresión matemática capaz de predecir la vida útil de herramientas de corte utilizadas en el mecanizado de aceros de mediana y alta dureza.

Autores: García Javier Alejandro & Torralva María Josefina

Tutores: Baranda Hernán & Di Pasquale Gustavo

02 de noviembre de 2014

Instituto Tecnológico de Buenos Aires



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	1
NOMENCLATURA .....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 RESUMEN.....	3
1.2 OBJETIVO.....	3
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	4
2.1 Norma ISO 3685 .....	4
2.2 PIEZA DE TRABAJO – PROBETA.....	4
2.2.1 METALOGRAFÍA .....	4
2.2.2 ENSAYO DE DUREZA .....	8
2.2.3 PREPARACIÓN DE PROBETA .....	9
2.3 HERRAMIENTAS .....	10
2.3.1 Insertos de corte .....	10
2.3.2 Máquina herramienta – Torno.....	10
2.3.3 Sierra de cinta sin fin en ángulo manual .....	10
2.4 FLUIDO DE CORTE.....	11
2.5 CONDICIONES DE MECANIZADO .....	11
2.5.1 Condiciones de corte .....	11
2.5.2 Velocidades de corte .....	14
2.5.3 Configuración del torno .....	14
2.5.4 Análisis del Tipo de Viruta .....	14
2.6 INSPECCIÓN DE FILOS DE INSERTOS DE CORTE Y MEDICIÓN DE DESGASTE ....	16
3. ANÁLISIS DE DATOS.....	17
3.1 Criterio de vida útil .....	17
3.2 Obtención de curvas de desgaste .....	17
3.3 Obtención de curvas de Taylor .....	19
3.4 Influencia de la dureza de la pieza de trabajo .....	22
4. CONCLUSIONES .....	32
5. REFERENCIAS.....	33
6. AGRADECIMIENTOS .....	34

ANEXOS .....	35
ANEXO A: Aceros ensayados .....	36
ANEXO B: Ensayo de Metalografía.....	37
ANEXO C: Ensayo de dureza.....	43
ANEXO D: Dimensiones de piezas a ensayar .....	46
ANEXO E: Características generales de inserto de corte CNMG 120408 PM 4325 .....	47
ANEXO F: Torno GOODWAY Modelo: GLS – 200 .....	48
ANEXO G: Sierra Sin Fin en ángulo manual DGH Delle Grazie modelo: Z3CN N°297 .....	49
ANEXO H: Configuración del torno .....	51
ANEXO I: Tipos de Viruta .....	59
ANEXO J: Mediciones de desgaste en filos de corte .....	60
ANEXO K: Datos de ensayos de mecanizado .....	63
ANEXO L: Interpolado de superficies con MATLAB R2014a .....	64

## NOMENCLATURA

<b>f</b>	Avance (mm/rev)
<b>a<sub>p</sub></b>	Profundidad de corte (mm)
<b>r<sub>ε</sub></b>	Radio de esquina (mm)
<b>VB<sub>B</sub></b>	Desgaste de flanco (mm)
<b>t</b>	Tiempo de corte (s)
<b>T<sub>c</sub></b>	Vida útil (s)
<b>v<sub>c</sub></b>	Velocidad de corte (m/min)
<b>k</b>	Primera constante experimental de Taylor
<b>C</b>	Segunda constante experimental de Taylor
<b>HRC</b>	Dureza Rockwell C
<b>w</b>	Peso asignado a datos para interpolación
<b>p<sub>ij</sub></b>	Coefficientes del polinomio interpolado

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 RESUMEN

Se realizaron ensayos de laboratorio basados en norma ISO 3685 sobre probetas de acero para obtener una expresión matemática capaz de predecir la vida útil de herramientas de corte utilizadas en el mecanizado de aceros de mediana y alta dureza.

### 1.2 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue obtener una expresión matemática que permita predecir la vida útil de una herramienta de torneado en función de la velocidad de corte utilizada y de la dureza del material de trabajo en el mecanizado de aceros propietarios de la empresa Tenaris-Siderca clasificados bajo la norma API Spec 5CT<sup>[1]</sup>. Se buscó de esta manera optimizar el proceso de mecanizado de tubos de acero al reducir el impacto que tiene el tiempo de inactividad (*downtime*) producto del recambio de insertos de corte sobre el proceso de fabricación de tubos sin costura.

Como valor adicional al proyecto surge la posibilidad de poder implementar y replicar la metodología de trabajo a otras empresas del grupo con necesidades semejantes, estandarizar un proceso que se pueda trasladar y aplicar de manera sencilla, para generar valor agregado en las distintas plantas donde se fabriquen productos de similares características.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 2.1 Norma ISO 3685

Los procedimientos empleados tanto para el ensayo de vida útil del herramental de corte como para el análisis de los datos obtenidos se han basado en la norma *ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools*<sup>[2]</sup>.

De dicha norma se tomaron lineamientos en cuanto a los pasos a seguir para los siguientes procedimientos:

- Tipificación de los aceros a ensayar.
- Selección de parámetros de mecanizado para ensayo.
- Recopilación y análisis de datos de ensayo.

### 2.2 PIEZA DE TRABAJO – PROBETA

Se recibieron de parte de la empresa Tenaris 5 tubos de aproximadamente 500mm de largo con diámetros exteriores entre 102mm y 130mm, y espesores entre 16mm y 20mm por cada uno de los aceros a ensayar: TN80SS; TN803CR; P110; Q125 [*Anexo A*]. Para cada material se realizaron ensayos metalográficos [*Anexo B*] y de dureza [*Anexo C*]. Antes de realizar el ensayo de mecanizado propiamente dicho se debió preparar la probeta de modo de estandarizar las condiciones de trabajo.

#### 2.2.1 METALOGRAFÍA

La correcta preparación de probetas metalográficas para determinar su contenido y microestructura requirió que se sigan estrictamente los pasos secuenciales consistentes en *seccionamiento, desbaste abrasivo grueso y fino, pulido especular, ataque químico y examen microscópico* [*Anexo B*]. Las probetas debieron mantenerse limpias durante todo el proceso. Los materiales a evaluar fueron los siguientes: P110, Q125, TN80SS y TN803CR [*Anexo A*].

Para los materiales P110 [*Figura 1 y 2*] y Q125 [*Figura 3 y 4*] se observó una estructura metalográfica similar: Una estructura acicular con un sistema cristalino tetragonal de cuerpo centrado correspondiente a la martensita revenida. En ambas probetas se pudo observar el efecto del revenido sobre la estructura martensítica metaestable, que evolucionó por precipitado desde la solución sobresaturada de carbono en hierro alfa (martensita alfa ó martensita de temple) a una

composición bifásica de martensita beta ó martensita de revenido formada por una solución sólida aun sobresaturada de carbono en hierro alfa y finos glóbulos de cementita  $Fe_3C$ . En la martensita revenida se mantiene en solución sólida entre 0,15 y 0,35% de carbono, dependiendo este porcentaje del parámetro de revenido de Hollomon-Jaffe. La finalidad de retener más carbono es impedir el movimiento de planos dislocados frente a la acción de alguna carga externa lo que se traduce, de manera macroscópica, en un incremento de la dureza y de la resistencia a la tracción.

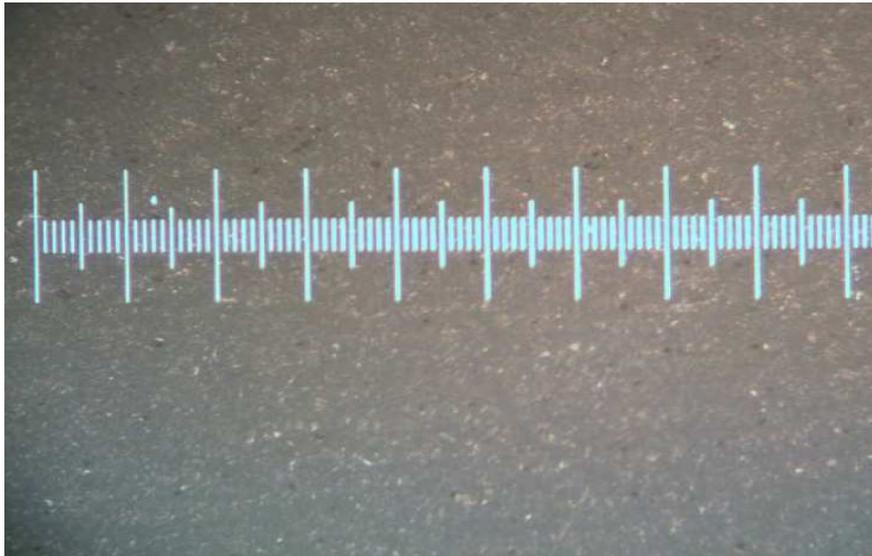


Figura 1: Metalografía del material P110; 100X

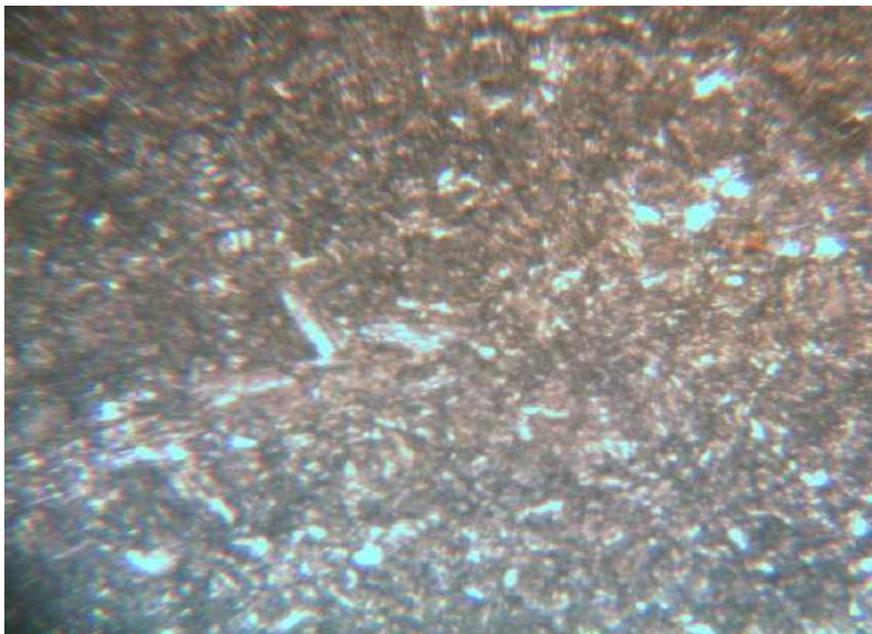


Figura 2: Metalografía del material P110; 400X

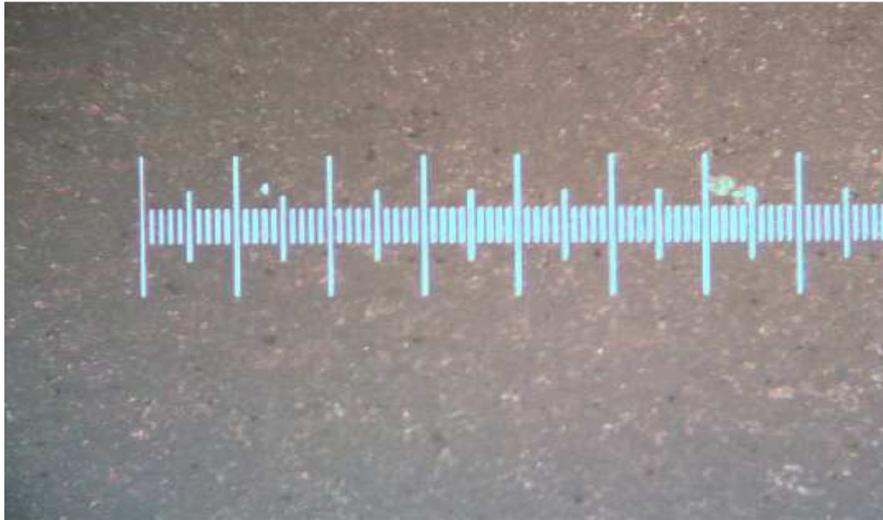


Figura 3: Metalografía del material Q125; 100X



Figura 4: Metalografía del material Q125; 400X

En el material TN80SS [Figura 5 y 6] se pudo observar una estructura metalográfica similar a las anteriores correspondiente a la martensita revenida. También se observó el efecto del revenido sobre la estructura martensítica metaestable, que evolucionó por precipitado desde la solución sobresaturada de carbono en hierro alfa (martensita alfa ó martensita de temple) a una composición bifásica de martensita beta ó martensita de revenido formada por una solución sólida aun sobresaturada de carbono en hierro alfa y finos glóbulos de cementita  $Fe_3C$ . Al haberse mantenido un menor porcentaje de carbono en la solución sólida de martensita revenida se obtiene una menor dureza en el material, ya que frente a una carga externa, los planos dislocados no son impedidos con la misma magnitud. Esto explica a la diferencia de durezas que se obtuvo de entre este material y los materiales P110 y Q125.

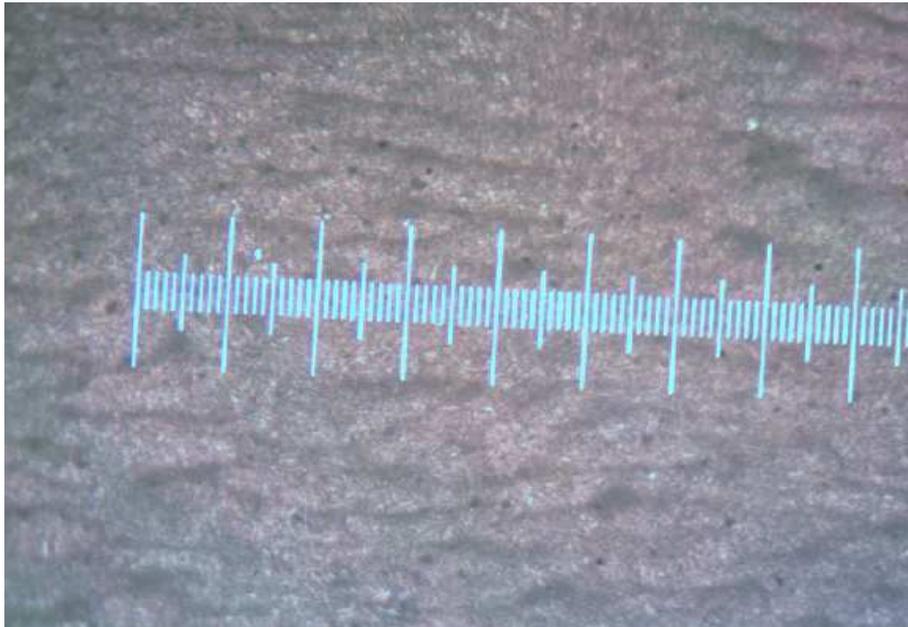


Figura 5: Metalografía del material TN80SS; 100X

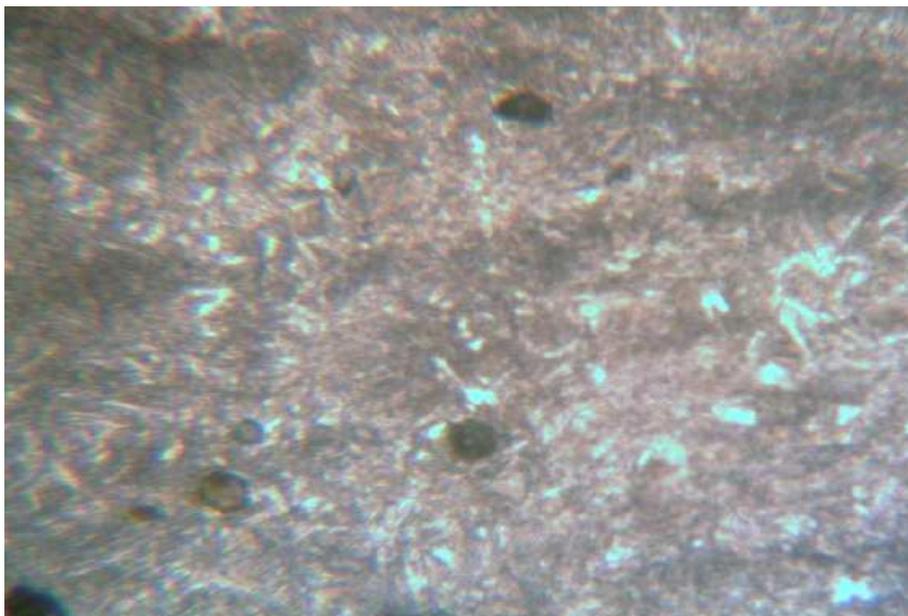


Figura 6: Metalografía del material TN80SS; 400X

Para el material TN803CR [Figura 7 y 8] no se pudo observar una estructura metalográfica ya que la composición química del acero (12 a 14%Cr y hasta 0,22%C) corresponde a un inoxidable martensítico para el cual no es adecuado el ataque metalográfico con Nital. Se debió haber utilizado agua regia acética, primero, para remover la pátina de óxido de cromo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; luego, para poner de manifiesto la estructura. Por lo tanto los resultados obtenidos son inconclusos en dicha metalografía.

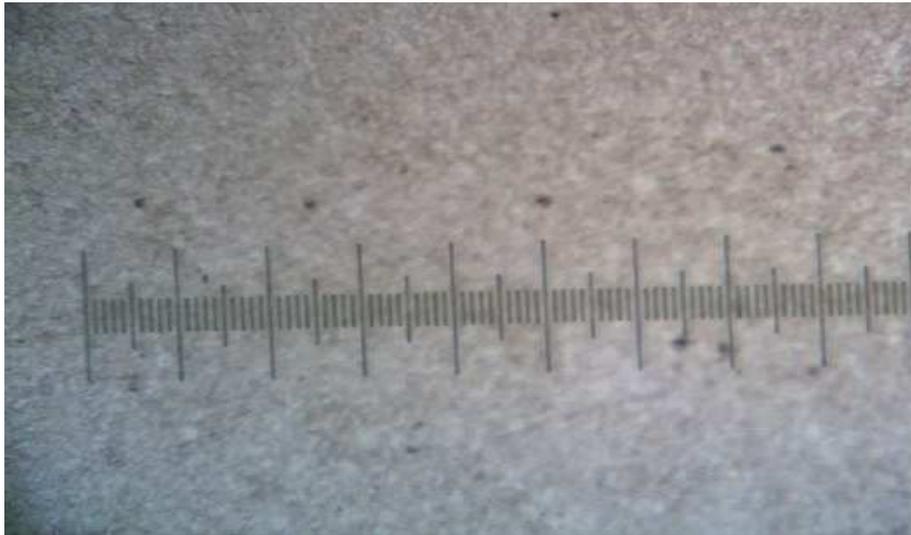


Figura 7: Metalografía del material TN803CR; 100X



Figura 8: Metalografía del material TN803CR; 400X

### 2.2.2 ENSAYO DE DUREZA

El objetivo es determinar la dureza de los metales mediante la medición de la resistencia que oponen a ser penetrados por otro objeto utilizando un durómetro según el método Rockwell. Se utilizó un durómetro digital modelo F-26, que funciona con el principio básico de palanca y pesas, donde las cargas son seleccionadas manualmente y tienen su aplicación regulada a través de un amortiguador hidráulico [Anexo C].

Se realizaron 4 ensayos sobre cada probeta de modo de obtener un valor promedio de dureza [Tabla 1], cuidando que la distancia entre los puntos sea lo suficientemente amplia para que el resultado fuera representativo [Figura 9].

Material	Dureza HRC	Dureza HRC Promedio
<b>TN 80 SS</b>	23.3; 22; 22.6; 23.7	22.90
<b>TN 803CR</b>	20.3; 18.4; 21.8; 19.6	20.00
<b>P110</b>	41; 36; 38.5; 33.8	37.32
<b>Q125</b>	42; 39.5; 38; 40.2	39.93

Tabla 1: Resultado del ensayo de dureza Rockwell para cada material

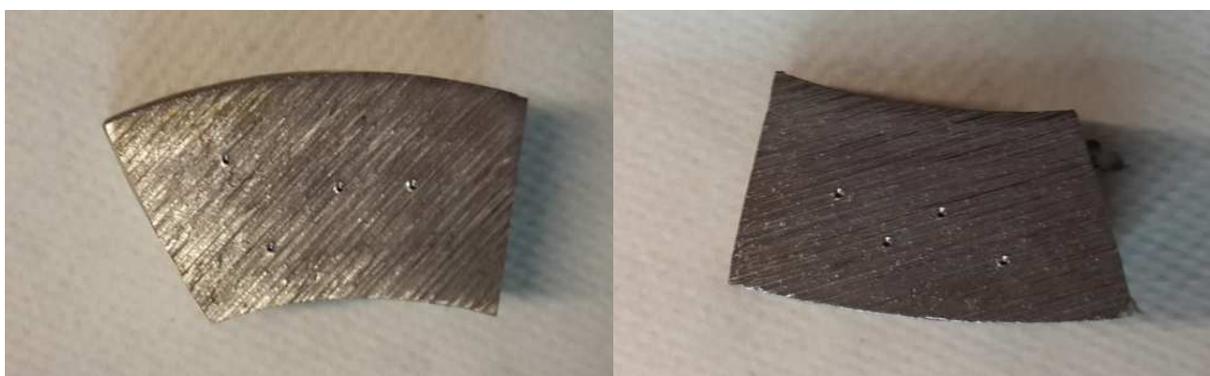


Figura 9: Fotografías de las probetas ensayadas

### 2.2.3 PREPARACIÓN DE PROBETA

De acuerdo con la norma ISO 3685 (<sup>[2]</sup>4.2 *Standard conditions for the workpiece*) se cortaron las probetas de modo que las nuevas piezas no presentaran una relación longitud-diámetro mayor a 10 con el fin de reducir las vibraciones durante el mecanizado. A su vez, se cortaron los extremos de las piezas que al ser entregadas presentaran rebaba o escoria por corte con oxiacetileno. Los nuevos extremos de cada probeta se frentearon de modo de facilitar su sujeción al plato del torno y a la contrapunta.

Para estandarizar las condiciones de trabajo entre los distintos ensayos se procedió a remover las cascarillas de forjado, así como la superficie transitoria formada plásticamente en el corte y cualquier otra superficie endurecida por el trabajo de modo de reducir las deformaciones sub-superficiales al mínimo. Esto no incluye la remoción de la superficie normalmente endurecida en pasadas anteriores de la herramienta durante el ensayo. Para ello se le realizó a cada probeta una operación de cilindrado con profundidad de corte de 0.5mm [Anexo D].

## 2.3 HERRAMIENTAS

### 2.3.1 Insertos de corte

Se utilizaron insertos de corte CNMG 120408 PM 4325<sup>[4]</sup> de la línea T-Max P de Sandvik-Coromant. Estos insertos negativos presentan un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  lo cual posibilita su utilización de ambos lados [Figura 10 y 11]. Son utilizados por Tenaris en el torneado exterior de sus productos debido a su adaptabilidad a condiciones de corte pesadas [Anexo E].

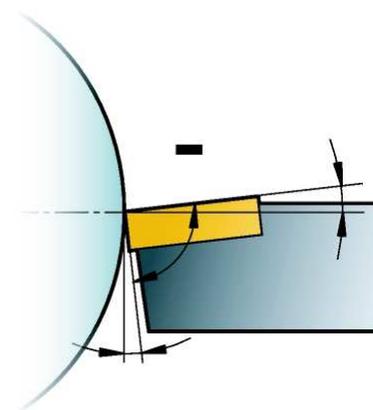


Figura 10: Plaquita negativa

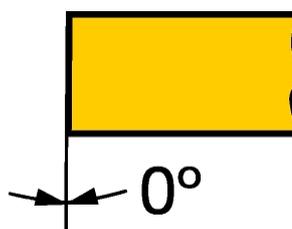


Figura 11: Ángulo de incidencia correspondiente a una placa inserto negativa

### 2.3.2 Máquina herramienta – Torno

Las pruebas de mecanizado fueron realizados en un centro de torneado CNC, Marca: GOODWAY Modelo: GLS – 200, de velocidad máxima de husillo 6000 rpm. Se realizaron sucesivos torneados externos a la pieza de trabajo fijando las condiciones de corte establecidas, por medio de un programa de control numérico FANUC Oi-Mate [Anexo F].

### 2.3.3 Sierra de cinta sin fin en ángulo manual

Se utilizó una Sierra Sin Fin en ángulo manual Marca: DGH Delle Grazie S.R.L; Modelo: Z3CN N° 297 tanto para sacar muestras a ser utilizadas en los ensayos de dureza y metalográficos como para realizar una preparación preliminar de los tubos antes de ser torneados, dejándolos con un largo inferior a los 300mm de modo de evitar vibraciones en el torneado a altas velocidades [Anexo G].

## 2.4 FLUIDO DE CORTE

De acuerdo a indicaciones del proveedor de insertos de corte, Sandvik-Coromant, no fue necesario el uso de refrigerante para los ensayos de mecanizado. Esto se debe a que el calor del proceso de mecanizado se lo lleva la viruta, mientras que el uso de refrigerante puede causar variaciones súbitas de temperatura en el filo de la herramienta, con la consiguiente fragilización de la misma.

## 2.5 CONDICIONES DE MECANIZADO

### 2.5.1 Condiciones de corte

Siendo que el avance ( $f$ ), la profundidad de corte ( $a_p$ ) o el radio de esquina  $r_\epsilon$  no fueron variables de ensayo se intentó utilizar condiciones de corte recomendadas por la norma ISO 3685 de modo de mantener válida la comparabilidad de este trabajo con otros [Tabla 2].

Condición de corte	A	B	C	D
Avance $f$ [mm/rev]	0.10	0.25	0.40	0.63
Profundidad de corte $a_p$ [mm]	1.00	2.50	2.50	2.50
Radio de esquina $r_\epsilon$ [mm]	0.40	0.80	0.80	1.20

Tabla 2: Condiciones de corte estándar según ISO 3685

Al tener los insertos de corte utilizados un radio de esquina de 0.8 mm la profundidad de corte se debería fijar en 2.5mm. Esta profundidad resultó en una formación de viruta gruesa y continua [Figura 12] que al no ser fácilmente removida retiene el calor generado por el proceso de mecanizado, aumenta las fuerzas de corte y resulta en una rotura prematura del inserto de corte de un modo que no se cubrirá en el alcance de este trabajo [Figura 13].



Figura 12: Viruta continua producto de profundidad de corte excesiva



Figura 13: Rotura prematura de inserto de corte

Se siguieron entonces las recomendaciones de la norma para cuando las condiciones estandarizadas no pueden ser cumplidas que se presentan en la *Tabla 3 y Figura 14*. Se eligió un avance de herramienta de 0.3 mm/rev y profundidad de corte de 1.5 mm para el radio de esquina de 0.8 mm disponible.

<b>Máxima profundidad de corte</b>	2 x Radio de esquina
<b>Máxima profundidad de corte</b>	10 x Avance
<b>Máximo avance</b>	0.8 x Radio de esquina

Tabla 3: Límites de condiciones de corte no estandarizadas (Ver Fig. 14)

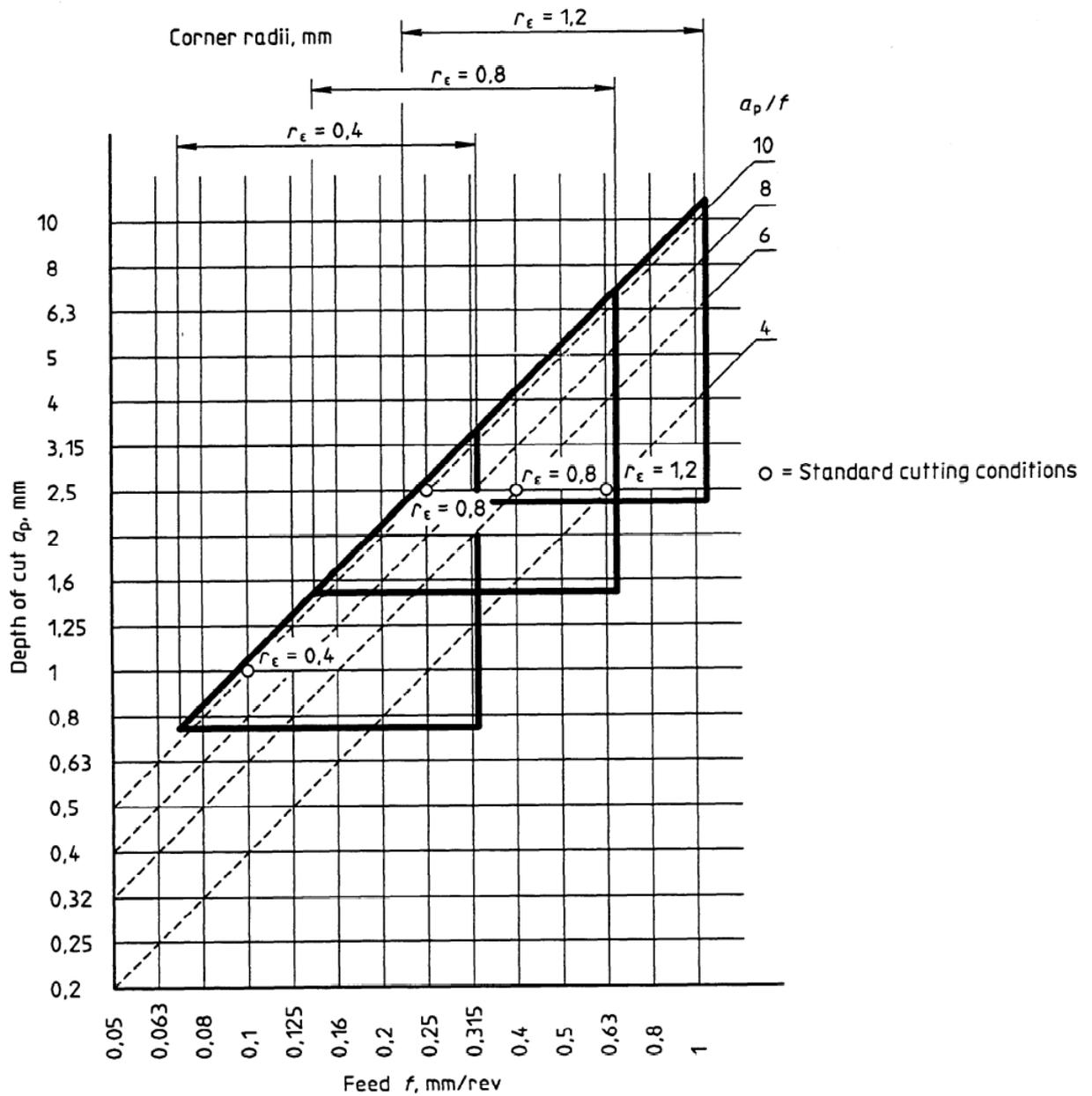


Figura 14: Límites de condiciones de corte según norma ISO 3685

## 2.5.2 Velocidades de corte

Las velocidades de corte ensayadas fueron configuradas en el CNC del torno de modo de mantenerse constante sobre la superficie de trabajo, es decir, no sobre el diámetro resultante del mecanizado. Se tuvo cuidado de revisar la velocidad de corte luego de que la herramienta haya entrado en contacto con la pieza de modo de tener en cuenta una posible pérdida de velocidad debido al mecanizado.

Al menos tres velocidades de corte se eligieron para cada material de modo que la vida útil de la herramienta en la máxima velocidad no fuera inferior a 2 minutos, teniendo en cuenta la necesidad de realizar ensayos a altas velocidades para optimizar el uso del material disponible. Para obtener puntos adecuadamente separados en la curva velocidad de corte – vida útil, se trabajó eligiendo velocidades sucesivas que mantuvieran una razón que resultara en aproximadamente el doble de la vida útil.

## 2.5.3 Configuración del torno

La programación del centro de torneado permitió gobernar todas las variables del torno CNC logrando mecanizar bajo las condiciones deseadas. Esto se llevó a cabo mediante la ejecución de programas diseñados a partir de códigos en el Control Numérico FANUC Oi-Mate [*Anexo H*].

## 2.5.4 Análisis del Tipo de Viruta

Las formas de virutas generadas durante los ensayos correspondieron a los tipos **4.1** (helicoidal larga), y la **4.2** (helicoidal corto) según el *Anexo I (Figura 47: “Annex G: Chip Characteristics, Table G.1- Chip forms”*, de la Norma ISO 3685:1993(E)).

La forma **6.2** (viruta en arco corto) se presentó en los primeros segundos de mecanizado de los tubos para todas las velocidades de corte. La viruta tipo **1.3** (viruta en forma de listón enredado) comenzó a presentarse cuando el rompeviruta del inserto se veía modificado de su forma original hacia el fin de la vida útil de la herramienta. Esto se usó de referencia para decidir si detener el ensayo, aunque el torno hubiera sido programado para una mayor cantidad de pasadas. Dicho análisis permitió determinar tiempos máximos de ensayo independientemente de lo predicho a priori sobre la vida útil de la herramienta [*Figura 15, 16 y 17*].



Figura 15: Tipos de Viruta obtenida para Q125 a  $V=230$  m/min: (a) para  $T = 1$  min (b) para  $T = 3$  min (c) para  $T = 7$  min



Figura 16: Tipo de viruta obtenido para el material TN803CR a  $v = 450$  m/min



Figura 17: Tipo de viruta obtenido para el material Q1225 a  $v = 250$  m/min

## 2.6 INSPECCIÓN DE FILOS DE INSERTOS DE CORTE Y MEDICIÓN DE DESGASTE

Una vez realizado el torneado de las probetas se procede a la medición del desgaste de los filos de corte mediante inspección visual con un perfilómetro Nikon V-12A [Figura 18] en su máximo aumento disponible de x10.



Figura 18: Perfilómetro de proyección Nikon V12-A

Se compararon las imágenes de los insertos de corte desgastados con una plantilla translúcida (impresa en papel vegetal de modo de no ser tan sensible a los cambios de temperatura como un poliéster) que se ajustara a la forma original del inserto de modo de poder medir los desgastes según la diferencia entre perfiles.

La plantilla utilizada cuenta con una cuadrícula de 1mm de espaciado, en el mismo ángulo que el inserto. Al aumentar la imagen original 10 veces se logra sobre la plantilla un poder de resolución para las mediciones de 0,1mm

Se utiliza entonces la cuadrícula para tomar nota del desgaste de cada filo y de notarse que algún filo no está tan desgastado como lo requerido para realizar el análisis que sigue, se lo marca para volver a utilizarlo en el torneado a las mismas condiciones de corte con el cual se lo utilizó inicialmente [Anexo JJ].

### 3. ANÁLISIS DE DATOS

#### 3.1 Criterio de vida útil

Para aumentar la confiabilidad y comparabilidad de los resultados del ensayo, es esencial que la vida útil se defina como el tiempo total de corte que tome alcanzar un dado valor de criterio de vida útil. Al ser el desgaste de flanco el tipo de desgaste que más contribuyó al fin de la vida útil (no se presentaron indicios de craterización), se lo usó como guía para seleccionar un criterio de vida útil correspondiente a un desgaste de flanco de **0,1mm**.

Cabe destacar que los resultados experimentales obtenidos muestran que el criterio de vida útil sugerido por la norma ISO 3685 (entre 0,3mm y 0,6mm) es excesivo ya que los insertos se rompen antes debido a las vibraciones causadas por el desgaste del recubrimiento. Esto se verifica en literatura publicada similar a este trabajo donde no se usa un criterio de falla mayor de **0,1mm**<sup>[9]</sup>.

#### 3.2 Obtención de curvas de desgaste

Los datos obtenidos se arreglaron en una tabla [*Anexo K*] relacionando para cada ensayo los materiales, la velocidad de corte, el tiempo de corte y desgaste de flanco y se procedió a graficar el desgaste de flanco en función del tiempo de corte de modo de obtener curvas similares a las indicadas en la siguiente figura [*Figura 19*]:

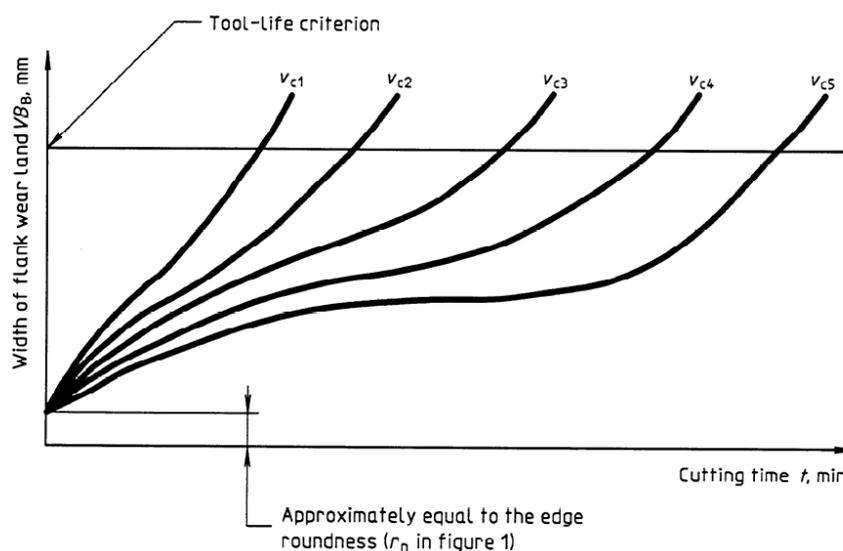


Figura 19: Desgaste de flanco en función del tiempo según norma ISO 3685; Escalas lineares

En el gráfico se pueden notar para cada curva 3 zonas distintas, correspondientes al desgaste inicial (zona cóncava hacia abajo), desgaste del recubrimiento (zona del punto de inflexión) y desgaste final (zona cóncava hacia arriba).

El desgaste en la primera zona se debe a la abrasión de los cristales del recubrimiento alineados en la dirección de mayor arrastre. La acción de corte se estabiliza en la segunda zona donde el filo de la herramienta se mantiene afilado con el desgaste constante del recubrimiento, presentándose un punto de inflexión en la curva. Al desgastarse el recubrimiento se llega a la zona de la curva con concavidad positiva donde el carburo trabaja como filo de corte, elevando su temperatura, y por lo tanto desgastándose más rápidamente.

Teniendo en cuenta la forma que toman las curvas, se interpolaron los datos según un polinomio cúbico para obtener el valor del tiempo que correspondiera a un desgaste de flanco de 0,1mm (el criterio de vida útil) que será el tiempo de vida útil  $[T_c]$ . Finalmente se procedió a graficar todos los datos de modo de verificar que se ajusten al modelo propuesto [Figuras 20, 21, 22 y 23]:

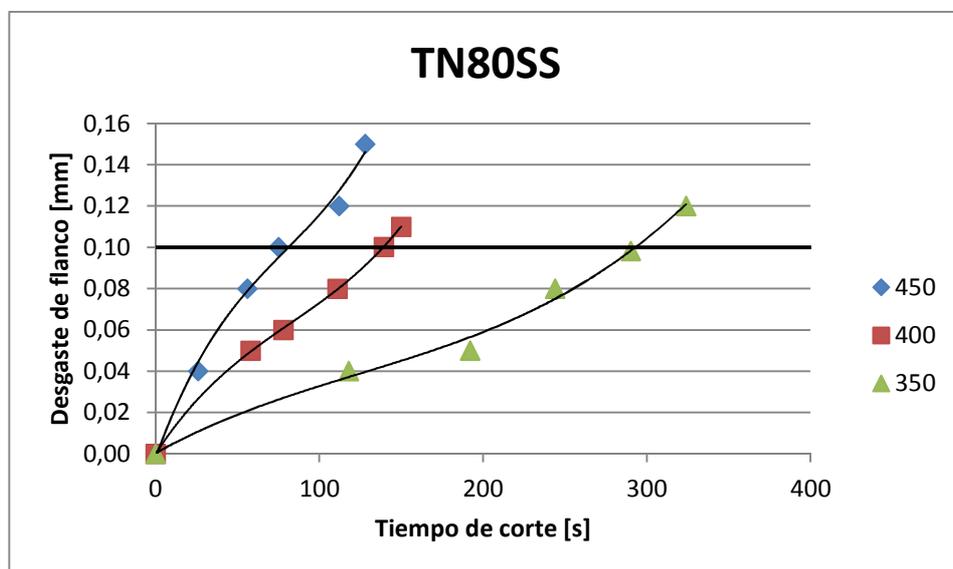


Figura 20: Curvas de desgaste para el material TN80SS

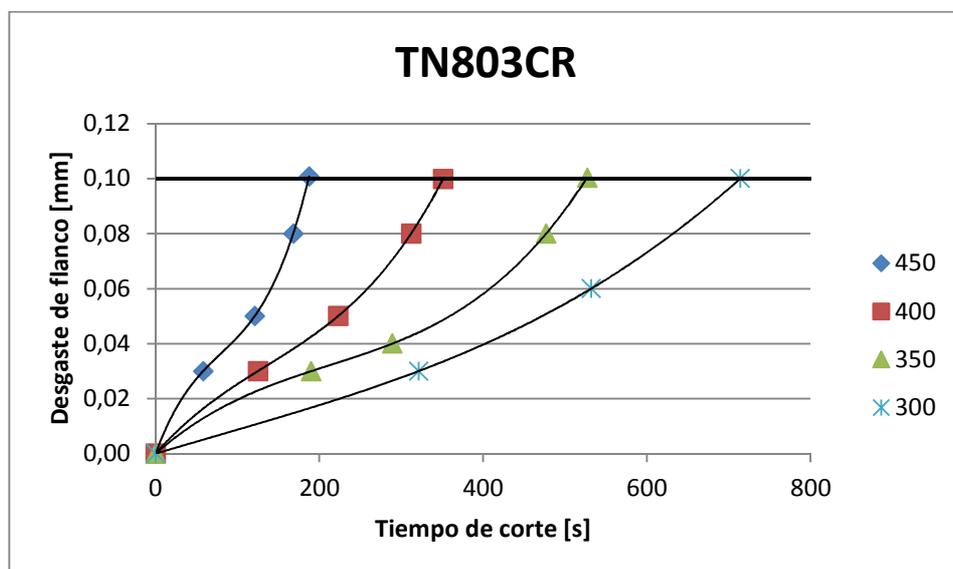


Figura 21: Curvas de desgaste para el material TN803CR

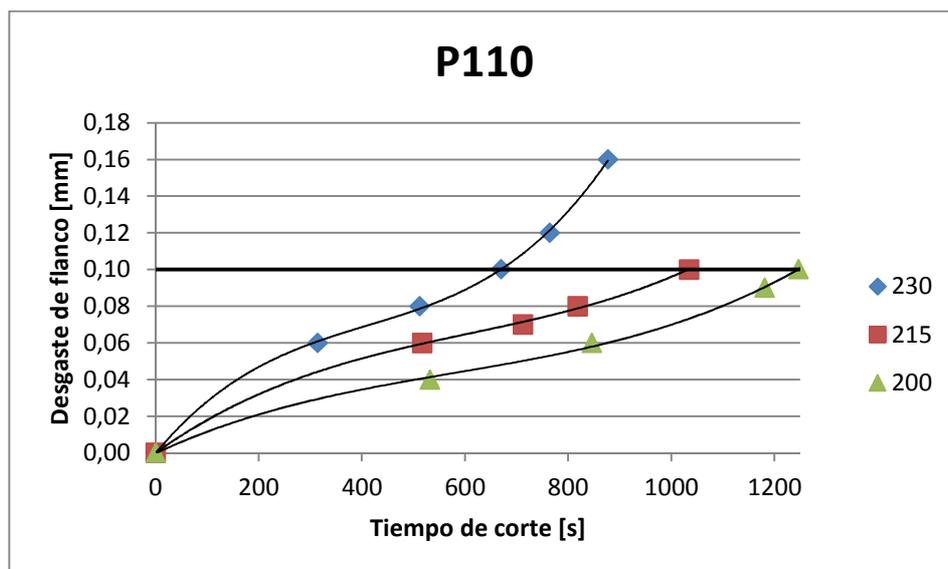


Figura 22: Curvas de desgaste para el material P110

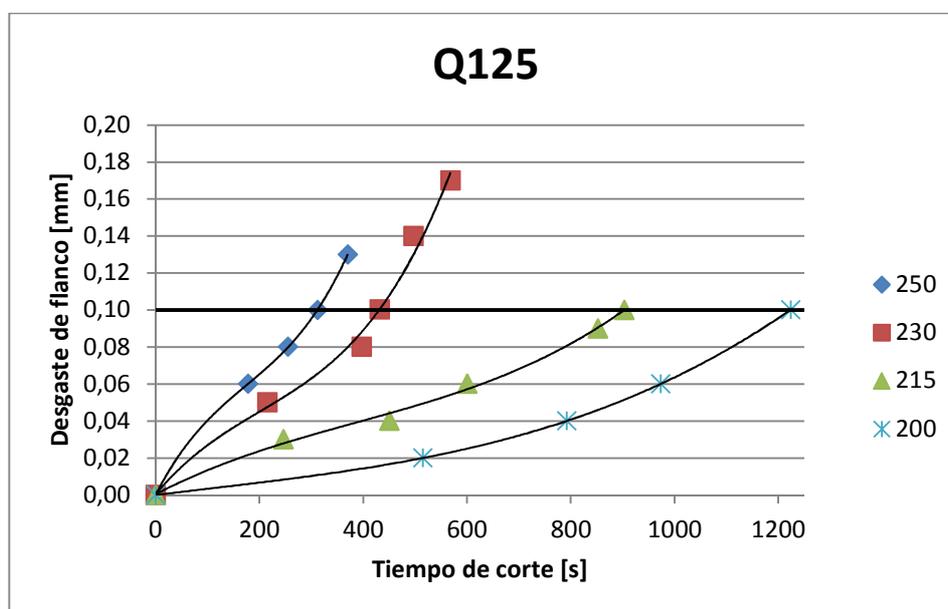


Figura 23: Curvas de desgaste para el material Q125

### 3.3 Obtención de curvas de Taylor

La ecuación de Taylor <sup>[5]</sup> para la expectativa de vida de una herramienta relaciona (en su forma reducida) la velocidad de corte con la vida útil de la herramienta. Toma la siguiente forma:

$$v_c * T_c^{-1/k} = C$$

Donde  $v_c$  es la velocidad de corte;  $T_c$  la vida útil de la herramienta;  $k$  y  $C$  constantes a ser determinadas experimentalmente que dependen del material de trabajo. En particular,  $k$  a su vez representa la pendiente de la curva en escalas logarítmicas.

Una forma más general de la ecuación de Taylor se da en la norma ANSI/ASME B94.55M<sup>[6]</sup> que toma la siguiente forma:

$$v_c * T_c^{-1/k} + D^x * S^y = C$$

Donde **D** y **S** representan la profundidad de corte y el avance de la herramienta respectivamente. Siendo que en los ensayos realizados estos parámetros se han mantenido constantes, se puede considerar que el valor de la constante **C** representa las condiciones de corte utilizadas durante los ensayos de mecanizado dados en la sección 2.5.3 *Configuración del torno*.

Se graficaron los datos del *Anexo K* correspondientes a ensayos realizados hasta alcanzar la vida útil de la herramienta y se obtuvieron las siguientes curvas de Taylor para cada material ensayado [Figura 24]:

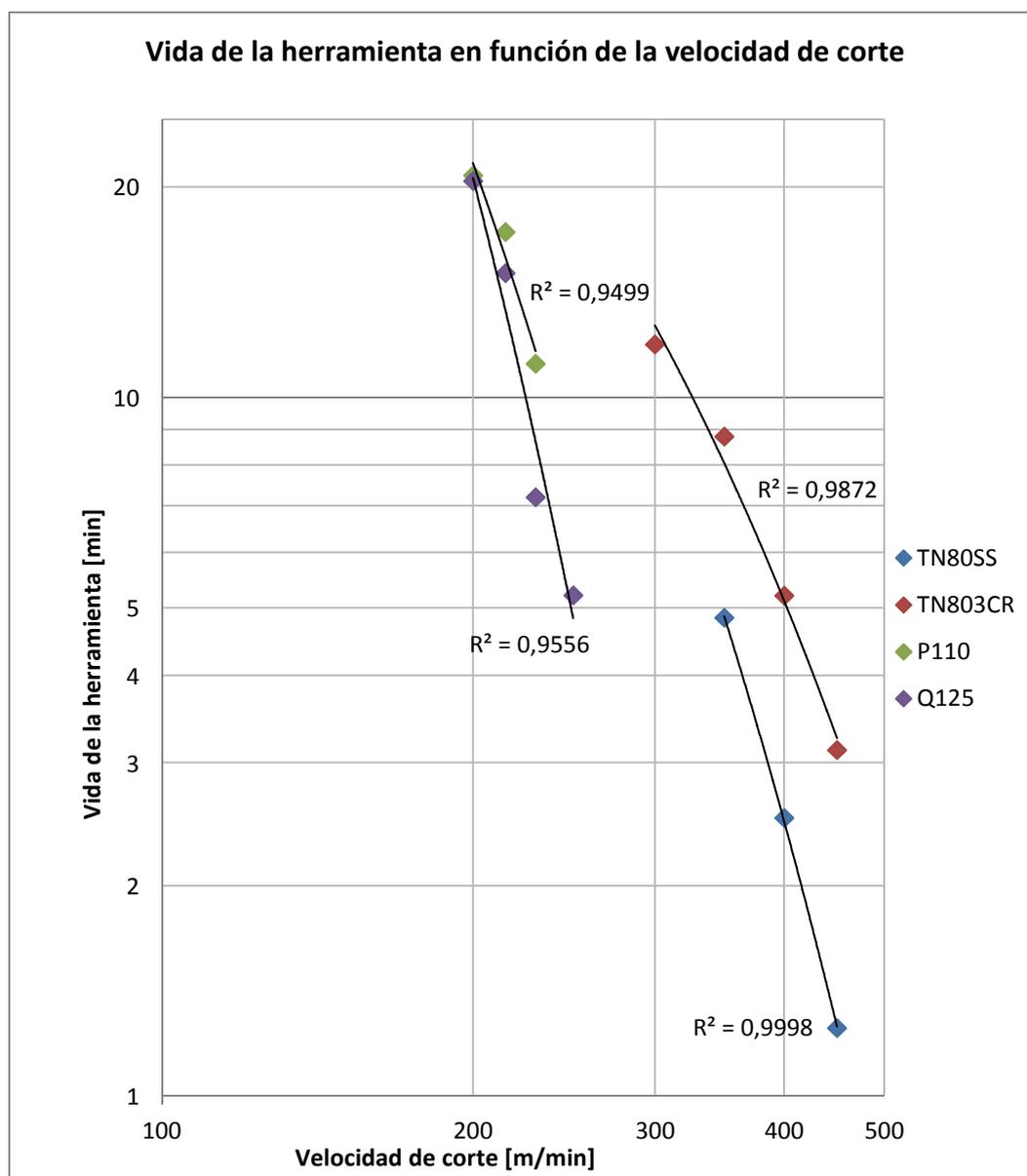


Figura 24: Curvas de Taylor para cada material ensayado

Con un criterio de vida útil (desgaste de flanco de 0,1mm) se pueden tomar de la tabla 5 los datos de velocidad de corte [ $v_c$ ] y tiempo de corte [ $T_c$ ] de modo de poder obtener los valores de las constantes  $C$  y  $k$  presentes en la ecuación de Taylor.

Para un dado material, se puede obtener  $k$  según:

$$k = \frac{\log(T_2) - \log(T_1)}{\log(V_2) - \log(V_1)}$$

Donde los subíndices 1 y 2 representan los puntos que cumplen el criterio de falla para un dado material a los cuales les corresponden las velocidades más lejanas entre sí de modo de obtener una pendiente que represente el mayor rango posible de datos.

Luego se obtiene  $C$  resolviendo la ecuación de Taylor para cada punto de falla disponible y se toma para cada material un valor promedio, calculando también la desviación porcentual que le corresponde a esta aproximación. Los datos se presentan en la **Tabla 4**:

Material	$v_c$ [m/min]	$T_c$ [min]	$k$	$C$	$\bar{c}$	Desviación	Desviación %
TN80SS	450	1,25	-5,38	469,05	470,78	2,99	0,64%
	400	2,50		474,23			
	350	4,83		469,05			
TN803CR	450	3,12	-3,30	635,67	651,80	19,87	3,05%
	400	5,20		659,41			
	350	8,79		676,43			
	300	11,90		635,67			
P110	230	11,16	-4,44	395,82	399,87	7,01	1,75%
	215	17,23		407,96			
	200	20,78		395,82			
Q125	250	5,20	-6,12	327,28	326,69	7,11	2,18%
	230	7,19		317,42			
	215	15,05		334,76			
	200	20,40		327,28			

Tabla 4: Datos de desgaste hasta término de vida útil

Con estos valores de  $k$  y  $C$  se puede armar un modelo que prediga la vida útil de una herramienta trabajando a una dada velocidad para cada uno de los materiales de trabajo ensayados [Tabla 5].

Material de trabajo	Expresión para vida de la herramienta
TN80SS	$T_c = \left(\frac{V_c}{470,8}\right)^{-5,38}$
TN803CR	$T_c = \left(\frac{V_c}{651,8}\right)^{-3,30}$
P110	$T_c = \left(\frac{V_c}{399,9}\right)^{-4,44}$
Q125	$T_c = \left(\frac{V_c}{326,7}\right)^{-6,12}$

Tabla 5: Resumen de resultados; Expresiones para la vida de la herramienta para los distintos materiales de trabajo

### 3.4 Influencia de la dureza de la pieza de trabajo

Para analizar la influencia que tiene sobre la vida útil de la herramienta la dureza del material sobre el cual trabaja se graficaron los datos presentados en la **Tabla 4** incluyendo en un tercer eje a la dureza correspondiente a cada material [**Figura 25**].

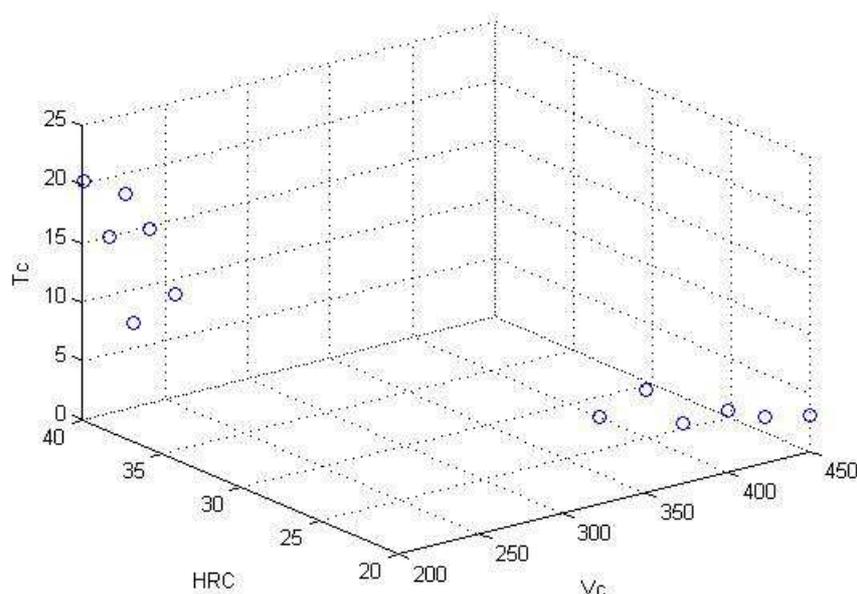


Figura 25: Vida útil en función de la velocidad de corte y dureza

Dichos puntos se unieron mediante una interpolación cúbica basada en una red de triángulos irregulares [7] para obtenerse la siguiente superficie que debería comenzar a mostrar la relación entre las magnitudes a analizar [**Figura 26**]. El objetivo fue entonces obtener una superficie similar, válida en un rango de datos más amplio, cuya ecuación pueda ser utilizada como fórmula para predecir la vida útil de la herramienta ( $T_c$ ) en función de las otras dos variables, velocidad de corte ( $V_c$ ) y dureza ( $HRC$ ).

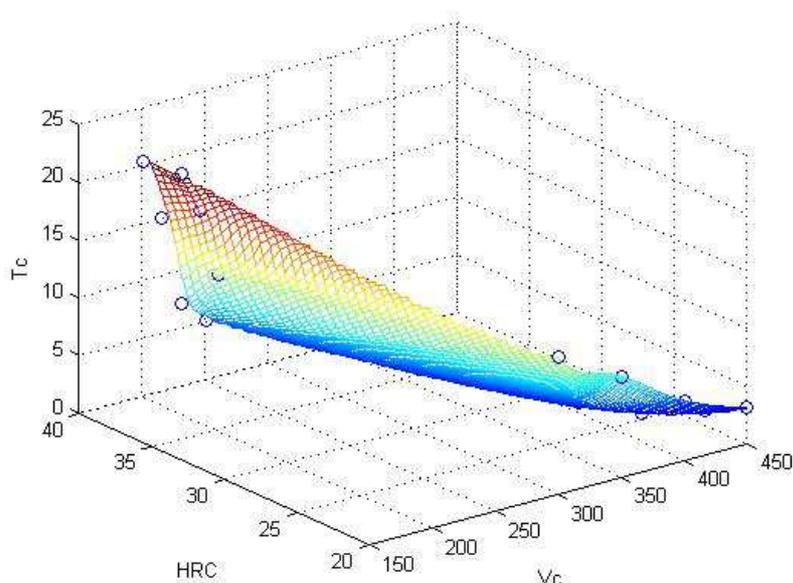


Figura 26: Primera interpolación de datos

Debido a su facilidad de análisis, se propusieron polinomios de distintos grados que se aproximarán a los datos obtenidos. Se intentó entonces minimizar la suma de cuadrados de las diferencias en las ordenadas entre los puntos generados por la función elegida y los correspondientes valores en los datos, lo cual se conoce como *método de cuadrados mínimos*.

En las siguientes tablas [Tabla 6 y 7] se presentan las superficies polinómicas que mejor se ajustaron a los datos disponibles. Los coeficientes designados como “ $p_{ij}$ ” corresponden a los términos del polinomio que define la superficie, siendo los subíndices  $i$  y  $j$  indicadores del grado de las variables  $x$  o  $y$  que acompañan a dicho término.

Variable	Magnitud representada
<b>x</b>	Velocidad de corte <b>Vc</b> [m/min]
<b>y</b>	Dureza de pieza de trabajo <b>HRC</b> [Escala Rockwell C]
<b>z</b>	Vida útil de la herramienta <b>T<sub>c</sub></b> [min]
<b>w</b>	Peso asignado a los valores a interpolar

Tabla 6: Nomenclatura utilizada para análisis de superficies

Polinomio	Grado (x)	Grado (y)	Desvío Estándar ( $\sigma$ )	Superficie resultante
$z(x,y) = p_{00} + p_{10} * x + p_{01} * y + p_{20} * x^2 + p_{11} * x * y + p_{02} * y^2$	2	2	$\sigma = 1.5238$	
$z(x,y) = p_{00} + p_{10} * x + p_{01} * y + p_{20} * x^2 + p_{11} * x * y + p_{02} * y^2 + p_{30} * x^3 + p_{21} * x^2 * y + p_{12} * x * y^2$	3	2	$\sigma = 1.3451$	
$z(x,y) = p_{00} + p_{10} * x + p_{01} * y + p_{20} * x^2 + p_{11} * x * y + p_{02} * y^2 + p_{21} * x^2 * y + p_{12} * x * y^2 + p_{03} * y^3$	2	3	$\sigma = 1.3453$	

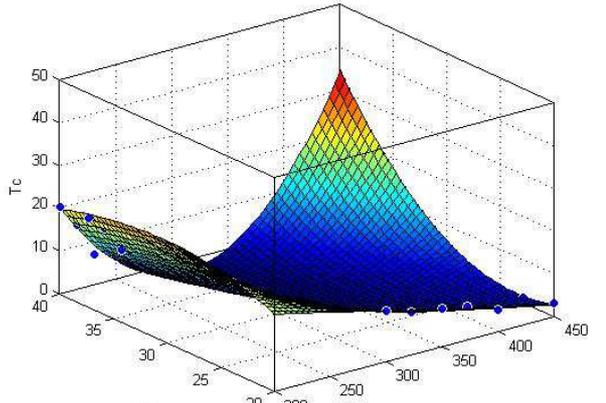
$z(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3$	3	3	$\sigma = 1.5035$	
--	---	---	-------------------	--

Tabla 7: Ajustes de superficies polinómicas de distintos grados; Polinomios de grado más alto causan inestabilidad en la solución y no se los ha considerado como alternativas viables.

Se decidió no trabajar con la primera solución presentada al distanciarse demasiado de las otras superficies obtenidas. La similitud entre las restantes soluciones llevó a utilizar aquella con la menor desviación estándar, correspondiente a un polinomio cúbico de la forma

$$z(x,y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2$$

Aun así, la dispersión de los datos disponibles no conduce a un buen ajuste ya que se sabe que la vida útil de la herramienta debe ser monótonamente decreciente tanto con la velocidad de corte como con la dureza. Se utilizan entonces las curvas de Taylor obtenidas en el punto anterior [3.3 Obtención de curvas de Taylor – Tabla 5] para extrapolar datos de modo de obtener un rango de datos mejor distribuido sobre el cual interpolar las superficies [Figura 27].

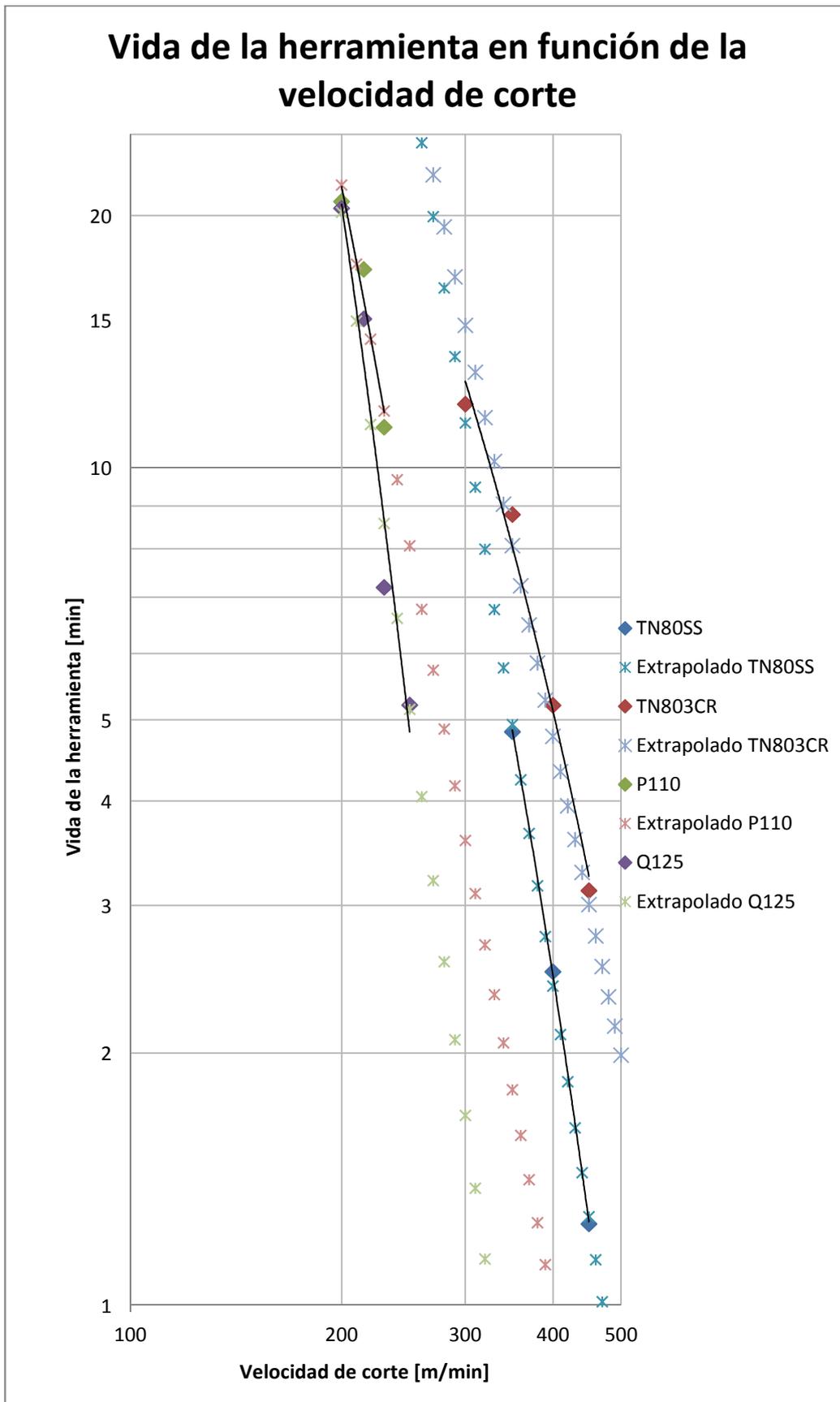


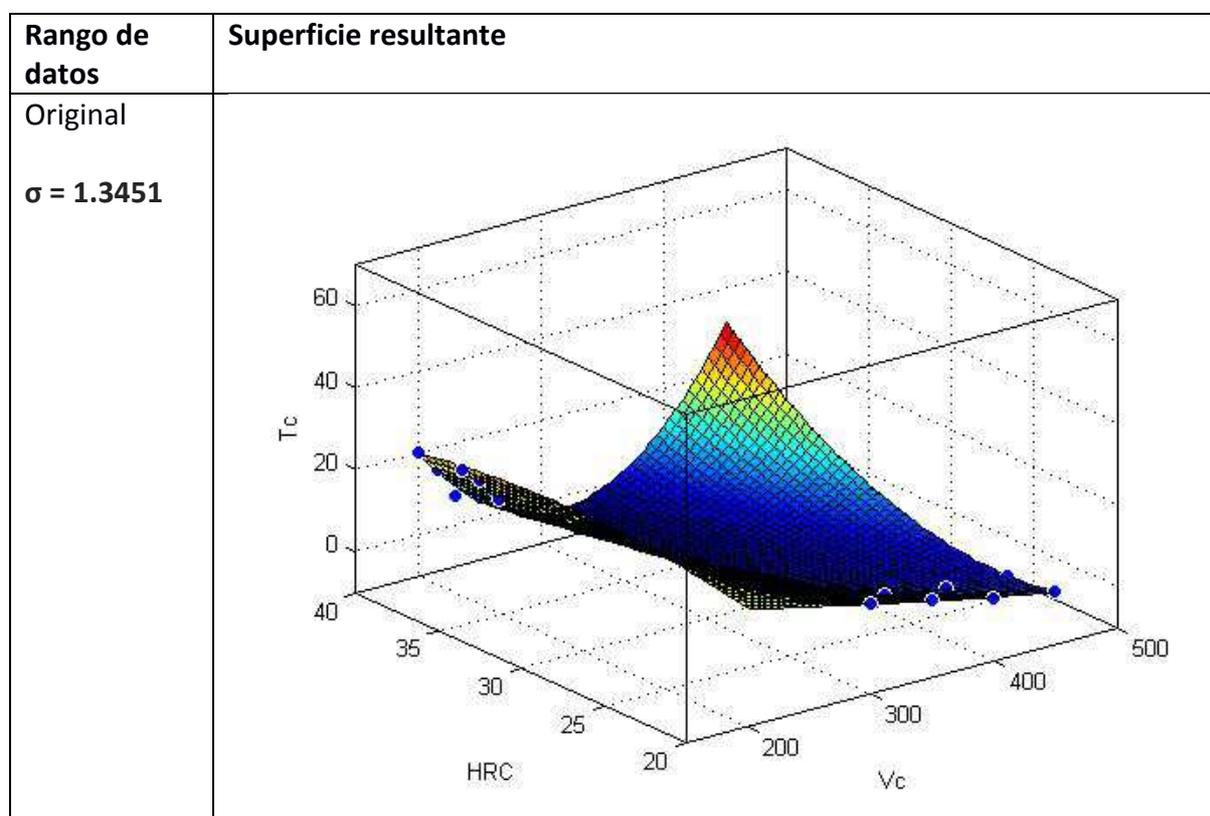
Figura 27: Curvas de Taylor y datos extrapolados

Se agregaron al modelo puntos que debido a cuestiones prácticas no se hubieron podido medir; aquellos correspondientes al mecanizado de piezas de baja dureza a bajas velocidades y al mecanizado de piezas de alta dureza a altas velocidades.

Teniendo en cuenta la pérdida de precisión que se involucra, a estos nuevos puntos se les asigna un peso ( $w$ ) menor que a los obtenidos a partir de mediciones empíricas. De modo de obtener un modelo conservativo, dicho peso será función de la mitad de la desviación porcentual que tuviera la curva de Taylor a ser utilizada para cada extrapolación por lo que a los valores productos de mediciones se les asignó un peso unitario [Tabla 8 y 9].

Vc	HRC	T <sub>c</sub>	w
200	20,00	72,6497	0,4819
230	20,00	41,9619	0,4819
200	22,90	100,2591	0,4968
230	22,90	47,2519	0,4968
400	37,32	0,9985	0,4912
450	37,32	0,5916	0,4912
400	39,93	0,2895	0,4891
450	39,93	0,1407	0,4891

Tabla 8: Datos extrapolados a partir de las ecuaciones de Taylor para el desgaste de herramienta



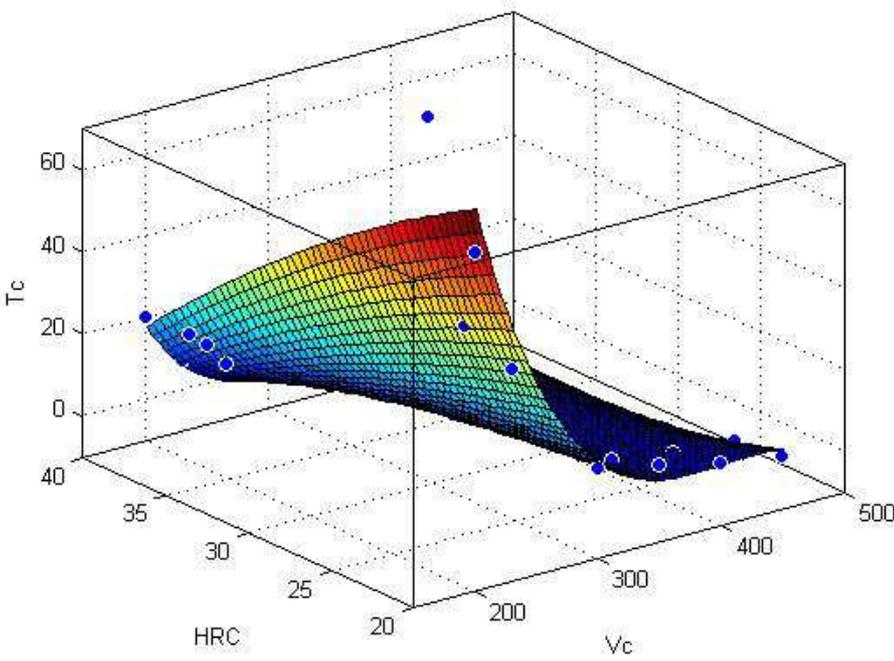
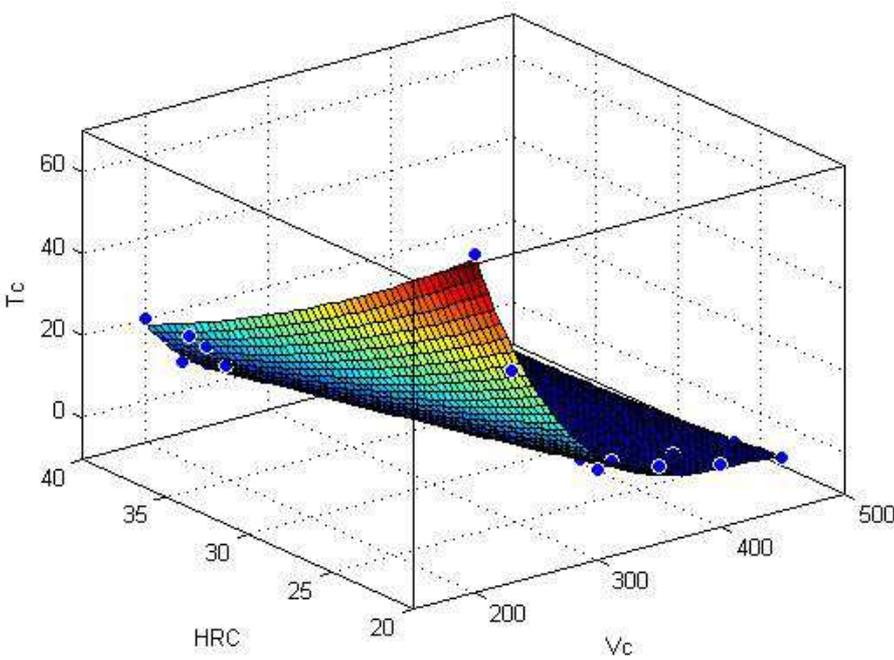
<p>Primera inclusión de datos extrapolados</p> <p><math>\sigma = 6.4964</math></p>	
<p>Análizando la anterior superficie se ve que si bien se mejora el ajuste del modelo propuesto con la realidad del mecanizado de aceros, el agregado de algunos de los nuevos conducen a un mayor desvío estándar por lo que se decidió excluirlos.</p>	
<p>Inclusión de datos extrapolados que mejor se ajustan</p> <p><math>\sigma = 2.7088</math></p>	

Tabla 9: Distintos rangos de datos utilizados para interpolar superficies

Se repitió el proceso iterativo de inspeccionar visualmente en qué zonas de la superficie interpolada hacía falta información de modo de saber que datos extrapolar para agregar al modelo. Se obtuvieron y graficaron los siguientes 2 puntos [Tabla 10 y 11]:

Vc	HRC	T <sub>c</sub>	w
325	22,9	7,3487	0,4968
325	37,32	2,5127	0,4912

Tabla 10: Conjunto adicional de datos extrapolados

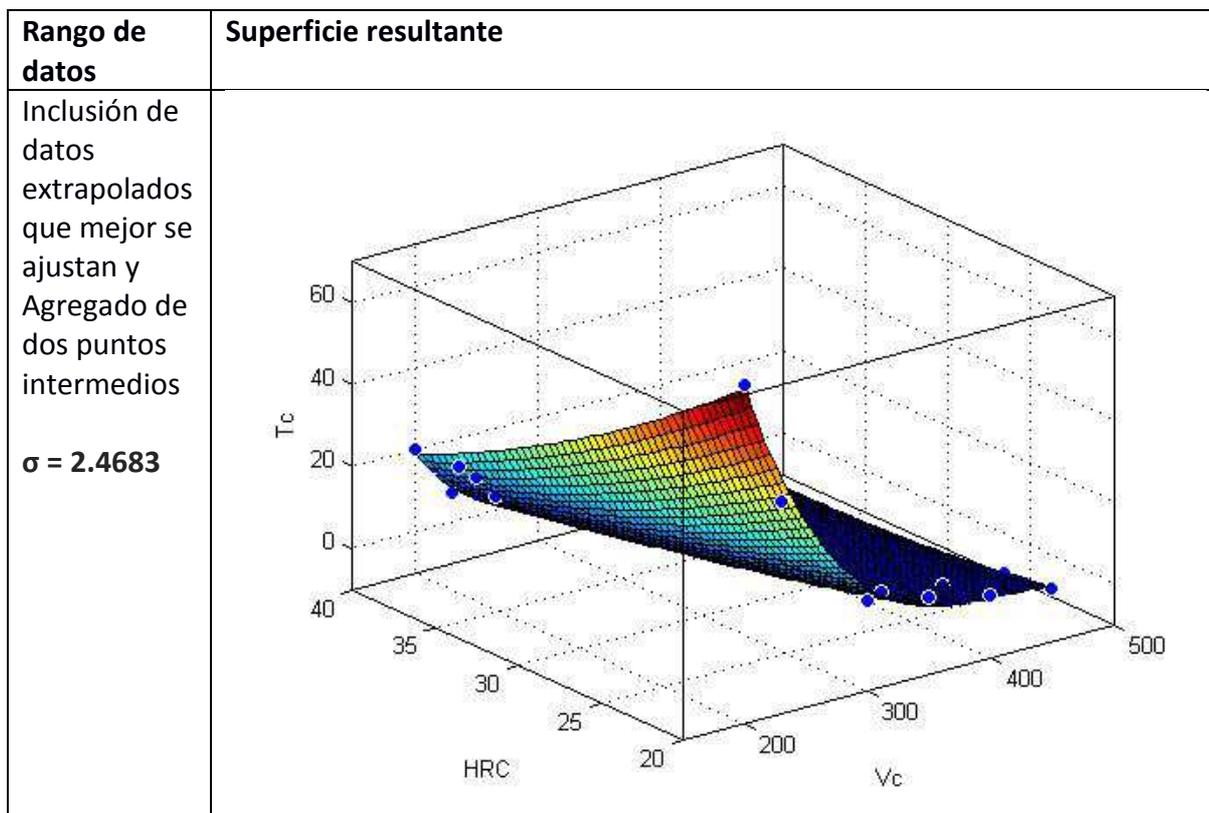


Tabla 11: Superficie resultan de interpolar datos medidos y datos obtenidos de las curvas de Taylor (3.3)

Si bien se mejora el ajuste manteniendo una desviación estándar baja, en la siguiente vista se puede ver que el modelo falla ya que (por ejemplo) a altas velocidades predice tiempos de vida útil menores para durezas intermedias que para durezas altas [Figura 28].

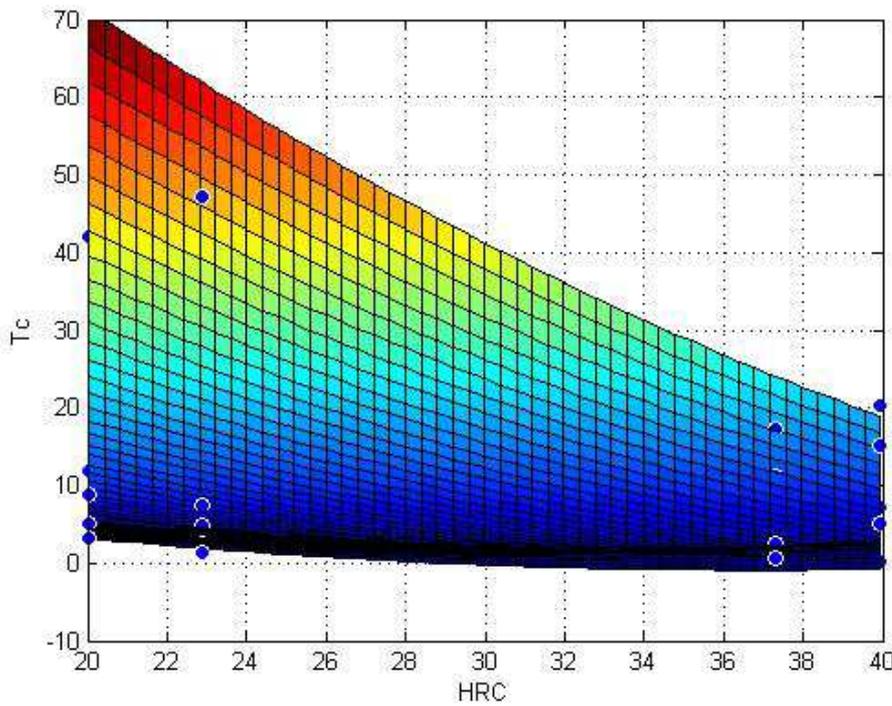


Figura 28: Vida útil en función de la dureza.

Continuar reduciendo el grado del polinomio que gobierna la relación que tiene la dureza (variable  $y$ ) con el tiempo de corte (variable  $z$ ) logra tanto un mejor ajuste con lo que se espera que suceda para durezas intermedias a la vez que mejora levemente la desviación estándar del modelo. Sin embargo, se pierde algo de precisión en la predicción de vida útil para altas durezas [Tabla 12].

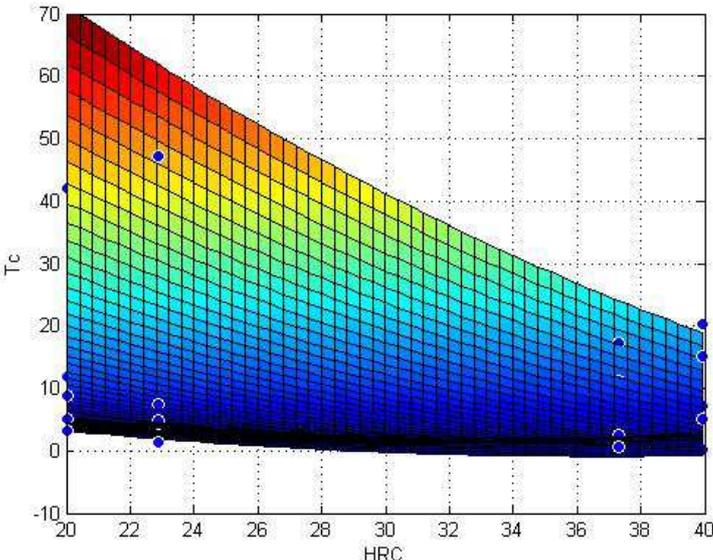
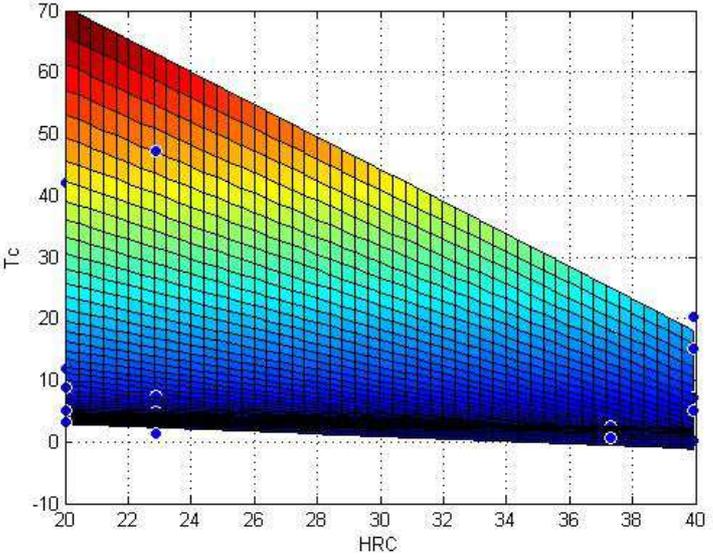
Polinomio	Desviación estándar ( $\sigma$ )	Vista Y-Z de la superficie interpolada
$z(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3 + p21*x^2*y + p12*x*y^2$	2.4683	
$z(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p30*x^3 + p21*x^2*y$	2.4199	

Tabla 12: Modelos correspondientes a soluciones cuadráticas y lineales respecto de la dureza

Reemplazando los coeficientes obtenidos mediante un método de cuadrados mínimos en esta última superficie, se obtiene la siguiente expresión polinómica para el tiempo de vida útil de la herramienta de corte:

$$Tc = 5,091 - 8,432 * Vc - 5,066 * HRC + 11,930 * Vc^2 + 9,256 * Vc * HRC - 5,704 * Vc^2 - 4,897 * Vc^2 * HRC$$

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado esquemáticamente una metodología adecuada para el estudio de la maquinabilidad de aceros de media y alta dureza tomando como base y simplificando lo propuesto por el ensayo normalizado ISO 3685.

A partir de la obtención y análisis de curvas de desgaste en función del tiempo se verificaron los mecanismos de desgaste y falla de la herramienta, incluyendo el aumento de las fuerzas de corte involucradas al desgastarse el recubrimiento de los insertos de corte.

Se obtuvieron las ecuaciones reducida de Taylor, para vida de herramienta bajo criterio de medición del desgaste de flanco  $V_B=0,1$  mm para distintos aceros propietarios de la empresa Tenaris-Siderca con insertos de corte marca Sandvik-Coromant CNMG 120408 PM4325 en operación de cilindrado con velocidad de avance de 0,3 mm/rev y profundidad de corte de 1,5mm.

Una vez realizado un análisis previo de los datos, que permitiera comprender a priori cuáles son las variables más importantes, cómo se relacionan entre sí y cómo influyen en la variable de salida, se logró encontrar que la vida útil de la herramienta varía cúbicamente con la velocidad de corte pero linealmente con la dureza de la pieza de trabajo (en escala Rockwell C) por lo que se concluye que es la velocidad de corte el parámetro principal que gobierna la vida útil de la herramienta.

Utilizando la inferencia estadística se ha podido conseguir una serie de fórmulas que permiten predecir el valor de la vida útil de la herramienta en función tanto de la velocidad de corte como de la dureza de las piezas de trabajo. Esto se considera de vital importancia para todo tipo de operación de mecanizado, incluyendo el mecanizado de tubos para la industria petrolera que inspiró este trabajo.

Debido al limitado número de probetas ensayadas, se sugiere la realización de más ensayos para poder avalar los resultados obtenidos en este trabajo.

## 5. REFERENCIAS

- [1] API Specification 5CT (Specification for Casing and Tubing): ISO 11960:2004, Petroleum and natural gas industries—Steel pipes for use as casing or tubing for wells.
- [2] ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools (Second edition 1993-11-15)
- [3] Active Standard ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size
- [4] <http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/pages/productdetails.aspx?c=cnmg%20432-pm%204325>
- [5] Taylor, F. W., On the Art of Cutting Metals, American society of Mechanical Engineers 1906.
- [6] American Society of Mechanical Engineers. Tool life testing with single-point turning tools, ANSI/ASME B94.55M, Nueva York, 1985.
- [7] T. Y. Yang, "Finite Element Structural Analysis", Prentice Hall, 1986. pp. 446-449.
- [8] <http://www.nikoninstruments.com/Information-Center/Diascopic-Illumination>
- [9] Duración del filo en plaquitas de metal duro recubiertas. N. E. Mazini, J. M. Blanco, L. Iurman, D. Ziegler 2002

## 6. AGRADECIMIENTOS

Se desea expresar un profundo agradecimiento a las siguientes instituciones sin las cuales la realización de este trabajo no hubiese sido posible:

- Departamento de investigación y desarrollo de Tenaris-Siderca
- Centro de materiales del Instituto Tecnológico de Buenos Aires
- Aerre Arbros S.A.
- Elemec Electromecánica

## ANEXOS

**ANEXO A: Aceros ensayados**

Material	% C		% Mn		% Mo		% Cr		% Ni	% Cu	% P	% S	% Si
	min	max	min	min	max	max	min	max	max	max	max	max	max
<b>P110</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	0.03	-
<b>Q125</b>	-	0.35	-	1.35	-	0.85	-	1.5	0.99	-	0.02	0.01	-
<b>TN80SS</b>	-	0.32	-	0.7	-	0.65	-	1.2	0.2	0.2	0.02	0.005	0.35
<b>TN803CR</b>	0.06	0.21	0.3	0.7	-	0.55	3.1	3.8	-	-	0.02	0.005	0.4

Tabla 13: Composición Química de los aceros, porcentaje de masa (%)

Material	Elongación con carga (%)	Fluencia (Kpsi)		Resistencia (Kpsi)
		min	max	min
<b>P110</b>	0.6	110	140	125
<b>Q125</b>	0.65	125	150	135
<b>TN80SS</b>	0.5	80	95	95
<b>TN803CR</b>	0.5	80	95	95

Tabla 14: Propiedades mecánicas de los aceros

Material	Proceso de Manufactura	Tratamiento Térmico	Temperatura min de templado (C)
<b>P110</b>	Nota 1 (S o EW)	Templado y Revenido	-
<b>Q125</b>	Nota 1 (S o EW)	Templado y Revenido	-
<b>TN80SS</b>	Nota 1 (S)	Templado y Revenido	650
<b>TN803CR</b>	Nota 1 (S)	Templado y Revenido	-

Tabla 15: Procesos de Manufactura y Tratamientos Térmicos

Nota 1: Los tubos se fabrican mediante trabajado en caliente y subsecuentemente con trabajado en frio y/o tratamientos térmicos para producir las medidas, dimensiones y formas deseadas.

Los aceros son de grano fino por lo que contienen uno o más elementos refinadores de grano como Al, Mo, Ti o V en proporciones suficientes para dar como resultado un tamaño de grano austenítico ó primario relativamente pequeño.

S: Seamless o sin costura. A través de procesos de laminación bajo principio Mannesmann. También podría ser seamless a través de proceso de forja (peregrino) o trefila.

EW: Electric Welded process o con costura. Aquí se parte a partir de chapa / bobina y se sueldan caras de la bobina para conseguir el tubo.

## ANEXO B: Ensayo de Metalografía

### B.1 Seccionamiento

#### Generalidades:

Las operaciones de corte pueden generar zonas de trabajado en frío en el material donde se altera la microestructura de la muestra antes de ser examinada.

Para el seccionamiento de las probetas se utilizó una *sierra sin fin* ya que ofrece la mejor solución para reducir el impacto de estas características indeseables del proceso resultando en una superficie relativamente lisa. Se utilizaron bajas velocidades de corte para evitar que el calor generado por un proceso de corte estándar mediante amoladora con disco abrasivo sea evitado. En todo caso se deberá contar con amplias cantidades de refrigerante y control de velocidad.

El resultado son secciones anulares que son a su vez seccionadas nuevamente de modo de facilitar su desbaste y pulido especular.

#### Procedimiento empleado:

- 1) Centrado de la muestra bajo la zona de acción de la máquina de corte de modo de realizar el seccionamiento lejos de los extremos de la muestra que hayan sido afectados por el corte con oxiacetileno.
- 2) Sujetado de pieza mediante tuercas, levantado de escudo protector.
- 3) Puesta en marcha el sistema de refrigeración de modo de refrigerar y limpiar la zona de contacto.
- 4) Dejar que el peso de la máquina ejerza la presión de corte necesaria de modo parejo y a velocidad de avance constante.
- 5) Repetir pasos anteriores para obtener sección de anillo que sea fácil de manipular.

Antes de proceder con el desbaste lo corriente es realizar un montado de la muestra en alguna resina epoxy de modo de facilitar su manipuleo. Sin embargo, el grosor resultante de los anillos permite que las muestras puedan ser sujetadas con facilidad durante los procesos de pulido.

### B.2 Desbaste grueso

#### Generalidades:

El propósito de la etapa de desbaste grueso es generar la superficie plana inicial necesaria para los pasos de desbaste y pulido subsiguientes. Como consecuencia del seccionamiento, el

material puede presentar zonas de trabajado en frío hasta profundidades considerables por lo que se debe reducir la rugosidad de la superficie de la muestra progresivamente de modo de evitar perturbaciones en el material.

El desbaste grueso puede realizarse húmedo o en seco, utilizando hojas o cintas de 80 a 220 rugosidad de carburo de silicio (SiC). Húmedo en el caso de que se utilice una máquina para evitar la generación de calor excesiva. Se realizó el desbaste húmedo con una máquina pulidora de doble disco MAREX.

Es importante que el desbaste sea uniforme en tamaño y paralelo en su ejecución. Se deberá rotar la pieza 90° de modo de evitar las ralladuras en un sentido dado. Es muy importante lavar la muestra antes de proceder a la siguiente etapa de desbaste / pulido.

## Procedimiento empleado:

- 1) Etiquetado de las muestras de modo de facilitar su identificación.
- 2) Ajuste del flujo de agua para obtener una película constante que no salpique. Se suministró agua suficiente de modo de proveer lubricación y limpiar desprendimientos, pero no tanta como para que se presenten efectos de planeamiento que reduzcan la efectividad de la hoja abrasiva.
- 3) Desbaste húmedo con la máquina, con las hojas de rugosidad 80-220, utilizando ambas manos para sostener la muestra. Se utilizaron las siguientes hojas de rugosidad en las muestras: 60, 150 y 220
- 4) Se hubo de tener cuidado de aplicar una presión moderada uniformemente y de mover la muestra lateralmente hasta que todas las líneas de limado fueran paralelas.
- 5) Lavado de la muestra de todo material desprendido, secado con toalla de papel y proceder a repetir los pasos anteriores con una hoja más fina.
- 6) Al terminar la etapa de 220 se procedió a la estación de desbaste medio/fino

**PULIDORA:**

Pulidora de doble disco MAREX con aportación de agua y velocidad constante [Figura 29].

Las partes de la pulidora son las siguientes:



Figura 29: Pulidora de doble disco MAREX

1. Discos: Sobre ellos se arreglan las hojas para el desbaste como también el paño para realizar el pulido mecánico.
2. Arandelas: Su función es proteger los alrededores de los discos.
3. Tubo para refrigerar con agua.
4. Válvula: Controla el paso de agua por el tubo de refrigeración.
5. Interruptor de encendido.

## *B.3 Desbaste fino y medio*

### Generalidades:

El objetivo general es el mismo que se tuvo en cuenta para el desbaste grueso. Sólo se debe proceder a las consecuentes etapas de desbaste cuando las marcas del desbaste anterior hayan sido completamente removidas. Estos pasos sucesivos correspondieron a 360, 600, 1000 y 1500 rugosidad de carburo de silicio (SiC). Entre etapas se debió rotar la muestra manteniendo el ángulo de desbaste constante y lavar antes de proceder a un grano más fino. Para evitar efectos de calor, se utilizó siempre agua refrigerante.

## *B.4 Pulido mecánico*

### Generalidades:

El pulido se realizó mediante el uso de abrasivos suspendidos en una solución acuosa, sobre un plato móvil cubierto de tela. Al finalizar la etapa de desbaste fino mediante hoja de 1500, se lavó la muestra cuidadosamente y se tomaron los recaudos necesarios para asegurar que la muestra no resulte contaminada con partículas de polvo en el aire que puedan rayarla.

Se mantuvo la muestra en una posición sobre el plato móvil, sin rotarla, hasta que todas las marcas del desbaste anterior hayan sido removidas.

### Procedimiento de laboratorio:

- 1) Se redujo el flujo de agua a una gota por segundo.
- 2) Se aplicó una pequeña cantidad de solución abrasiva de óxido de aluminio a la tela y se comenzó el pulido.
- 3) Se cumplieron las mismas consideraciones que en puntos anteriores en cuanto a seguridad, sujeción de la muestra, aplicación de presión y limpieza
- 4) Al terminar el pulido se lavó la muestra con agua destilada antes de proceder con el ataque químico.

## *B.5 Ataque químico*

### Generalidades:

El examen microscópico de una superficie metálica correctamente pulida revelará sólo unas pocas características estructurales como ser inclusiones, fisuras u otras imperfecciones físicas. El ataque se utiliza para resaltar y a veces identificar características microestructurales o fases

presentes. Incluso en muestras preparadas cuidadosamente una fina capa de metal perturbado puede persistir y deberá ser removida con un ácido. Se utilizó Nital, una solución de ácido nítrico y alcohol, aplicándola durante menos de un minuto de modo de no perturbar las estructuras presentes, sólo resaltarlas. Inmediatamente luego de la aplicación del Nital se enjuaga la muestra con alcohol, sin tocar la superficie.

*Nital: 1-5 partes de ácido nítrico, 100 partes de alcohol.*

## Procedimiento de laboratorio:

- 1) Aplicar Nital sobre toda la superficie
- 2) Enjuagado y lavado con alcohol luego de 20-30 segundos.
- 3) Secado con un secador de cabello

## ***B.6 Examen microscópico***

### Generalidades:

Una vista detallada de la superficie de la muestra se realizará en un Microscopio metalográfico (Proveedor: Científica Schonfeld; Modelo: Microscopio Trinocular de platina invertida modelo XJL-17BT). Este consiste de un sistema de lentes, objetivos y ocular, de modo de alcanzar aumentos entre 100X y 600X [*Figura 30*]. Las características importantes del mismo son:

- 1) Aumento.
- 2) Resolución.
- 3) Planitud del campo de visión.

## MICROSCOPIO

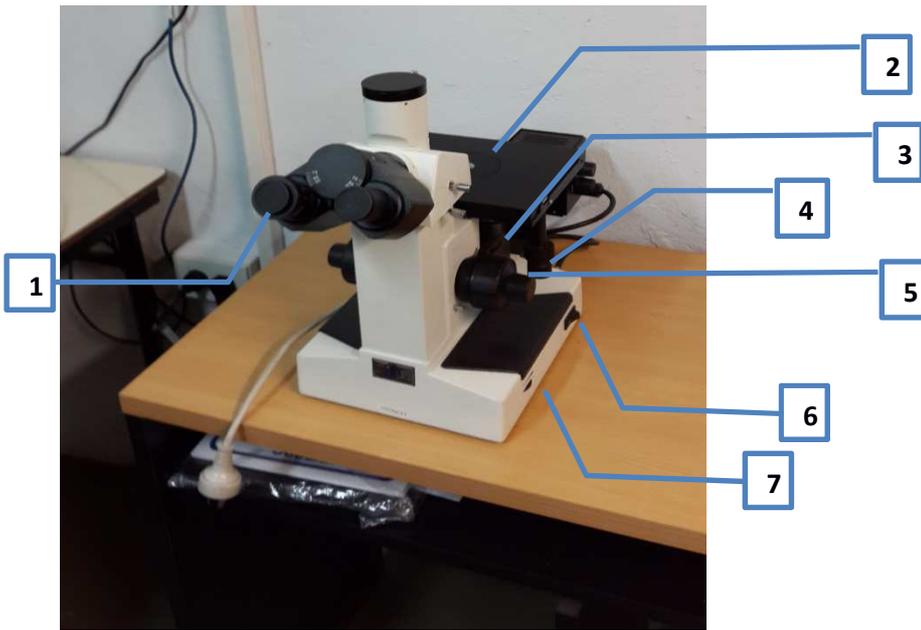


Figura 30: Microscopio Trinocular Invertido Metalográfico modelo XJL-17BT de Científica Schonfeld

1. Tubo de observación binocular.
2. Portador del espécimen y Platina: Base sobre la que se arreglan las probetas.
3. Puente giratorio: Contiene el objetivo (lentes de aumento). En total son 4 lentes con aumento de 10x, 20x, 40x y 60x.
4. Controles de movimiento en X e Y: Posiciona el portador del espécimen en los ejes X e Y
5. Perillas de ajuste grueso y fino: Ajuste de imagen
6. Interruptor de encendido.
7. Perilla control de iluminancia: Controla la cantidad de lux que iluminan la muestra.

Con el microscopio metalográfico se pudo ver de forma clara y magnificada las probetas metalográficas, se tomaron fotos digitales y luego se realizó el análisis estructural de los aceros en las probetas.

## ANEXO C: Ensayo de dureza

### C.1 Ensayo de Dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell es un método de lectura directa para determinar la resistencia que un cuerpo opone a ser penetrado por otro. Consiste en apretar gradualmente sobre ellos, mediante una precarga inicial  $G_0$ , un cuerpo esférico o cónico llamado penetrador, aumentarla por la adición de otra carga  $G_1$  mayor que  $G_0$  y medir, después de suprimida  $G_1$  el incremento de la penetración inicial [Figura 31]. La función de la precarga es asentar el indentador y romper las capas de óxido superficiales que pudieran existir.

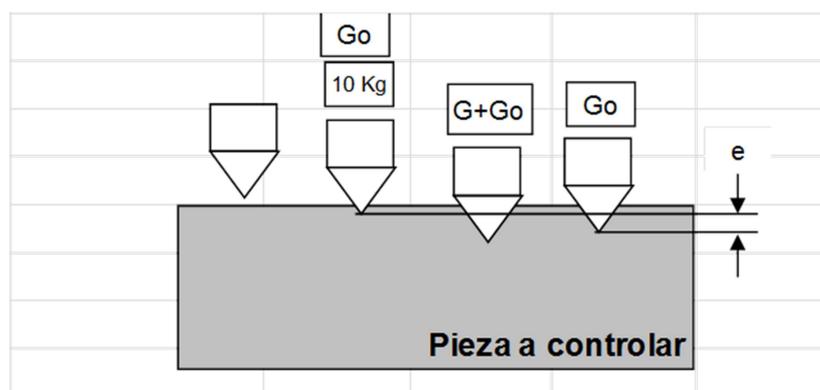


Figura 31: Modelo de las etapas de penetración en el Ensayo de Dureza Rockwell

El ensayo se realiza con alguna de las siguientes escalas: A, B, C, D, E, F, G, H; según la dureza del material a ensayar y el incremento de penetración se mide en una escala cuya unidad fijada arbitrariamente es de 0,002 mm. Los penetradores utilizados son tres: Cono de Diamante con un ángulo de 120 grados y un radio de 0,2 mm. Bolilla de acero de 1/16" de diámetro, y de 1/8" de diámetro [Tabla 16].

Penetradores	Escalas	Cargas (kg.)	PrecargaKg	Total Kg.
Cono de diamante	RA	50	10	60
	RD	90	10	100
	RC	140	10	150
Bolilla dia. 1/16"	RF	50	10	60
	RB	90	10	100
	RG	140	10	150
Bolilla dia. 1/8"	RH	50	10	60
	RE	90	10	100
	RK	140	10	140

Tabla 16: Distintos tipos de penetradores sus escalas y cargas aplicadas en el ensayo

En los ensayos se utilizó el penetrador cono de diamante con la Escala RC.

Escala Rockwell	A	B	C
Carga total [Kgf]	60	100	150
	45	60	100
	30	45	60
	15	30	45
		15	30
			15

Tabla 17: Cargas a aplicar durante ensayo de dureza Rockwell para cada escala; Utilizar precarga de 10Kgf

Primero se colocó el penetrador de cono de diamante de modo de verificar el correcto funcionamiento del durómetro con la placa patrón correspondiente. Luego se introdujo la probeta a medir en la bancada y se colocó el contrapeso en la varilla sobre la palanca de las pesas. Este contrapeso produce la precarga de 10 Kg (98.07 N). Finalmente se colocaron las cargas requeridas de menor a mayor, correspondientes a 30 – 45 – 60 – 100 – 150 Kg [Tabla 17]. Hubo que tener en cuenta que soporte porta pesas equivale a 15Kgf [Figura 32].



Figura 32: Durómetro durante el ensayo

Se ensayó cada probeta ubicándola en la placa de apoyo plano, subiendo con cuidado mediante el giro del disco gris que se encuentra abajo hasta que la probeta toque el penetrador y luego se continuó girando hasta obtenerse la indicación de “precarga aplicada” en la pantalla. Seguidamente se libera la palanca de accionamiento y se espera que el amortiguador hidráulico termine de aplicar la carga. Al retirar las pesas, bajando nuevamente la palanca, el sistema muestra el valor de dureza medido.

### Precauciones que se tomaron en los ensayos:

- Las piezas deben estar siempre limpias de aceite, rebabas, oxido, grasas, etc.
- No golpear el penetrador de diamante, se arruina si se golpea.
- El penetrador debe estar perpendicular a la mesa.

### *C.2 Aparato utilizado en el Ensayo de Dureza*

DUROMETRO DIGITAL MODELO F-26 [Figura 33]:

#### Características Técnicas:

- Está equipado con precarga de 3 y 10 Kg. Cargas finales de 15-30-45-60-100-150 Kgf. El cambio de las mismas es manual.
- Lectura directa en Display de LCD. Apreciación mínima 0,1 HR.
- Posee un amortiguador hidráulico para regular la velocidad de aplicación de la carga.
- Cuerpo de monoblock fundido.
- Tornillo de elevación con protección telescópica.
- Elementos de contacto con terminación Epoxi.
- Distancia máxima del plato hasta el penetrador: 180 mm
- Distancia del centro del tornillo hasta el cuerpo: 150 mm
- Dimensiones externas: Altura: 600 mm, Largo: 450 mm, Ancho: 190 mm, Peso: 75 Kg aproximadamente.



Figura 33: Durómetro digital modelo F-26

**ANEXO D: Dimensiones de piezas a ensayar**

Material	Diámetro interior	Diámetro exterior	L torneado	L mord
TN 80 SS	<b>69.3 mm</b>	<b>102 mm</b>	<b>210 mm</b>	<b>40 mm</b>
TN 803CR	<b>70 mm</b>	<b>102 mm</b>	<b>210 mm</b>	<b>40 mm</b>
P110	<b>92 mm</b>	<b>130 mm</b>	<b>210 mm</b>	<b>40 mm</b>
Q125	<b>91.3 mm</b>	<b>130 mm</b>	<b>210 mm</b>	<b>40 mm</b>

Tabla 18: Dimensiones de las probetas ensayadas

**ANEXO E: Características generales de inserto de corte CNMG 120408 PM 4325**

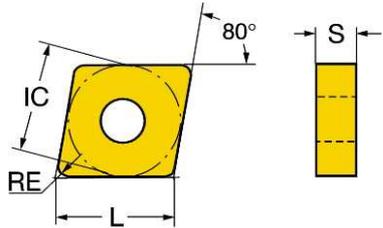
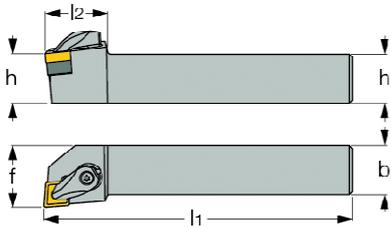
<b>Nombre</b>	CNMG 12 04 08-PM 4325	
<b>Dimensiones</b> 	RE (Radio de esquina)	0.8 mm
	IC (Diámetro de círculo inscripto)	12.7 mm
	L (Longitud de filo de corte)	12.8959 mm
	S (Espesor)	4.7625 mm
	D1 (Diámetro agujero de sujeción)	5.156 mm
<b>Tolerancias</b>	Clase M	
<b>Material</b>	Carburo	
<b>Recubrimiento</b>	Nitruro de Boro	
<b>Rompe viruta</b>	PM	
<b>Porta herramientas</b> 	Nombre	DCLNL 2525M 12 Izquierdo
	h	25.0 mm
	b	25.0 mm
	l <sub>1</sub>	150.0 mm
	l <sub>2</sub>	35.0 mm
	f	32.0 mm
<b>Fabricación</b>	CVD (Chemical Vapour Depositioin)	

Tabla 19: Características generales de inserto de corte

ANEXO F: Torno GOODWAY Modelo: GLS – 200



Figura 34: Torno GOODWAY Modelo: GLS – 200

Características Técnicas:

<b>Variaciones disponibles</b>	
Torno 2 ejes	GLS 200
Motorizado y eje "C"	GLS 200 M
Motorizado y eje "Y"	GLS 200 Y
<b>Capacidad</b>	
Volteo sobre bancada (mm)	380
Diámetro máximo de torneado (mm)	320
Longitud máxima de torneado (mm)	500
Capacidad de barra (mm)	51
<b>Cabezal Estándar</b>	
Potencia (kW)	11
Velocidad máxima (rpm)	6000
Dimensión del plato (mm)	203,2
<b>Torreta</b>	
Número de estaciones	12
Número de estaciones motorizadas	6
<b>Avance</b>	
Avance rápido X (mm/min)	24000
Avance rápido Z (mm/min)	30000
<b>Control numérico</b>	
FANUC	0i TC
<b>Medidas</b>	
Espacio ocupado (largo) (mm)	2086
Espacio ocupado (fondo) (mm)	1642
Espacio ocupado (alto) (mm)	1717

**ANEXO G: Sierra Sin Fin en ángulo manual DGH Delle Grazie modelo: Z3CN N°297**

Características Constructivas:

- Panel de control con comandos a 24 V y parada de emergencia.
- Cierre rápido de mordaza por cremallera.
- Tensor de hoja con indicador eléctrico y parada de emergencia ante tensión incorrecta o rotura de cinta.
- Guías con rodamientos y doble placa de metal duro.
- Cepillo de limpieza mecánico por eje flexible.
- Bancada de corte rectificada.
- Regulación de bajada hidráulica y bloqueo.
- Lubricación sobre el material por flexible orientable.
- Volantes de hoja con rodamientos cónicos.
- Electrobomba de refrigeración.

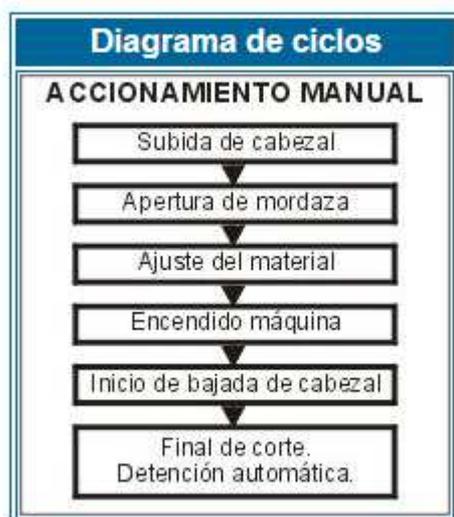
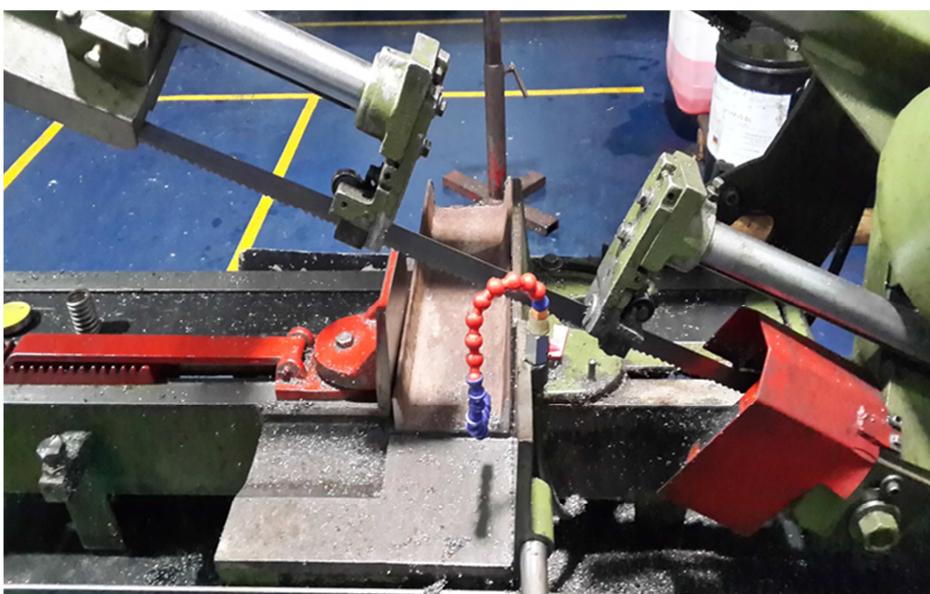


Figura 35: Diagrama de ciclos de la Sierra Sin Fin de Accionamiento Manual

Características Técnicas	
Capacidad de corte redondo en mm.	250
Capacidad de corte rectangular en mm.	250 x 330
Dimensión de la cinta en mm.	3600 x 27 x 0.9
Potencia motor principal en hp	1
Potencia motor refrigeración en hp	0.12
Velocidad de la cinta en m/min.	35 - 60 - 90
Capacidad líquido refrigerante en litros	50
Diámetro de volantes en mm.	380
Peso aproximado en Kg	377
Dimensiones: largo, ancho y alto en mm.	1700/750/1200
Tensión de hoja	Manual

Tabla 20: Características Técnicas de la Sierra Sin Fin

Se verificó que la velocidad de corte estándar fuera lo suficientemente lenta como para no levantar calor que pueda producir modificaciones en la micro-estructura de las probetas.



Figuras 36 y 37: Imágenes de la Sierra Sin Fin en ángulo manual DGH Delle Grazie S.R.L Modelo: Z3CN N° 297

**ANEXO H: Configuración del torno**

VARIABLES del Torno CNC:

PARTE DEL TORNO	VARIABLES TECNOLOGICAS	VARIABLES GEOMETRICAS
HUSILLO	Velocidad de corte (define las RPM de giro)	Tipo de herramienta izquierda o derecha (define el sentido de giro)
	Potencia a consumir (define la gama de velocidades a utilizar)	
TORRE	Avance de mecanizado (define la velocidad de desplazamiento)	Forma de la pieza (define la trayectoria de cada herramienta)
		Selección de las distintas herramientas

Tabla 21: Partes de torno y sus variables tecnológicas y geométricas

Programa utilizado para el mecanizado:

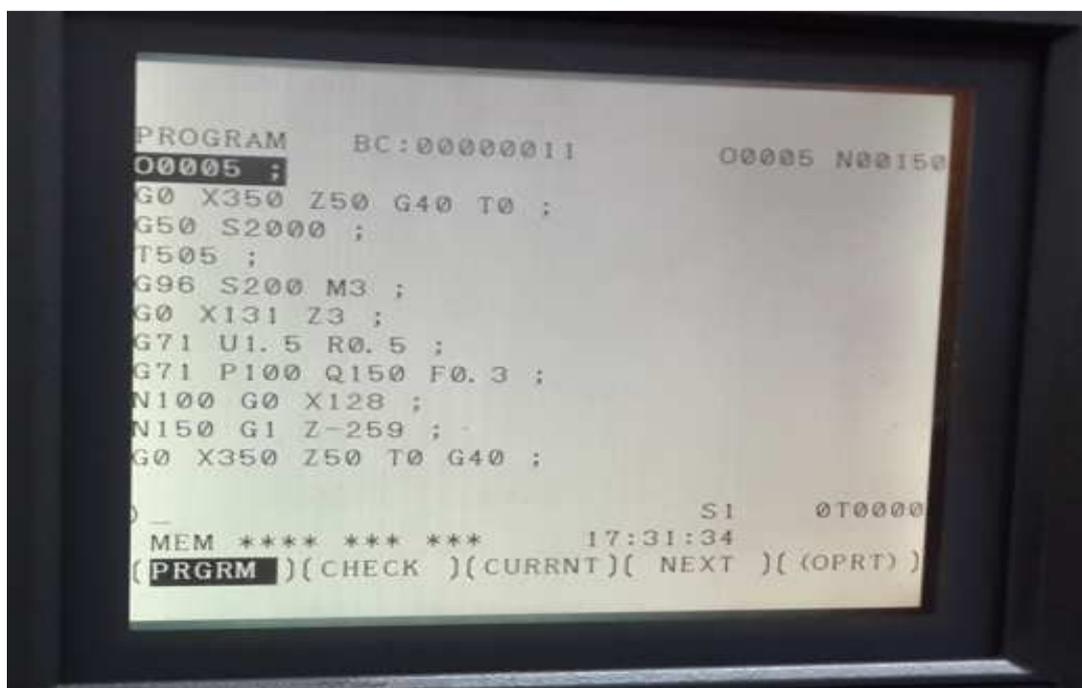


Figura 38: Pantalla del Control Numérico del torno FANUC Oi-Mate

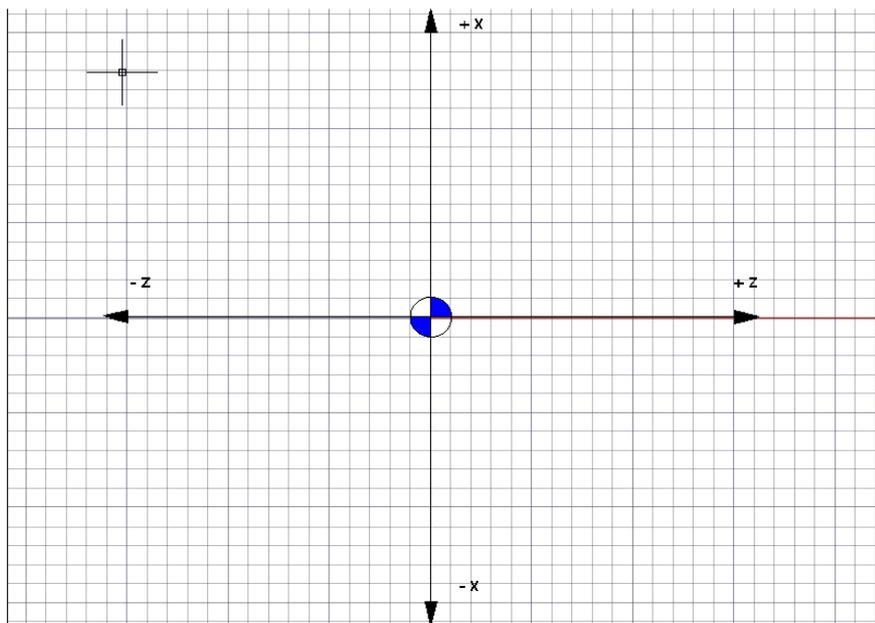


Figura 39: Par de ejes coordenados X – Z en el Torno CNC.  
Eje Z: coincidirá con el eje de rotación  
Eje Y: coincidirá con los diámetros

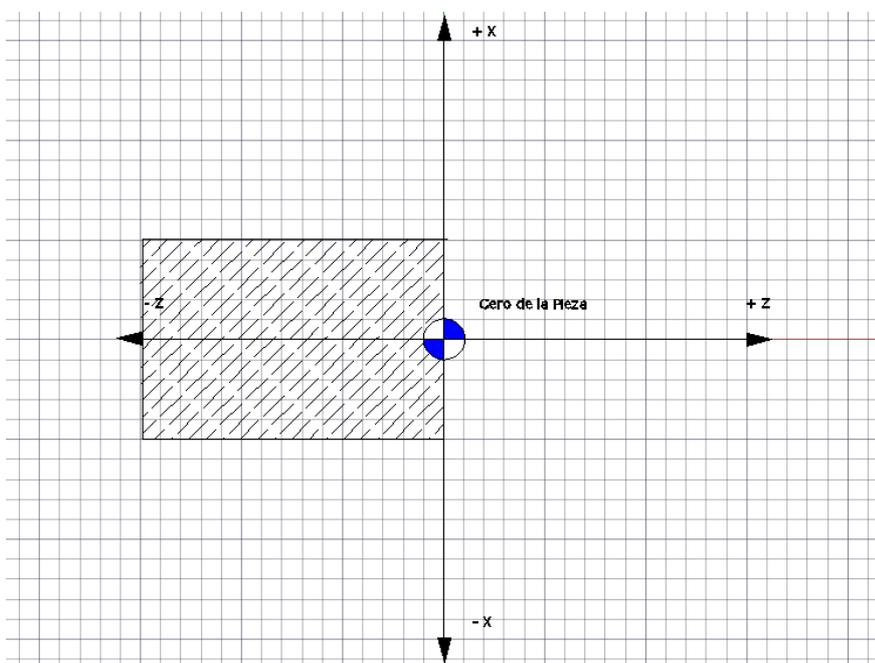


Figura 40: Ejes coordenados X – Z en el Torno CNC con la pieza y el CERO PIEZA

- BLOQUE, se denomina a cada línea de programa.
- El “;” deberá ir al final de cada bloque para indicarle al control la conclusión del mismo.
- **O0005** → Bloque inicial: está formado por la letra “O” seguida de 4 dígitos como máximo. Será el que identifique los programas entre si y permite el archivo de varios programas.
- **G0 X350 Z50 G40 T0;** →
  - ✓ G0 X350 Z50 → Movimiento en rápido: corresponde al posicionamiento de la herramienta. Su estructura es G0 X--- Z--- (notación absoluta)
  - ✓ G40 T0 → Las puntas de las herramientas poseen un cierto radio que hace que la punta de la herramienta esté un poco más alejada de nuestro punto

teórico al diseñar nuestros procesos de mecanizado [Figura 41 y 42]. Esto se eliminaría si se logra hacer que la punta de la herramienta fuera tangente en todo momento a la trayectoria programada. Este objetivo lo cumple la Función Compensación. La compensación del radio se realiza durante el bloque en el cual se llama y toma como compensado el punto final. De la misma manera la descompensación se realiza durante el bloque en el cual se retira la herramienta.

G41: llamada a compensación izquierda

G42: llamada a compensación derecha

G40: anulación de la compensación

Los ciclos automáticos de desbaste G71, G72 y G73 no toman los llamados de compensación de radio de herramienta, solo el ciclo automático de terminación G70 (mecaniza el sobre material).

Por lo tanto la función que se utilizó fue G40, ya que no se toma el llamado a compensación.

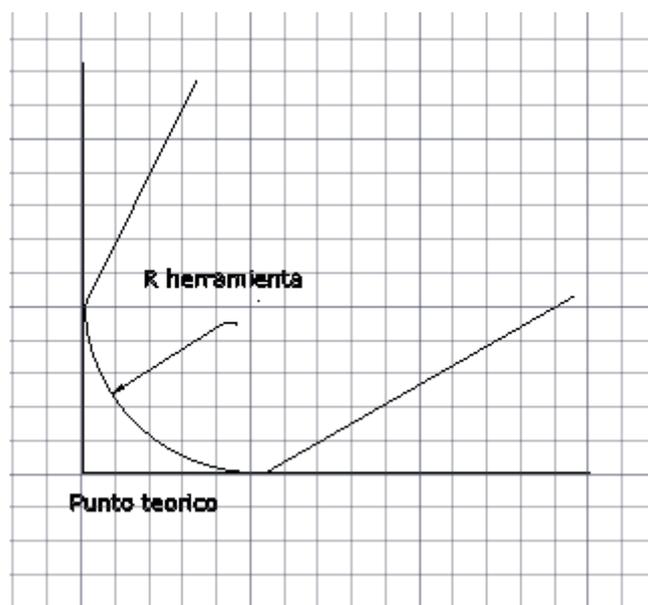


Figura 41: Herramienta con su radio y el punto teórico

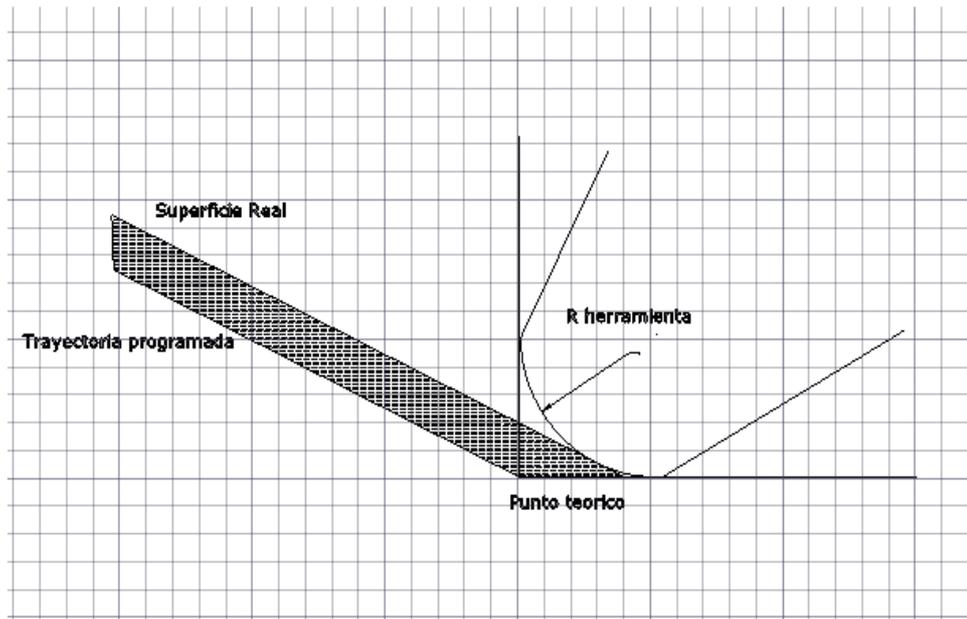


Figura 42: El error entre el punto teórico y el radio de la herramienta está representado por el área sombreada de la figura

T: es el código de posición que indica la orientación que tiene un vector, que tiene por origen el centro del radio de la herramienta y por punto final al punto teórico [Figura 43 y 44].

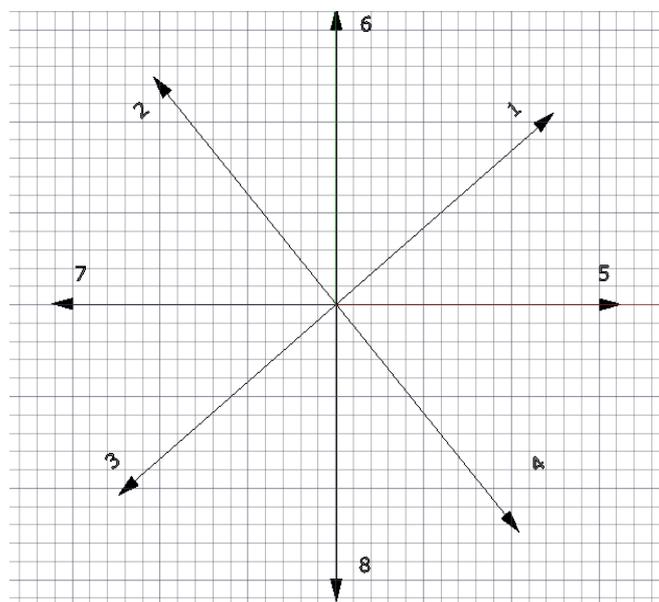


Figura 43: Las orientaciones de las herramientas en el Torno para su código de posición

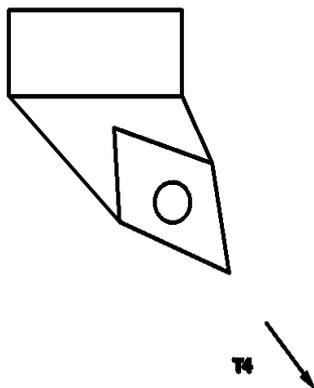


Figura 44: Ejemplo de una orientación de la herramienta en el Torno con su código de posición

El código de posición para la herramienta a utilizarse fue T0.

- **G50 S2000;** → Cuando se trabaja con velocidad de corte constante (G96) se corre el riesgo de que las rpm del husillo ( $N=(V*1000)/(\pi*D)$ ) tenderán al máximo que permite la maquina; dado que las fuerzas de apriete de las mordazas es afectada por la fuerza centrífuga de las mismas, puede resultar que el máximo de las rpm sea excesivo para la sujeción de la pieza. Es por ello que hay un limitador de velocidad máxima de giro, representada por la función: G50 S---- (rpm máxima). En el mecanizado de los tubos se limitó las rpm a 2000.
- **T505;** → Cuando la maquina sale de fábrica lleva un sistema de coordenadas establecido y un punto de referencia definido [Figura 45].

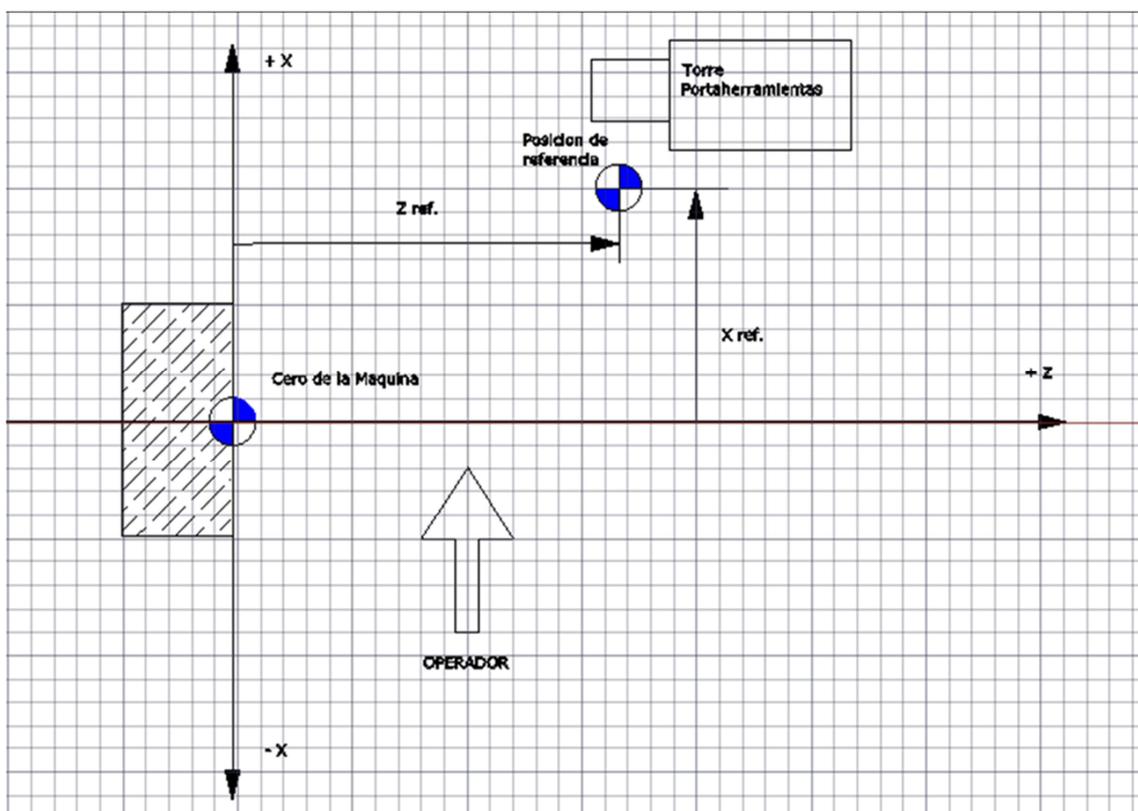
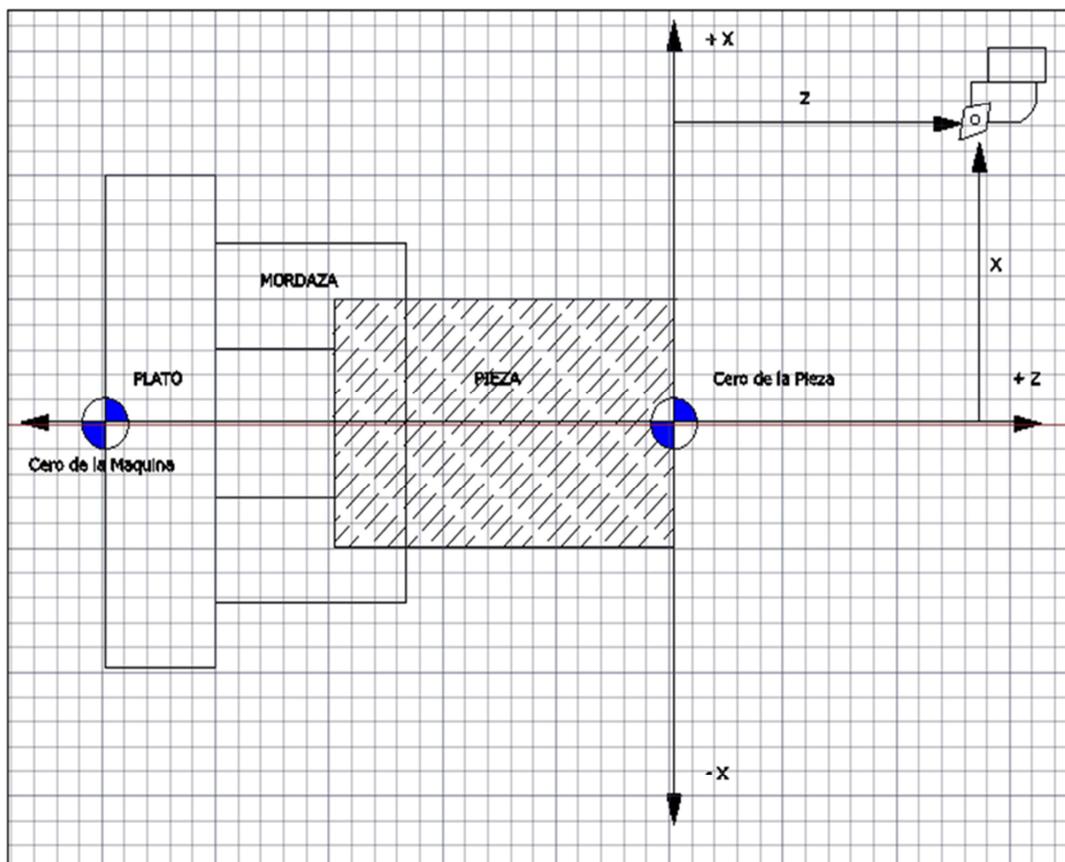


Figura 45: Sistema de coordenadas establecido y punto de referencia definido del Torno CNC

Cuando colocamos una pieza y tenemos la herramienta, el sistema de coordenadas que queremos que reconozca el control ya no es el anterior, sino que es el que tiene por origen al CERO DE PIEZA, y el punto que debe controlar es el de la punta de la herramienta, tal como se indica en la **Figura 46**:



**Figura 46:** Sistema de coordenadas modificado con el CERO PIEZA y CERO DE MAQUINA que se requiere

Para que el control deje de reconocer el CERO DE MAQUINA y pase a trabajar con el CERO DE PIEZA, y del punto TEORICO pase a reconocer a la punta de la herramienta, deberá disponer de la siguiente información:

- ✓ Distancia entre el CERO PIEZA y el CERO MAQUINA (en eje X)
- ✓ Distancia entre el PUNTO TEORICO y la punta de la herramienta (en las direcciones X y Z)

Estas informaciones se almacenan en una tabla independiente con el nombre de “OFFSETS GEOMETRICOS”. Estos offsets o correctores de herramienta son 16, de manera que cada offset corresponde a cada herramienta.

La función “T” tiene la siguiente estructura: T---, donde el primer dígito corresponde a la posición de la herramienta en la torre. Para un modelo que tiene una torre de 8 posiciones, las alternativas podrán ser del 1 al 8. La posición de la herramienta en la torre que se utilizó fue la 5. Para el caso de los dos últimos dígitos, los mismos representan el número corrector

u offset que corresponde a la herramienta en cuestión. Como dijimos podrán ser del 01 al 16, número corrector fue 05 en los ensayos de mecanizado.

- **G96 S200 M3;** → Cuando se quiere determinar la velocidad de giro del husillo una de las formas es especificando la velocidad de corte que queremos que se mantenga constante a lo largo de la trayectoria de mecanizado de la herramienta. Se realiza mediante la función G96 S----- (velocidad de corte en m/min). Este parámetro fue variando según la velocidad que se quiso evaluar, en la imagen de los códigos del programa la velocidad que se muestra es 200 m/min, pero se realizaron ensayos a 215, 230, 250, 300, 350, 400 y 450 m/min.

La función M ---, indica el sentido de giro del husillo. Por convención el plato será visto desde el interior del torno de frente, así tenemos:

M4: sentido de giro horario

M3: sentido de giro anti horario

M5: parada de husillo.

El sentido de giro del husillo en los ensayos fue anti horario.

- **G0 X131 Z3;** → Es la función para posicionar la herramienta para el mecanizado y no se tiene control sobre la velocidad de avance, son movimientos en rápido. La estructura que tiene es la siguiente: G0 X---- Z ---- (notación absoluta). El código que tenemos es X131 ya que es el diámetro de la pieza que estamos mecanizando.

- **G71 U1.5 R0.5;**

**G71 P100 Q150 F0.3;** → La función G71 es de desbaste longitudinal, y tiene la siguiente estructura:

G71 U---- R-----;

G71 P---- Q----- F-----;

Donde cada instrucción tiene el siguiente significado:

U---- = profundidad de pasada (RADIAL). La profundidad de corte fue 1.5 mm para todos los ensayos, ya que fue un parámetro fijo.

R----- = retiro de la herramienta para retorno. Se utilizó 0.5.

P----- = número del primer bloque de descripción del perfil. El P100 figura ya que se refiere al primer bloque N100 que le sigue abajo con la descripción del perfil.

Q---- = número del último bloque de descripción del perfil. El Q150 figura ya que se refiere al último bloque N150, que también se encuentra abajo, con la última descripción del perfil.

F---- = avance de trabajo. El avance de trabajo fue 0.3 mm/rev para todos los ensayos, ya que fue un parámetro fijo.

- **N100 G0 X128;**

**N150 G1 Z-259;** → Descripción del Perfil de Desbaste: movimiento rápido (G0) que continúe hasta que X128, realizando una pasada ya que  $(131 - (2 * 1.5)) \text{mm} = 128 \text{ mm}$ . Con esta función se determinó cuántas pasadas se quiso que realice la maquina sobre la pieza, es decir cuántos desbastes longitudinales iguales a realizar. En algunas piezas según el diámetro y espesor de las mismas se pudo hacer más o menos pasadas, ya que hay un límite de pasadas a realizar debido a que la pieza al ponerse muy delgada y a pesar de estar con una contrapunta comienza a vibrar. Por ejemplo en los casos donde se quiso realizar tres pasadas seguidas se cambió a X122,  $(131 - (2 * 1.5 * 3)) \text{mm} = 122 \text{ mm}$ .

Luego tenemos la Interpolación lineal (G1), que son aquellos desplazamientos de la herramienta que corresponden a las trayectorias lineales. Su estructura es G1 Z-----, siendo Z la coordenada del punto final. El código que se muestra en la imagen es Z -259 porque desde el punto Cero de la pieza se quiso que se desplace hacia la izquierda la herramienta hasta -259 mm, que es la longitud del tubo. Este parámetro vario según el tubo que se ensayaba ya que cuando se cortaron los tubos con la sierra sin fin no todos median lo mismo de longitud, por lo que este largo se determinó para cada tubo ensayado con el Torno.

- **G0 X350 Z50 T0 G40;** → Este bloque ya se explicó arriba y corresponde al retiro de la herramienta.

ANEXO I: Tipos de Viruta

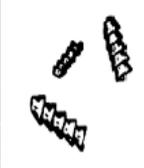
Table G.1 — Chip forms							
1 Ribbon chips <sup>1)</sup>	2 Tubular chips <sup>1)</sup>	3 Spiral chips	4 Washer-type helical chips <sup>1)</sup>	5 Conical helical chips <sup>1)</sup>	6 Arc chips <sup>2)</sup>	7 Elemental chips	8 Needle chips
1.1 Long 	2.1 Long 	3.1 Flat 	4.1 Long 	5.1 Long 	6.1 Connected 		
1.2 Short 	2.2 Short 	3.2 Conical 	4.2 Short 	5.2 Short 	6.2 Loose 		
1.3 Snarled 	2.3 Snarled 		4.3 Snarled 	5.3 Snarled 			

Figura 47: Anexo G: Chip Characteristics, Table G.1- Chip forms, de la Norma ISO 3685:1993(E)

**ANEXO J: Mediciones de desgaste en filos de corte**

Teniendo cuidado de identificar cada filo de cada inserto ensayado, se procedió a una inspección visual de los mismos mediante el uso de un perfilómetro. El perfilómetro proyecta la imagen magnificada de un área o característica de la pieza de trabajo utilizando iluminación diascópica<sup>[8]</sup>. Se pueden realizar las mediciones directamente sobre la grilla de la pantalla o mediante comparación con una referencia adecuadamente magnificada según el aumento del objetivo a utilizar, lo cual fue lo realizado en este trabajo en un perfilómetro Nikon V12a como el que se muestra a continuación *[Figura 48]*:

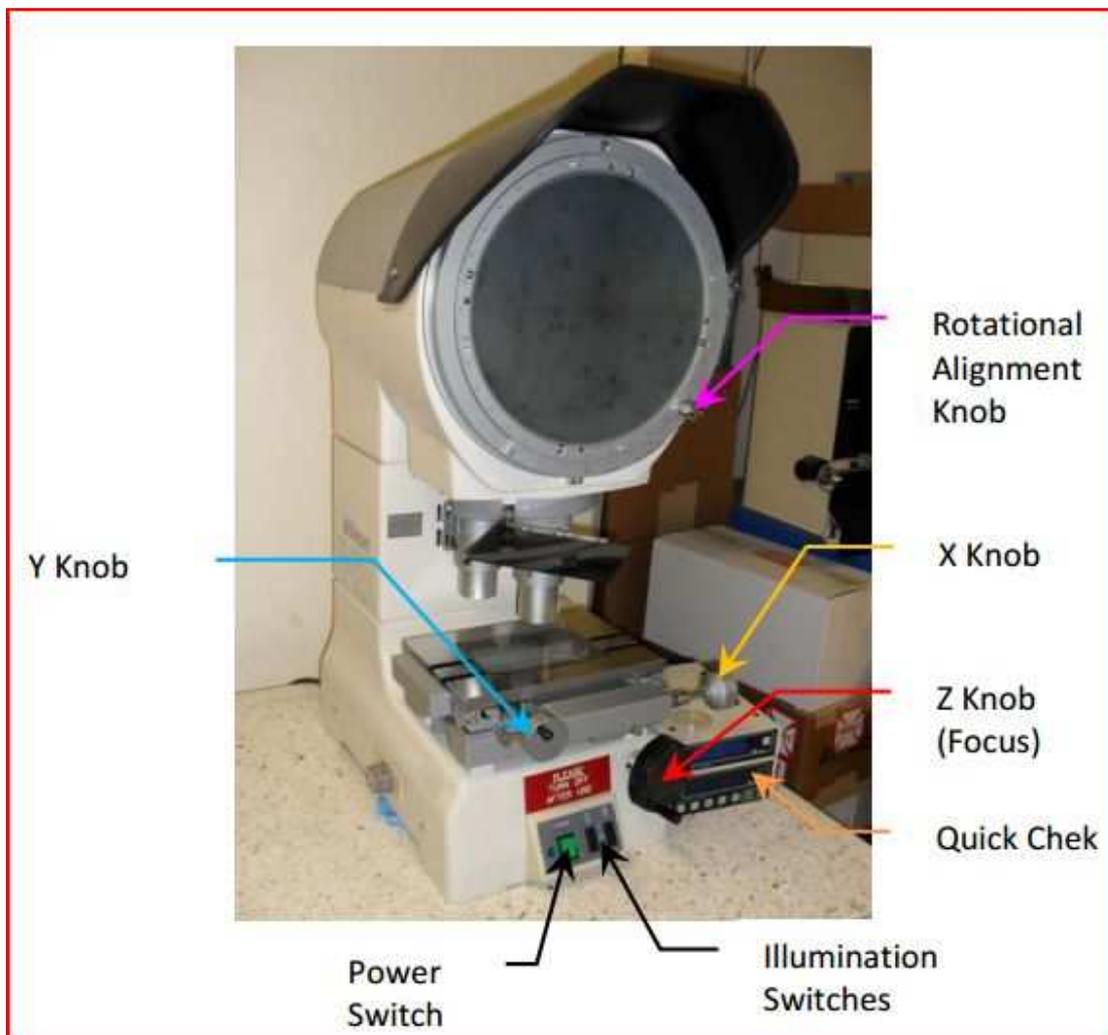
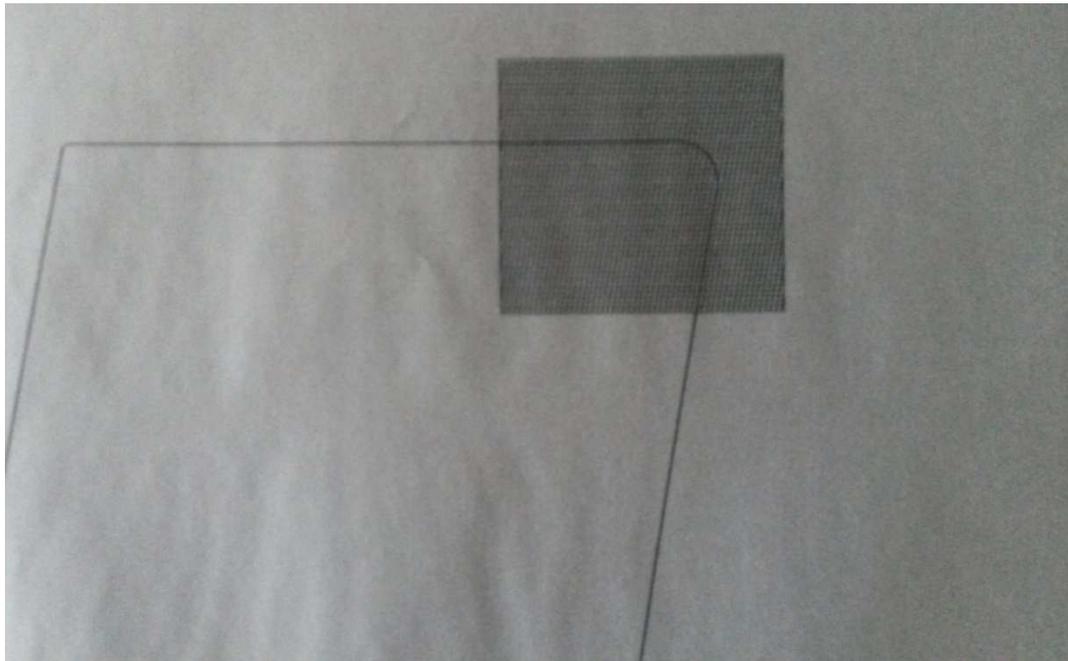


Figura 48: Perfilómetro Nikon V12a y sus controles principales [8]

Se siguieron los siguientes pasos para medir el desgaste de los filos de corte:

1. Se coloca una plantilla de comparación translúcida sobre la pantalla y se la ajusta mediante las trabas provistas. La misma contaba con una cuadrícula de 1mm de espaciado, en el mismo ángulo que el inserto. Al aumentar la imagen original 10 veces se logra sobre la plantilla un poder de resolución para las mediciones de 0,1mm [*Figura 49*].
2. Si los filos de ambos lados de un inserto han sido ensayados, se utilizaron los interruptores de iluminación para seleccionar la iluminación de superficie que permite distinguir el desgaste en un lado del inserto del perfil del lado opuesto.
3. Se centraron los insertos a medir bajo el objetivo.
4. Se enfocó la imagen para la altura del inserto.
5. Se centra el inserto de modo de alinear los bordes originales del filo con los de la plantilla superpuesta utilizando las perillas de regulación en X e Y.
6. Se toman fotografías de la imagen del inserto en la pantalla para ser luego observadas y poder medirse el desgaste [*Tabla 22*].



**Figura 49: Plantilla de comparación**

A continuación se presenta como ejemplo las imágenes tomadas de los insertos desgastados durante el mecanizado del material Q125 (HRC = 39,93) [Tabla 22]:

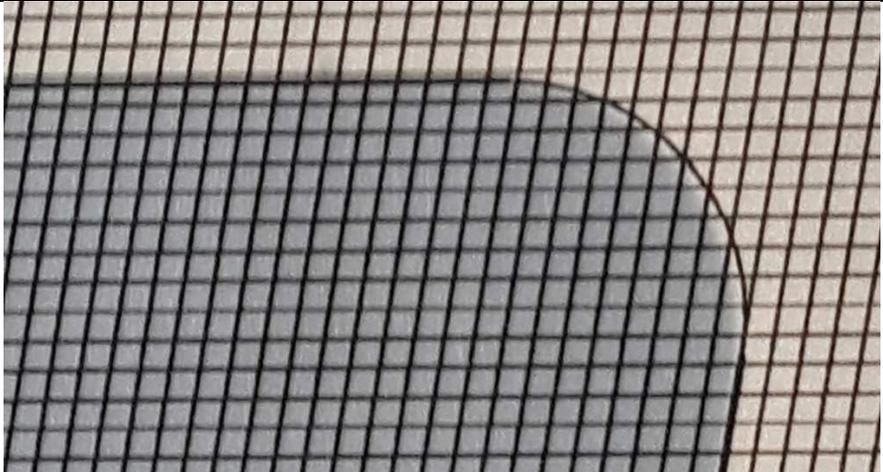
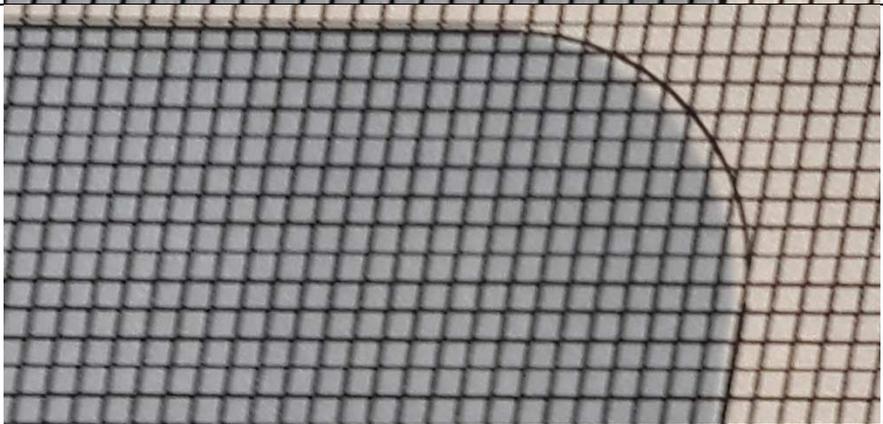
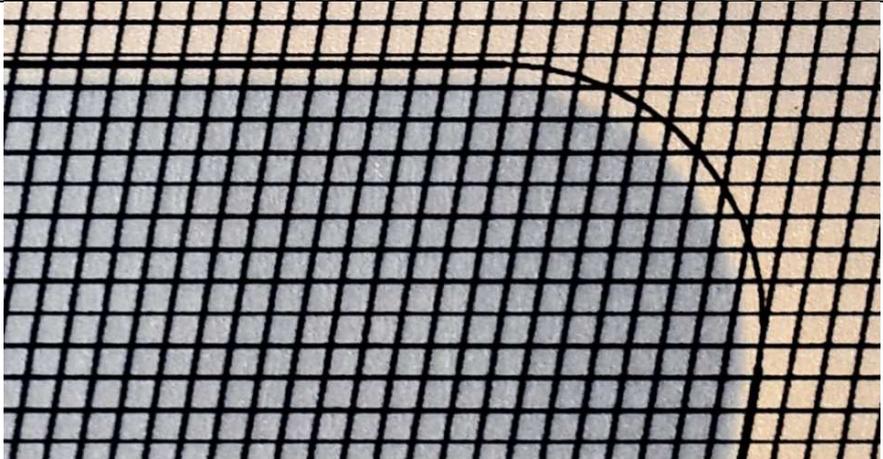
Tiempo de corte [s]	Imágenes de insertos utilizados en el torneado del material Q125 a 215m/min
t = 517	
t = 712	
t = 1034	

Tabla 22: Desgaste flanco de insertos de corte

ANEXO K: Datos de ensayos de mecanizado

Material	Velocidad [m/min]	Tc [min]	Desgaste [mm]	Tiempo [s]	Material	Velocidad [m/min]	Tc [min]	Desgaste [mm]	Tiempo [s]
TN80SS	450	1,25	0,00	0	P110	230	11,16	0,00	0
			0,04	26				0,06	314
			0,08	56				0,08	512
			0,15	128				0,12	764
			0,12	112				0,16	877
	400	2,50	<b>0,10</b>	75		<b>0,10</b>	670		
			0,00	0		215	17,23	0,00	0
			0,05	58				0,06	517
			0,06	78				0,07	712
			0,08	111				0,08	818
	0,11	150	<b>0,10</b>	1034					
	350	4,83	<b>0,10</b>	139		200	20,78	0,00	0
			0,00	0				0,04	532
			0,04	118				0,06	846
			0,05	192				0,09	1181
			0,08	244				0,12	1365
		0,12	324			0,17	1563		
		0,10	290			<b>0,10</b>	1247		
TN803CR	450	3,12	0,00	0	Q125	250	5,20	0,00	0
			0,03	58				0,06	178
			0,05	121				0,08	255
			0,08	168				<b>0,10</b>	312
			<b>0,10</b>	187				230	7,19
	0,00	0	0,08	397					
	0,03	125	0,05	215					
	0,05	223	0,14	497					
	0,08	312	0,17	568					
	350	8,79	<b>0,10</b>	351		<b>0,10</b>	431		
			0,00	0		215	15,05	0,00	0
			0,03	190				0,03	246
			0,04	289				0,04	450
			0,08	477				0,06	600
	<b>0,10</b>	527	0,09	852					
	300	11,90	0,00	0		<b>0,10</b>	903		
0,03			321	200	20,40	0,00	0		
0,06			532			0,02	515		
<b>0,10</b>			714			0,04	792		
						0,06	973		
		<b>0,10</b>	1224						

Tabla 23: Datos de ensayos de mecanizado, incluyendo Tiempo de vida útil [T<sub>c</sub>]

**ANEXO L: Interpolado de superficies con MATLAB R2014a**

El primer paso tomado para la interpolación de datos fue ordenarlos en una planilla de Excel de modo de que se simplificara la lectura de los mismos por parte del programa MATLAB. Se los ordenó entonces en una tabla reducida con una columna por magnitud a interpolar, incluyendo el peso ( $w$ ) que se le otorgaría a cada dato [*Tabla 24*]:

Vc	HRC	T <sub>c</sub>	Material	w
450	22,9	1,25	TN80SS	1
400	22,9	2,5	TN80SS	1
350	22,9	4,834792	TN80SS	1
450	20	3,124522	TN803CR	1
400	20	5,2	TN803CR	1
350	20	8,785267	TN803CR	1
300	20	11,9	TN803CR	1
230	37,32	11,16499	P110	1
215	37,32	17,23333	P110	1
200	37,32	20,77911	P110	1
250	39,93	5,202422	Q125	1
230	39,93	7,188517	Q125	1
215	39,93	15,04552	Q125	1
200	39,93	20,39661	Q125	1

Tabla 24: Datos de mecanizado reducidos

Estos datos originales productos de los ensayos de mecanizado se interpolaron mediante el siguiente código de MATLAB según distintas expresiones polinómicas para obtener una primera aproximación. (El símbolo “%” indica un comentario que no será compilado por el programa).

```
clc      %Limpieza de variables
clear all

t = 'datos_reducidos.xlsx';    %Lectura de base de datos

%Lectura de primera página de hoja de datos, correspondiente solo a datos empíricos
T = xlsread(t,1) ;
x = T(:,1); %Vc
y = T(:,2); %HRC
z = T(:,3); %Tc

for i = 1:4                    %Lazo que recorre las opciones de grado de polinomio en X
for j = 1:4                    %Lazo que recorre las opciones de grado de polinomio en Y

[f, R] = fit([x,y],z, strcat('poly',num2str(i),num2str(j)),'normalize', 'on');

%Representación gráfica
strcat('fig',num2str(i),num2str(j)) = figure; %Se nombra cada figura según el modelo que represente
plot (f, [x,y],z)
axis([200 450 20 40 0 50])
xlabel('Vc')
ylabel('HRC')
zlabel('Tc')

end
end
```

La interpolación propiamente dicha se realizó con la función *fit()*, siendo uno de sus argumentos el método según el cual se interpolará. Los métodos utilizados tienen nombres del tipo “*polyXY*” donde *X* e *Y* indican el grado máximo del polinomio en sus respectivas variables *x* e *y*. De este modo, se prueban los distintos ajustes logrados por 16 polinomios distintos, los cuales serán comparados entre sí tanto mediante una inspección visual de la solución como mediante una comparación de distintas medidas de dispersión de datos como la desviación estándar del modelo respecto de los datos iniciales, proporcionadas por la variable *R*.

Una vez descartados la mayoría de las soluciones por no corresponderse con la realidad que el modelo debería representar, se trabaja con un dado polinomio para reducir su desviación estándar respecto de los datos de entrada. Para ello se toman distintos conjuntos de datos extrapolados a partir de las curvas de Taylor y se los cargan en distintas páginas de la hoja de cálculo “*datos\_reducidos.xlsx*” de modo de poder ser comparados entre sí como muestra el código a continuación con el método “*poly31*” como ejemplo.

```
clear all
clc          %Limpieza de variables.
tx = 'datos_reducidos.xlsx';      %Se cargan datos de mecanizado ordenados según uso
for i = 1:4;

    T = xlsread(tx,i) ;           %Se lee en cada iteración una página distinta del archivo de Excel
    x = T(:,1); %Vc
    y = T(:,2); %HRC
    z = T(:,3); %Tc
    w = T(:,5); %Peso

    % Interpolación según el modelo Poly31 (cúbico en X, lineal en Y)
    % Se incluyen opciones para normalizar la muestra y para adjudicar distintos pesos a cada línea.

    [f, R] = fit ([x,y],z,'poly31','normalize','on','weights',w);

    fig1 = figure;                %Representación gráfica
    plot (f, [x,y],z)
    axis([150 500 20 40 -10 70])
    xlabel('Vc')
    ylabel('HRC')
    zlabel('Tc')
    end

    R          % Devuelve información acerca de que tan bien la interpolación
              % se ajusta a los datos de entrada (Desviación estándar, etc.)
```

Lo que se obtuvo fueron los coeficientes del polinomio que menor desviación estándar presentara, definiendo la fórmula a ser utilizada para predecir la vida útil de la herramienta de corte.