

INFLUENCIA DE LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA Y DEL ROCE SOBRE LA TEMPERATURA DE FILO DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE

Ing. N. E. Mazini ⁽¹⁾, Ing. J. M. Blanco ⁽¹⁾, Ing. D. O. Ziegler ⁽¹⁾, Ing. M. E. Puccinelli ⁽¹⁾

*(1) Dep. de Ingeniería. Universidad Nacional del Sur
Laboratorio de Metalurgia y Tecnología Mecánica
Av. Alem 1253 (8000)-Bahía Blanca-*

E-mail: nmazini@uns.edu.ar
dziegler@uns.edu.ar

RESUMEN

La temperatura máxima en el filo de una herramienta de corte está determinada por el calor generado en:

- La deformación plástica que sufre el material antes del plano de cizallamiento.
- El roce de la viruta sobre los planos de ataque e incidencia de la herramienta.
- La deformación secundaria que el roce origina sobre la viruta, en contacto con el plano de ataque.

Por medio de un cabezal dinamométrico se mide en una operación de torneado, de un acero templado y revenido con dureza Rc25, las fuerzas en las direcciones de corte (yy) de avance (zz) y de empuje (xx). Usando un circuito pieza inserto y una termocupla en la base del mismo, se calcula la temperatura en el filo.

Con los datos medidos se determinan los calores generados en la unidad de tiempo; en el corte, por roce en el plano de ataque y por diferencia entre ambos en la zona de deformación primaria.

Con estos datos se determinan los aumentos de temperatura que originan la deformación plástica en la zona de deformación primaria y por roce en el plano de ataque.

$$\theta_f = \theta_d + \theta_r + \theta_v + \theta_o$$

θ_f = Temperatura medida en el filo °C.

θ_d = Aumento de temperatura por deformación plástica primaria °C.

θ_r = Aumento de temperatura por roce en el plano de ataque °C.

θ_v = Aumento de temperatura por deformación y doblado de la viruta °C.

θ_o = Temperatura inicial del filo °C.

La ecuación que calcula θ_d se afecta de un coeficiente " C_1 ", para tener en cuenta el calor que pasa a la pieza y la que calcula θ_r de otro " C_2 ", para tener en cuenta el calor generado por deformación secundaria y doblado de la viruta debido al roce.

Planteadas las ecuaciones durante el desgaste del filo y velocidades de corte constante entre 100 y 200 m/min, se determinaron los valores de los coeficientes C_1 y C_2 .

Los resultados permiten evaluar el comportamiento de la mecánica de corte, a medida que progresa el desgaste de un inserto de metal duro recubierto con capas de óxido de aluminio y nitruro de titanio con la velocidad de corte.

Palabras Claves: Corte mecánico, deformación, roce, temperatura de filo.

1. INTRODUCCIÓN

La energía absorbida durante un proceso de corte se utiliza en:

a) Deformar el material en una zona de deformación primaria, anterior al plano de cizallamiento (Figura 1) en que el material deja de pertenecer a la pieza y pasa a formar la viruta.

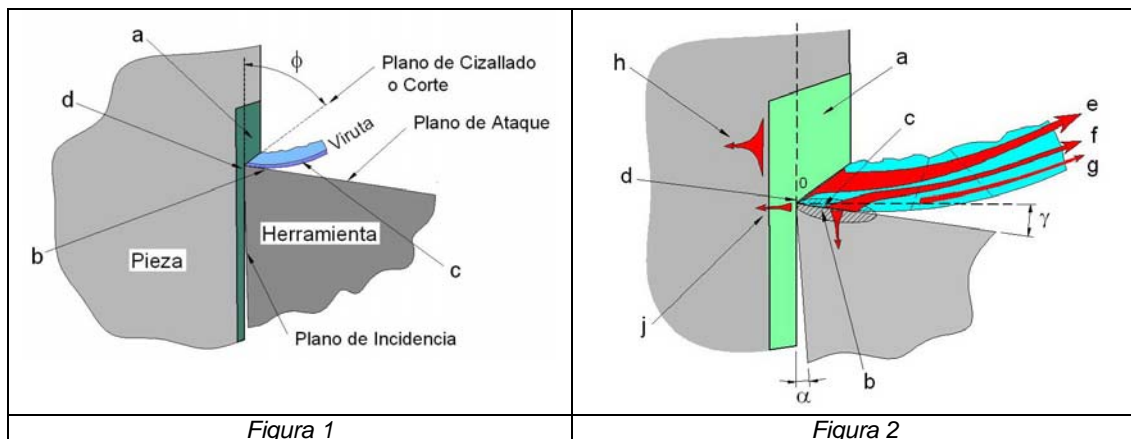
En esta zona el material es comprimido enérgicamente y sus granos deformados plásticamente tienden a orientarse paralelos al plano de cizallado, en el que se originan las mayores tensiones de corte.

b) El roce que produce la cara inferior de la viruta sobre el plano de ataque de la herramienta.

c) La deformación que ese roce origina en el material de la viruta, en una zona inmediata al plano de ataque y que abarca aproximadamente un tercio del espesor de la viruta “ av_m ”.

En esta zona también se consume energía por la deformación permanente que sufre la viruta por efecto del doblado.

d) En el roce que sobre el plano de incidencia de la herramienta ejerce el material de la pieza, que se recupera elásticamente de la deformación que sufrió en la zona inmediata a la de deformación primaria, después de superar el filo de la herramienta.



Cuando un material se deforma elásticamente, la energía mecánica necesaria se almacena como energía de deformación sin generar calor. En cambio, si se deforma plásticamente la mayor parte de la energía utilizada se transforma en calor.

En el maquinado el material es sometido a una gran deformación plástica, siendo la deformación elástica despreciable frente a la misma. Esto, unido al efecto del roce de la viruta sobre el plano de ataque, permite suponer que toda la energía suministrada en un proceso de corte se convierte en calor.

Por lo tanto las fuentes principales de calor en un proceso de maquinado (Figura 2) son: la fuerte deformación primaria (a), la de roce (b), y la de deformación secundaria de la viruta (c) originada por el efecto de roce de la viruta y su doblado.

Este calor es disipado en su mayor parte por la viruta (e), (f), (g) y en menor proporción por la pieza (h) y aún en cantidades menores por la herramienta en su plano de incidencia (j).

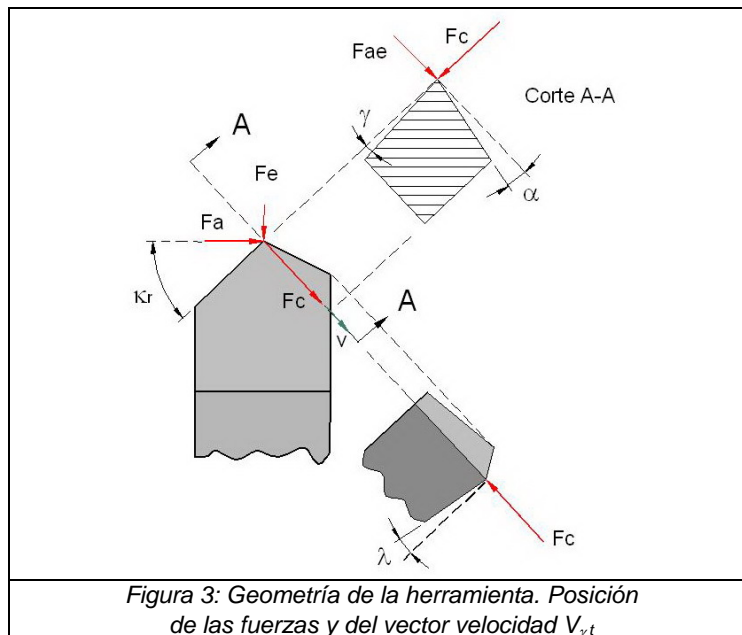
No obstante lo recién indicado, la temperatura máxima se alcanza sobre el filo principal de la herramienta (o) y no en la propia viruta, pues ésta fluye a gran velocidad, en cambio la herramienta permanece prácticamente estática durante el proceso de maquinado.

Si denominamos P a la potencia total consumida en un proceso de virutamiento y despreciando la originada por el roce del frente de corte del material recuperado elásticamente, sobre el plano de incidencia de la herramienta, podemos escribir (1):

$$P = P_d + P_r + P_v \quad (1)$$

Siendo “ P_d ” la potencia consumida por la deformación primaria en la zona anterior al plano de corte, “ P_r ” la originada por roce de la viruta en el plano de ataque y “ P_v ” por la deformación secundaria de la viruta y por su doblado.

Conocidas las fuerzas de corte tangencial “F_c”, la que se opone al avance “F_a” y la de empuje “F_e”, como se aprecia en la (Figura 3) por la geometría de corte se puede determinar la fuerza “F_{γt}” normal al filo de la herramienta en el plano de ataque.



Medido el ancho de la viruta en la dirección normal al filo “a_{v_m}” se puede determinar la relación de recalado de la viruta “r_c” (2):

$$r_c = \frac{a \times \text{sen}Kr}{a v_m} \quad (2)$$

Con el valor de r_c y el ángulo de ataque “γ_n” se determina el valor del ángulo ϕ (Figura 1), (3) que forma el plano de corte con otro vertical:

$$\phi = \arctan g \left(\frac{rc \times \cos \gamma_n}{1 - rc \times \text{sen} \gamma_n} \right) \quad (3)$$

Si llamamos “P_c” (4) a la potencia de corte:

$$P_c = F_c \times V_c \quad (4)$$

Siendo la velocidad de corte “V_c” (5):

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{60000} \quad \left(\frac{m}{s} \right) \quad (5)$$

Donde d es diámetro de corte en milímetros y n la revoluciones por minuto de la pieza.

Por proyección de las fuerzas de corte se puede determinar la fuerza correspondiente en el plano de ataque “F_{γt}” (*a) normal al filo, con los valores de V_c y los ángulos “γ_n”, “ϕ_n”, aplicando el teorema del seno se determina la velocidad tangencial en el plano de ataque “V_{γt}” (*b).

Por lo que la potencia consumida en el roce de la viruta sobre el plano de ataque valdrá (6):

$$P_r = V_{\gamma t} \times F_{\gamma t} \quad (6)$$

Por lo tanto la potencia consumida en la deformación del material antes del plano de corte (7):

$$P_d = P_c - P_r \quad (7)$$

Una parte del calor generado en esta zona pasa a la pieza. Weiner [1] Planteo un cálculo teórico del calor transferido, pero trabajos experimentales posteriores [2] y [3] indicaron que dicha transferencia resulta superior.

En el presente trabajo se cuantifica esta transferencia por medio de un coeficiente C₁ (8) proporcional a la superficie de contacto entre la zona de deformación primaria y el material de la pieza:

$$C_1 = 0.8 \times l_f \times \frac{a}{\text{tg}\Phi} \quad (8)$$

Siendo l_f la longitud activa del filo principal.

El incremento de la temperatura “ θ_d ” (9) que sufre el material al pasar por la zona de deformación primaria, frente al plano de corte será:

$$\theta_d = \frac{(1 - C_1)}{C_{C1}} \times Pd \quad (9)$$

Siendo C_{C1} (10) la capacidad de transferir calor que tiene la zona de deformación primaria:

$$C_{C1} = \rho \times C \times a \times e \times Vc \times 10^{-6} \left(\frac{J}{s^\circ K} \right) \quad (10)$$

Donde ρ = densidad del acero 7500 (Kg/m³).

C = capacidad calórico del acero 505 (J / Kg °K).

a = avance (mm/rev).

e = espesor de pasada (mm).

Vc = velocidad tangencial (m/s).

En la misma forma el aumento de temperatura originado por el roce de la viruta sobre el plano de ataque θ_r (11) se determina por:

$$\theta_r = \frac{Pr}{C_{C2}} \quad (11)$$

Siendo C_{C2} (12) la capacidad calórica de transmitir calor de la viruta :

$$C_{C2} = \rho \times C \times l_f \times l_v \times V \times r_c \quad (12)$$

Siendo l_f (13) longitud de filo activa y K_r el ángulo de desviación de filo:

$$l_f = \frac{e}{\text{sen}K_r} \quad (13)$$

l_v (14) es la longitud de contacto de la viruta

$$l_v = a_{vm} \times [1 + \text{tg}(\Phi + \gamma)] \quad (14)$$

Los estudios teóricos [4] para evaluar los aumentos de temperatura del filo originados por la deformación de la viruta y su doblado [3], [5] dan resultados inferiores a los evaluados experimentalmente.

En el presente trabajo se evalúa el valor de θ_v (15) afectando de un coeficiente “ C_2 ” al aumento de temperatura originado por el roce:

$$\theta_v = \theta_r \times C_2 \quad (15)$$

Para determinar el valor de C_2 (16) se mide durante las operaciones de torneado la temperatura del filo θ_f determinando así:

$$C_2 = (\theta_f - \theta_d - \theta_r - 20) \frac{C_{C2}}{Pr} \quad (16)$$

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se maquina en torno un acero SAE 4140 con dureza HRc 25, con un avance $a=0,1$ mm/rev y una profundidad $e = 1$ mm.

Se utilizan 3 velocidades de corte de 100,150 y 195 m/min.

La herramienta usada tiene un inserto de base P15 recubierto con óxido de Aluminio y Nitruro de Titanio con la siguiente geometría:

Ángulo de ataque $\gamma_n = 15^\circ$, de inclinación de filo $\alpha = 9^\circ$ de desviación de filo $K_r = 45^\circ$ y de elevación de filo $\lambda = 0^\circ$.

Por medio de un dinamómetro de fuerzas [6] se determinan las fuerzas de corte F_c , de avance F_a y de empuje F_e , durante la vida útil del filo.

Para distintos tiempos de maquinado, en función de la duración del filo, se retiran muestras de viruta y por medio de un microscopio de medición usando 50 aumentos y una escala graduada en 0,01mm/div, se mide el ancho " a_{vm} " de la viruta.

El registro de la temperatura se realiza por medio de un circuito Pieza-Plaquita-Porta Plaquita y una termocupla colocada en la base del inserto [7].

Llamando " p " a los milivoltios generados y T_b a la temperatura indicada por la termocupla en la base, la temperatura del filo T_f (17) será:

$$T_f = -6.46p + T_b \quad (17)$$

3. RESULTADOS

En las Tablas 1,2 y 3 se llevan los valores medidos de las fuerzas de corte " F_c ", de avance " F_a " y de empuje " F_e ", el ancho de la viruta normal al filo " a_{vm} " y la temperatura de filo " $\theta_f = T_f$ ". Con estos datos en las Tablas 4, 5 y 6 se indican los valores calculados de la relación de recalado " r_c ", el ángulo del plano de corte " ϕ_n ", la velocidad tangencial de la viruta normal al filo sobre el plano de ataque " $V\lambda t$ " y la componente de las fuerzas " $F\lambda t$ " en la misma dirección.

Tabla 1: Valores obtenidos por ensayo, velocidad de corte $V_c= 1,7$ m/s

Tiempo	t	s	100	400	1000	1500
Fuerza de corte	F_c	N	213	217	223	229
Fuerza de avance	F_a	N	224	227	230	234
Fuerza de empuje	F_e	N	124	127	132	136
Ancho de viruta	a_{vn}	mm	0,13	0,13	0,13	0,14
Temperatura de filo	T_f	°C	505	515	531	544

Tabla 2: Valores obtenidos por ensayo, velocidad de corte $V_c= 2,5$ m/s

Tiempo	t	s	100	300	600	800
Fuerza de corte	F_c	N	254	259	281	298
Fuerza de avance	F_a	N	232	246	261	271
Fuerza de empuje	F_e	N	172	177	181	184
Ancho de viruta	a_{vn}	mm	0,12	0,12	0,13	0,13
Temperatura de filo	T_f	°C	596	607	663	701

Tabla 3: Valores obtenidos por ensayo, velocidad de corte $V_c= 3,25$ m/s

Tiempo	t	s	100	200	375	500
Fuerza de corte	F_c	N	337	358	366	376
Fuerza de avance	F_a	N	239	263	286	302
Fuerza de empuje	F_e	N	198	212	226	236
Ancho de viruta	a_{vn}	mm	0,13	0,14	0,15	0,16
Temperatura de filo	T_f	°C	757	796	831	856

Tabla 4: Valores calculados con las ecuaciones (2) (3) y lo indicado en (*a) y (*b) para una velocidad de corte $V_c= 1,7$ m/s

Tiempo t	s	100	400	1000	1500
Relación de recalcado r_c		0,546	0,543	0,535	0,521
Ángulo de corte ϕ_n	°	23	23	22	22
Fuerza tangencial $F_{\gamma t}$	N	237	241	247	252
Velocidad tangencial $V_{\gamma t}$	m/s	0,640	0,641	0,632	0,617

Tabla 5: Valores calculados con las ecuaciones (2) (3) y lo indicado en (*a) y (*b) para una velocidad de corte $V_c= 2,5$ m/s

Tiempo t	s	100	300	600	800
Relación de recalcado r_c		0,606	0,581	0,559	0,546
Ángulo de corte ϕ_n	°	25	24	23	23
Fuerza tangencial $F_{\gamma t}$	N	275	288	301	310
Velocidad tangencial $V_{\gamma t}$	m/s	1,057	1,020	0,985	0,966

Tabla 6: Valores calculados con las ecuaciones (2) (3) y lo indicado en (*a) y (*b) para una velocidad de corte $V_c= 3,25$ m/s

Tiempo t	s	100	200	375	500
Relación de recalcado r_c		0,758	0,714	0,649	0,637
Ángulo de corte ϕ_n	°	32	30	27	27
Fuerza tangencial $F_{\gamma t}$	N	297	323	349	367
Velocidad tangencial $V_{\gamma t}$	m/s	1,630	1,567	1,455	1,433

En las Figuras 4, 5 y 6 se representan las potencias consumidas: en el corte "Pc", por roce "Pr", por deformación primaria "Pd" y por deformación y doblado de la viruta "Pv".

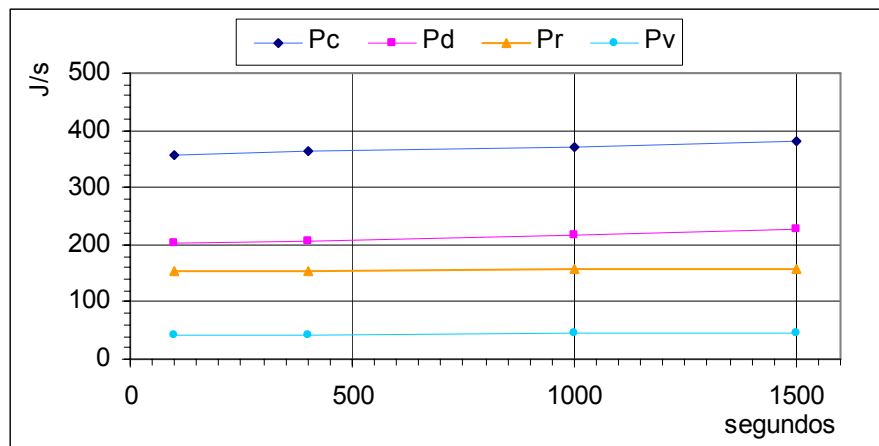


Figura 4 Potencia originada por el corte Pc, por la deformación del material de pieza a Pd y por la deformación y doblado de la viruta Pv -Velocidad 1,7 m/s.

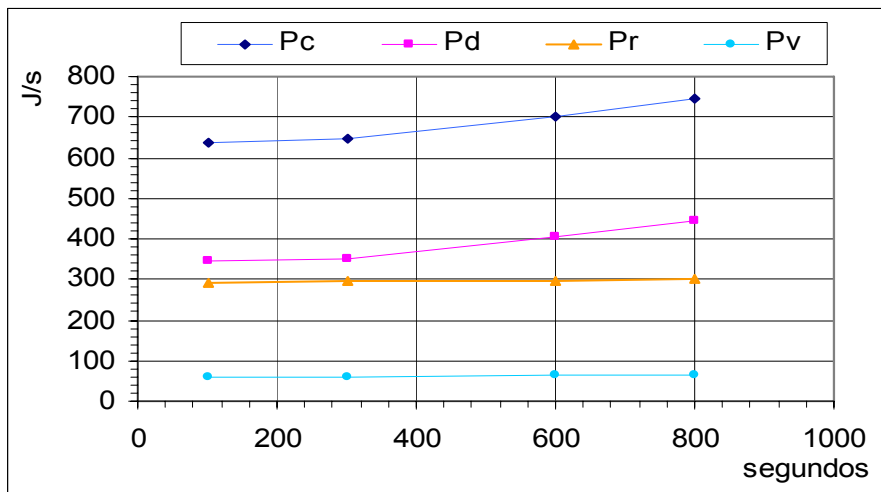


Figura 5 Potencia originada por el corte Pc, por la deformación del material de pieza Pd y por la deformación y doblado de la viruta Pv -Velocidad 2,5 m/s.

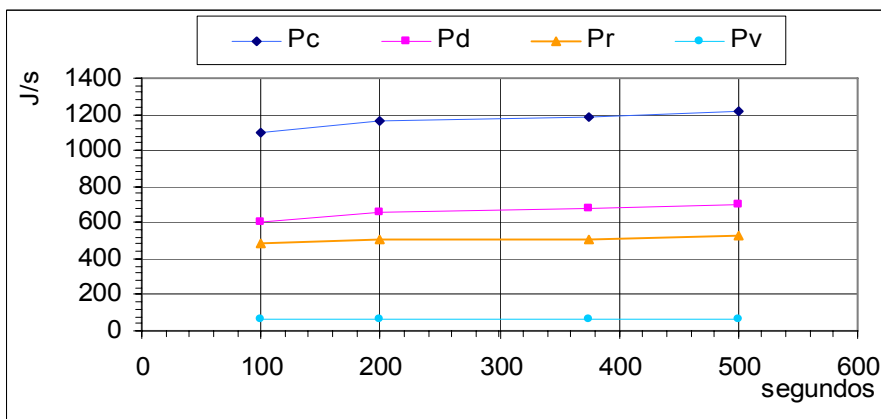


Figura 6 Potencia originada por el corte Pc, por la deformación del material de pieza Pd y por la deformación y doblado de la viruta Pv -Velocidad 3,25 m/s.

En las Figuras 7, 8 y 9 se representan los valores de la temperatura de filo " $\theta_f=T_f$ " y las variaciones de temperatura originadas por la deformación primaria " $\theta_d=T_d$ ", por el roce " $\theta_r=Tr$ " y por la deformación y doblado de la viruta " $\theta_v=Tv$ ".

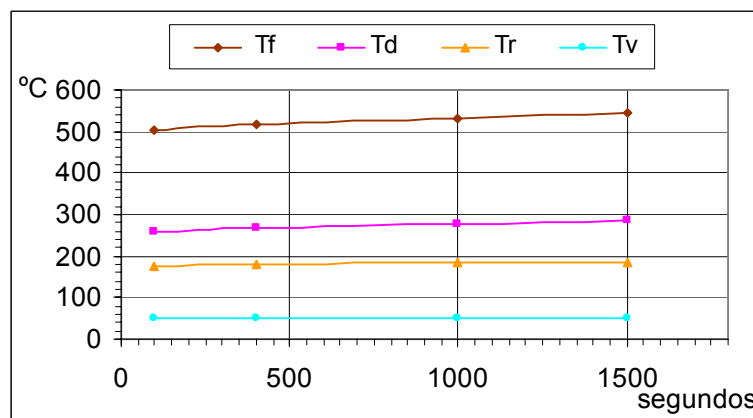


Figura 7 Temperatura de filo Tf y variaciones de las temperaturas Td, Tr y Tv para velocidad de 1,7 m/s.

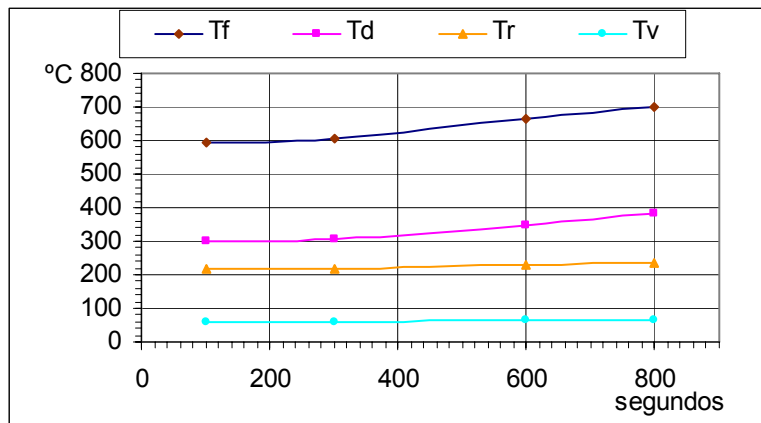


Figura 8. Temperatura de filo T_f y variaciones de las temperaturas T_d , T_r y T_v para velocidad 2,5 m/s.

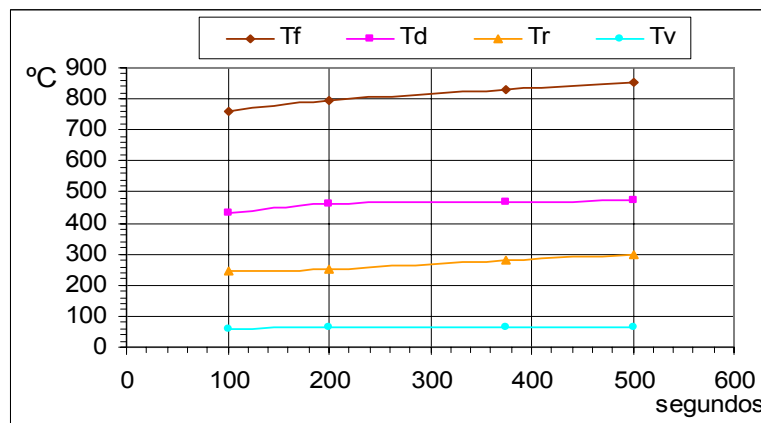


Figura 9. Temperatura de filo T_f y variaciones de las temperaturas T_d , T_r y T_v para velocidad 3,25 m/s.

El aumento de la temperatura en el filo se produce principalmente por el aporte de la deformación en la zona primaria, del orden del 50 al 57%; el roce de la viruta origina un incremento entre el 35 y 37% y la deformación y doblado de la viruta en un 10%. Durante el maquinado el aumento de la temperatura del filo se debe al desgaste que sufre éste y al canal que el roce de la viruta origina en el plano de ataque y en menor cantidad al incremento del recalado de la viruta, pues el ángulo de corte disminuye poco. Los coeficientes C_1 y C_2 varían poco durante el maquinado pero si lo hacen disminuyendo con la velocidad. En la Figura 10 se graficaron sus valores en función de la velocidad de corte.

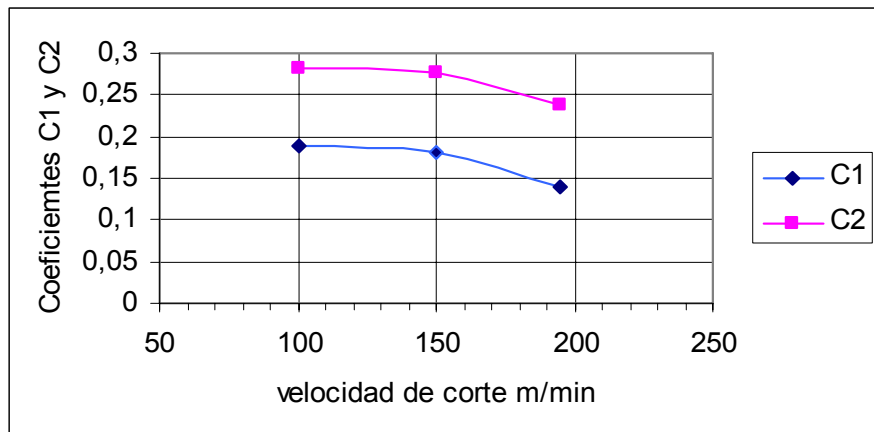


Fig. 10. C_1 coeficiente para evaluar la cantidad de calor que pasa a la pieza.
 C_2 coeficiente para evaluar el aumento de temperatura originado por la deformación y el doblado de la viruta.

4. CONCLUSIONES

--En una operación de maquinado por medio de un coeficiente C_1 , se puede determinar la cantidad de calor que pasa a la pieza, originada por la deformación plástica del material antes del plano de corte,.

$$C_1 = 0.8 \times l_f \times \frac{a}{\text{tg}\Phi}$$

Siendo "a" el avance, " l_f " la longitud de filo Ecuación (13) y " Φ " el ángulo de corte Ecuaciones (2 y 3)

El resto contribuye a elevar la temperatura del filo de la herramienta " θ_d ".

$$\theta_d = \frac{(1 - C_1)}{C_{C1}} \times Pd$$

Siendo "Pd" la potencia consumida en deformar el material plásticamente antes del plano de corte Ecuaciones (4, 6 y 7) y " C_{C1} " Ecuación (10) su capacidad calórica.

--El aumento de temperatura originado por el roce se puede obtener como:

$$\theta_r = \frac{Pr}{C_{C2}}$$

Donde "Pr" es la potencia de roce Ecuación (6) y " C_{C2} " Ecuación (12) la capacidad calórica para transmitir calor de la viruta.

--Por medio de un coeficiente C_2 que se obtiene experimentalmente, midiendo la temperatura del filo " θ_r " y se aplica a la potencia de roce, se determina el aumento de temperatura " θ_v " originado por la deformación plástica y doblado de la viruta.

$$\theta_v = \theta_r \times C_2$$

--La temperatura de filo se calcula como:

$$\theta_f = \theta_d + \theta_r + \theta_v + 20 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

--En una operación de maquinado los coeficientes C_1 y C_2 varía poco durante la vida útil del filo, en cambio al aumentar la velocidad de corte los mismos disminuyen y para las

condiciones de maquinado estudiadas se pueden expresar sus valores en función de la velocidad "Vc" como:

$$C_1 = 0.335 - 0.0005 \times Vc$$

$$C_2 = 0.247 - 0.0005 \times Vc$$

--El aumento de la temperatura del filo se produce principalmente por el aporte de calor dado por la deformación plástica del material en la zona anterior al plano de corte (50 al 57%). El roce de la viruta origina un incremento del 35 al 37% y la deformación plástica y el doblado de la misma aproximadamente un 10%.

5. REFERENCIAS

- [1] Weiner J.H. Shear Plane Temperature Distribution in Orthogonal Cutting TRAS ASME Vol. 77 N° 8 page 1331 – 1953
- [2] Nakayama K. Temperature Rise of Working piece During Metal Cutting. Yokohama National University Vol.I page 1 -1956
- [3] G. Bootroyd Temperature in Orthogonal Metal Cutting. Proceedings Inst. Mechanical Engineers Vol. 29 page 784-805 – 1963
- [4] A.C.Rapier. A Theoretical Investigation of the temperature Distribution in the Heat Cutting Process British Apd. Phys. 5(11)page 400-405-1954
- [5] Chiou , Chen, Lin Lu, Ian Cole Prediction of heat transfer behaviour of carbide insert with embedded hole pipe for dry machining IMECE Proceeding 2002 ASME.
- [6] Mazini N. Blanco J. Iurman L. Ziegler D. Valea J. Cabezal Dinamométrico para medir fuerzas en torneado usando insertos de metal duro. Anales Jornadas SAM 1999 Trabajo 5.52
- [7] Mazini N. Blanco J. Ziegler D. Diaz P. Medición de la temperatura en un maquinado sin refrigerante. Actas del Congreso SAM/CONAMET 2005.

Agradecimientos.

Los autores desean agradecer a la SGCyT de la Universidad Nacional del Sur por subsidiar el proyecto en el que se enmarca el presente trabajo. También agradecer al Laboratorio de Metalurgia del Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur por el apoyo prestado y al alumno de Ingeniería Industrial Marcio Yani Schlenker por su desinteresada colaboración.