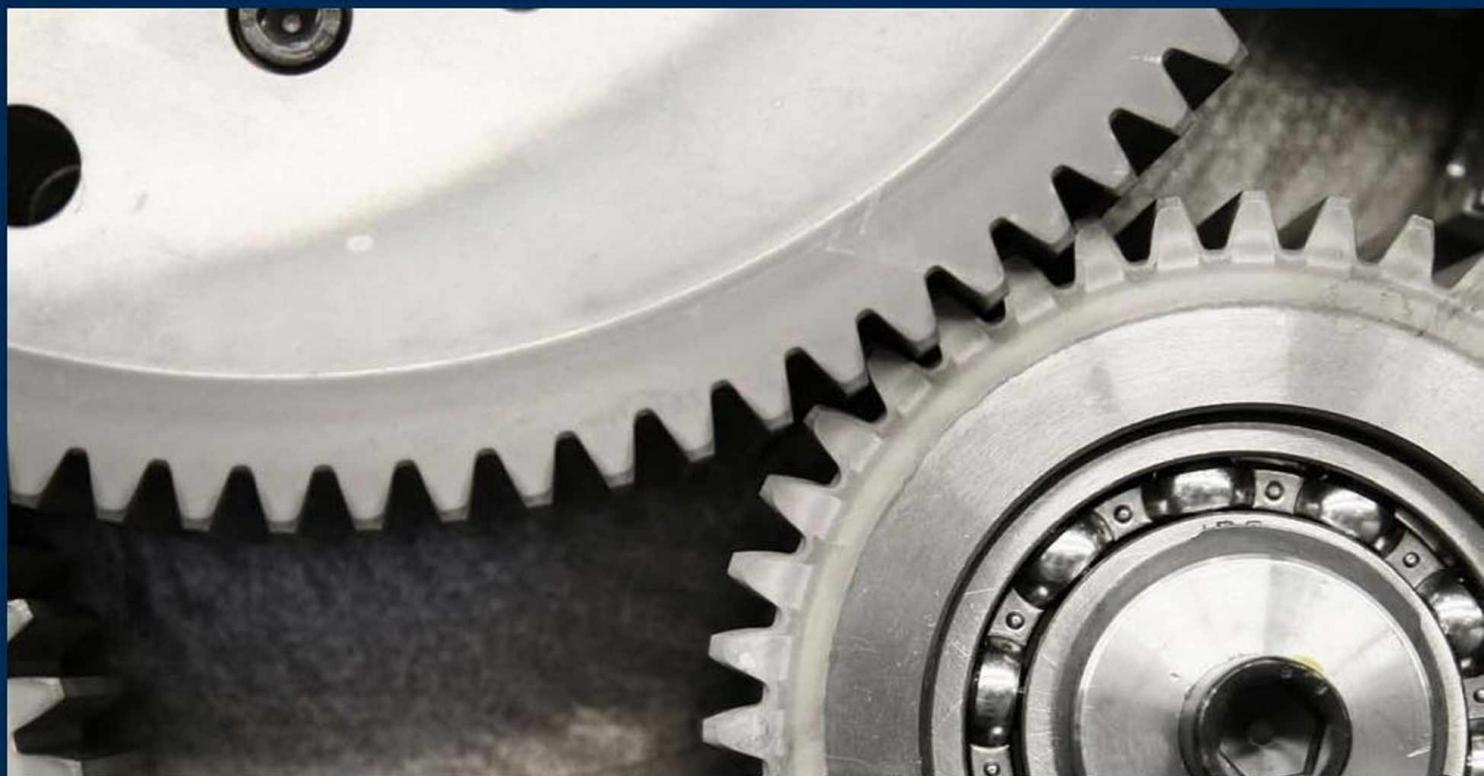




Ejercicios y problemas de mecanizado



Eva María Rubio Alvir
Miguel Ángel Sebastián Pérez



Ejercicios y problemas de mecanizado

Ejercicios y problemas de mecanizado

Eva María Rubio Alvir
Miguel Ángel Sebastián Pérez

Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación.
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED).



Prentice Hall
es un sello editorial de



Eva María Rubio Alvir, Miguel Ángel Sebastián Pérez

Ejercicios y problemas de mecanizado

PEARSON EDUCACIÓN, S.A., Madrid, 2011

ISBN: 978-84-8322-765-7

ISBN UNED: 978-84-362-5691-2

Materia: 62, Tecnología en General

Formato: 195 × 250 mm

Páginas: 112

Todos los derechos reservados.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (*arts. 270 y sgts. Código penal*).

Diríjase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos: www.cedro.org), si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de esta obra.

DERECHOS RESERVADOS

© 2011, PEARSON EDUCACIÓN, S. A.

C/ Ribera del Loira, 28

28042 Madrid (España)

www.pearsoneducacion.com

PRENTICE HALL es un sello editorial autorizado de PEARSON EDUCACIÓN.

ISBN: 978-84-8322-765-7

ISBN UNED: 978-84-362-5691-2

Depósito Legal: M-8322-765-7

Equipo editorial:

Editor: Miguel Martín-Romo

Técnico editorial: Esther Martín

Equipo de producción:

Director: José Antonio Clares

Técnico: Isabel Muñoz

Diseño de cubierta: Equipo de Diseño de PEARSON EDUCACIÓN, S. A.

Composición: JOSUR TRATAMIENTO DE TEXTOS, S.L.

Impreso por:

Nota sobre enlaces a páginas web ajenas: Este libro puede incluir enlaces a sitios web gestionados por terceros y ajenos a PEARSON EDUCACIÓN S.A. que se incluyen solo con finalidad informativa. PEARSON EDUCACIÓN S.A. no asume ningún tipo de responsabilidad por los daños y perjuicios derivados del uso de los datos personales que pueda hacer un tercero encargado del mantenimiento de las páginas web ajenas a PEARSON EDUCACIÓN S.A. y del funcionamiento, accesibilidad o mantenimiento de los sitios web no gestionados por PEARSON EDUCACIÓN S.A. Las referencias se proporcionan en el estado en que se encuentran en el momento de publicación sin garantías, expresas o implícitas, sobre la información que se proporcione en ellas.

IMPRESO EN ESPAÑA - PRINTED IN SPAIN

Este libro ha sido impreso con papel y tintas ecológicos.

Índice

Prólogo	VII
Presentación	IX
Ejercicio 1. Geometría del corte ortogonal	1
Ejercicio 2. Fuerza y potencia de corte	4
Ejercicio 3. Fuerza y potencia de corte	7
Ejercicio 4. Torno: cilindrado.....	10
Ejercicio 5. Torno: cilindrado.....	12
Ejercicio 6. Torno: cilindrado.....	15
Ejercicio 7. Torno: cilindrado.....	17
Ejercicio 8. Fresado frontal	21
Ejercicio 9. Fresado frontal	23
Ejercicio 10. Fresado frontal	25
Ejercicio 11. Fresado periférico	27
Ejercicio 12. Taladrado	29
Ejercicio 13. Taladrado	30
Ejercicio 14. Taladrado	32
Ejercicio 15. Taladrado	34
Ejercicio 16. Rectificado	36
Ejercicio 17. Rectificado	38
Ejercicio 18. Rectificado	40
Ejercicio 19. Movimiento principal rectilíneo: cepillado	42
Ejercicio 20. Movimiento principal rectilíneo: cepillado	44
Ejercicio 21. Movimiento principal rectilíneo: brochado	46
Ejercicio 22. Movimiento principal rectilíneo: brochado	48
Ejercicio 23. Otros procesos: fresado químico	49
Ejercicio 24. Vida de la herramienta	50
Ejercicio 25. Vida de la herramienta	53
Ejercicio 26. Vida de la herramienta: torno.....	56
Ejercicio 27. Vida de la herramienta: torno.....	58
Ejercicio 28. Costes en el mecanizado.....	61
Ejercicio 29. Planificación de procesos de mecanizado.....	63
Bibliografía	77
Anexos	79
Anexo 1. Símbolos y unidades.....	81
Anexo 2. Figuras y formulario	83
Anexo 3. Tablas de materiales.....	97

Prólogo

Los procesos de mecanizado en la fabricación mecánica ocupan puestos de relevancia a la hora de afrontar con calidad y economía la creación de piezas en múltiples materiales, formas, tamaños, precisión, acabado y número.

Por otra parte, el adecuado conocimiento de los principios básicos de los procesos de mecanizado facilita el desarrollo de nuevas tecnologías, ya presentes hoy en día, tales como el mecanizado a alta velocidad, el micromecanizado, la creación de superficies estructuradas, y el mecanizado de los nuevos materiales como, por ejemplo, los nanomateriales. Áreas, todas ellas, de innegable futuro por las que se podrán obtener componentes apropiados para novedosas prestaciones en nuevos campos útiles, tanto en la mecánica tradicional como en los microsistemas electromecánicos.

El presente libro aborda el tratamiento de la planificación práctica de los procesos de mecanizado a través de un repertorio de ejemplos tratados tanto desde la perspectiva práctica de taller como desde la científica en la que se analiza el proceso acorde a su fenomenología. El texto es un complemento apropiado a las tradicionales obras que estudian la materia desde una perspectiva teórica, o meramente descriptiva, y de aquellas otras más orientadas a calculistas que planifican operaciones de taller. También puede ser de gran ayuda para aquellos ingenieros que tengan que desarrollar aplicaciones informáticas de apoyo a los procesos de fabricación.

Los autores han desarrollado una variada y detallada colección de ejercicios resueltos con los que será posible su comprensión y aprehensión para los alumnos que cursan la disciplina tanto a través de la metodología a distancia como para la presencial, y también para ingenieros que deben abordar estas tareas sin haberlas cursado.

El trabajo continuado desde tiempo atrás de los doctores Sebastián y Rubio, garantiza la solvencia del enfoque y tratamiento de los problemas abordados, pues vienen impartiendo este tipo de enseñanzas en la Universidad Nacional de Educación a Distancia desde 1986 y 2001 respectivamente, y de forma ocasional en cursos y seminarios impartidos en otras universidades. En la actualidad son profesores del Máster Universitario de Ingeniería Avanzada de Fabricación de la UNED y colaboran en otros másteres oficiales en las universidades de Cádiz, Málaga y Pública de Navarra.

*Jesús María Pérez García.
Catedrático de Ingeniería de los Procesos de Fabricación
de la Universidad Politécnica de Madrid*

Presentación

En la enseñanza de materias tecnológicas suele ser común el recurso al empleo de «ejercicios y problemas» considerando ambos términos en sus acepciones específicas, tales como «trabajos prácticos que pueden servir de complemento y comprobación de la enseñanza teórica» y «planteamiento de situaciones cuya respuesta desconocida debe ser obtenida por medios sistemáticos de fundamentación científica»; ahora bien, también cabe resumir y agrupar ambos conceptos en el término genérico de «ejercicios», entendidos éstos como «acción de ejercitar». En la presente obra se ha partido de la consideración de la dualidad «complementos formativos a la enseñanza teórica/soluciones a situaciones técnicas», pero cada vez ha ido tomando más cuerpo el «fomento de acciones para ejercitarse en actividades ingenieriles atingentes al mecanizado». Por ello se ha concluido con la consideración genérica como «ejercicios» a los problemas y ejercicios desarrollados a lo largo de sus páginas.

Por tanto, el libro es un recopilatorio de 29 ejercicios resueltos, en los que se abordan los principales aspectos científico-tecnológicos de los distintos procesos de mecanizado. En particular, se considera el estudio de la geometría y la cinemática de los distintos procesos de conformado por eliminación de material, el cálculo de la fuerza y de la potencia puestas en juego, las condiciones de corte y el análisis de otras cuestiones asociadas a la realización industrial de tales procesos; entre ellas, la vida de la herramienta, la economía del mecanizado y la planificación de procesos.

Incluye, además, tres anexos con material complementario que permiten la resolución de los ejercicios y problemas así como una mejor comprensión de los mismos. Concretamente, se incluyen: un listado con los principales símbolos y unidades empleados, un conjunto de figuras y un formulario asociado en el que se recogen las expresiones básicas, y una serie de tablas con algunas de las principales propiedades de los materiales de las piezas y herramientas más habitualmente usadas en los procesos de mecanizado por arranque de viruta.

El libro, de nivel universitario y diseñado bajo la filosofía del nuevo Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), se adapta plenamente a la metodología de enseñanza universitaria de grados y másteres de Ingeniería, permite completar la formación práctica dada en los manuales clásicos y realizar un aprendizaje autónomo al contar con las explicaciones de las soluciones dadas a los ejercicios y problemas planteados.

Los autores

EJERCICIO 1

Geometría del corte ortogonal

Calcular el ángulo de deslizamiento, el coeficiente de rozamiento y la tensión dinámica de deslizamiento para un proceso de mecanizado en el que se dan las siguientes condiciones:

<i>Material</i>	<i>Acero</i>
Velocidad de corte	$V = 0,5 \text{ m/s}$
Ángulo de desprendimiento	$\gamma = 15^\circ$
Espesor de la viruta no deformada	$h_1 = 0,15 \text{ mm}$
Ancho de corte	$b = 4 \text{ mm}$
Longitud de la viruta no deformada	$l_1 = 250 \text{ mm}$
Longitud de la viruta	$l_2 = 110 \text{ mm}$
Fuerza en el plano normal	$N_c = 50 \text{ daN}$
Fuerza colineal con la velocidad	$F_c = 100 \text{ daN}$

SOLUCIÓN

Para la resolución de este ejercicio se va a tomar el modelo de corte ortogonal del plano de deslizamiento propuesto por Pijspanen y recogido esquemáticamente en esta figura:

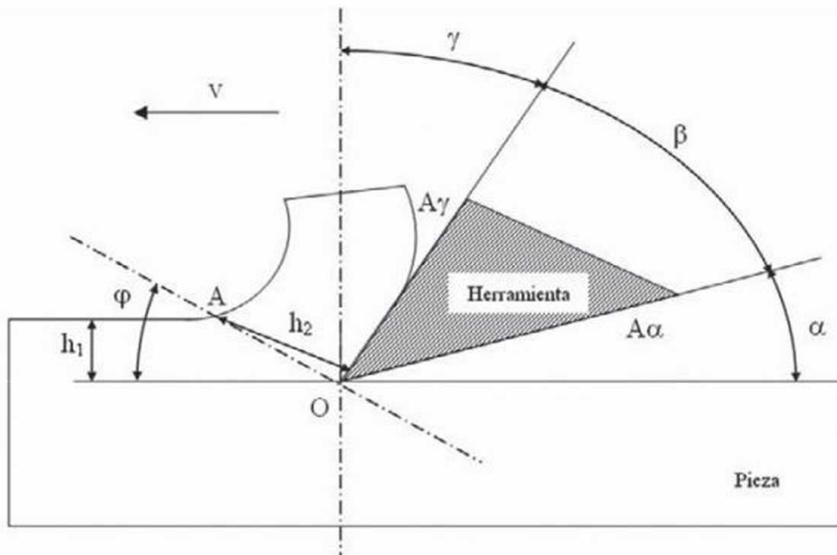


Figura 1.1. Modelo esquemático del plano de deslizamiento.

Donde:

- A_γ , *cara de desprendimiento*, es sobre la que desliza la viruta.
- A_α , *cara de incidencia*, es la que queda siempre frente a la superficie mecanizada.
- γ , *ángulo de desprendimiento*, es el comprendido entre la *cara de desprendimiento* y el plano normal a la superficie de la pieza que está siendo mecanizada.
- α , *ángulo de incidencia*, es el formado por la *cara de incidencia* con la superficie que ya ha sido mecanizada.
- β , *ángulo de filo o de corte*, es el comprendido entre las caras A_γ y A_α .
- φ , *ángulo de deslizamiento*, es el que identifica el plano sobre el que desliza la viruta deformada.

Para hallar el ángulo de rozamiento, ρ , se aplica la relación geométrica existente entre los ángulos de desprendimiento y de rozamiento y las fuerzas indicadas en el proceso de mecanizado:

$$\operatorname{tg}(\rho - \gamma) = \frac{N_c}{F_c}$$

$$\operatorname{tg}(\rho - \gamma) = \frac{N_c}{F_c} = \frac{50}{100} \Rightarrow \operatorname{tg}(\rho - \gamma) = 0,5 \Rightarrow \operatorname{tg}(\rho - \gamma) = 26,57^\circ \Rightarrow \rho = 41,57^\circ$$

Una vez determinado el ángulo de rozamiento, se puede calcular el coeficiente de rozamiento, μ , si se tiene en cuenta la siguiente relación:

$$\mu = \operatorname{tg}\rho = \operatorname{tg}41,57^\circ = 0,88 \approx 0,9$$

Para el cálculo del ángulo de deslizamiento es necesario determinar el factor de recalado con los datos aportados en el enunciado, de acuerdo a la siguiente relación:

$$l_1 \cdot h_1 = l_2 \cdot h_2 \Rightarrow \xi = \frac{h_2}{h_1} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{250}{110} = 2,27$$

Con el valor obtenido del factor de recalado y el dato del ángulo de desprendimiento, se puede calcular el ángulo de deslizamiento:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\cos\gamma}{\xi - \operatorname{sen}\gamma} = \frac{\cos 15^\circ}{2,27 - \operatorname{sen} 15^\circ} = 0,48 \Rightarrow \varphi = 25,65^\circ \approx 26^\circ$$

Para calcular la tensión dinámica de deslizamiento, τ_s , se opera de esta forma:

$$\tau_s = \frac{F_s}{b \cdot h_1} \cdot \operatorname{sen}\varphi$$

$$F_s = R \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma) = \sqrt{N_c^2 + F_c^2} \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)$$

$$F_s = \sqrt{50^2 + 100^2} \cdot \cos(25,65^\circ + 41,57^\circ - 15^\circ) = 111,8 \cdot \cos 52,22^\circ = 68,49 \text{ daN}$$

$$\tau_s = \frac{68,49}{4 \cdot 0,15} \cdot \text{sen}25,65 = 49,41 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2} \approx 50 \frac{\text{daN}}{\text{mm}^2}$$

En la siguiente figura se puede ver la descomposición de las fuerzas en las distintas direcciones. De esta figura se pueden deducir las relaciones anteriormente indicadas entre los distintos ángulos y fuerzas.

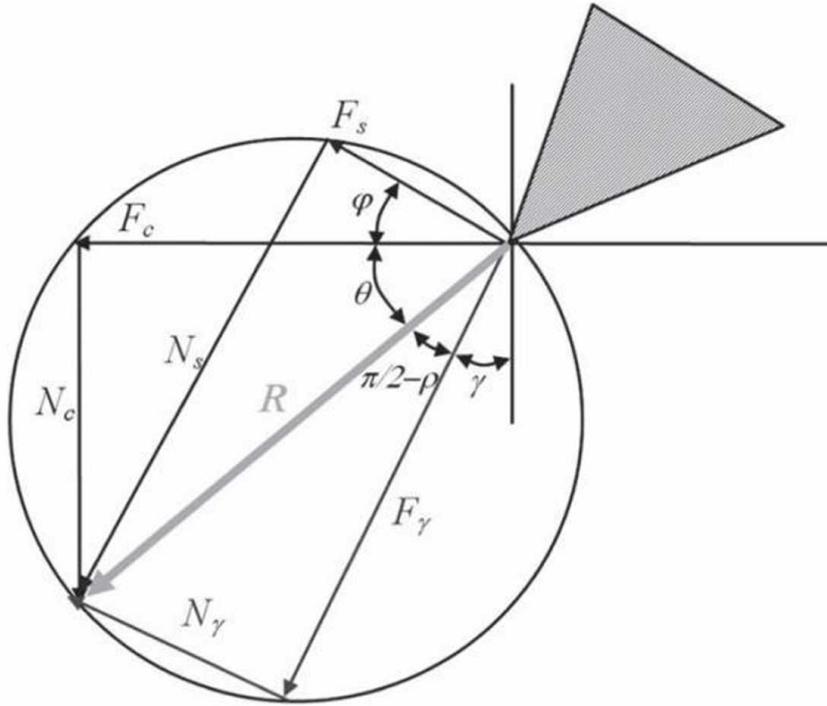


Figura 1.2. Descomposición de la fuerza resultante de corte, R , según las direcciones del corte, del plano de deslizamiento y del plano de desprendimiento.

EJERCICIO 2

Fuerza y potencia de corte

Determinar la fuerza ejercida sobre la herramienta y la potencia necesaria para realizar el corte ortogonal de una aleación de aluminio cuyos parámetros son:

Ángulo de desprendimiento	$\gamma = 25^\circ$
Espesor de la viruta no deformada	$h_1 = 0,11 \text{ mm}$
Ancho de corte	$b = 4,25 \text{ mm}$
Tensión dinámica de deslizamiento	$\tau_s = 310 \text{ N/mm}^2$
Longitud de la viruta no deformada	$l_1 = 130 \text{ mm}$
Longitud de la viruta	$l_2 = 20 \text{ mm}$
Coefficiente aparente de rozamiento	$\mu = 0,6$
Velocidad de corte	$V = 40 \text{ m/min}$

SOLUCIÓN

Para calcular la fuerza total ejercida sobre la herramienta es necesario conocer el valor de la resultante de fuerzas, R , que actúan sobre ella (Figura 2.1), así como el de las fuerzas en que puede descomponerse y el de los ángulos que las relacionan con ella (Figura 2.2).

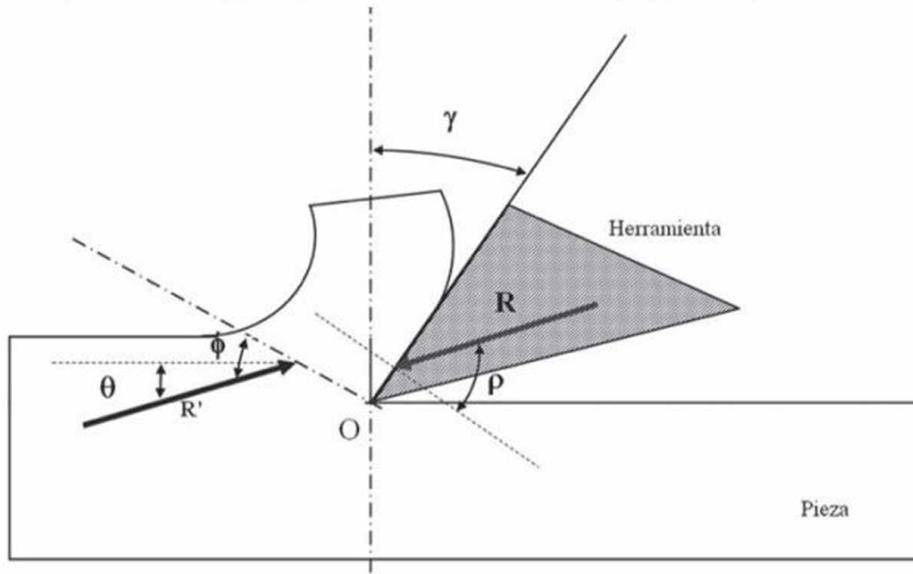


Figura 2.1. Equilibrio de fuerzas sobre la viruta en el corte ortogonal.

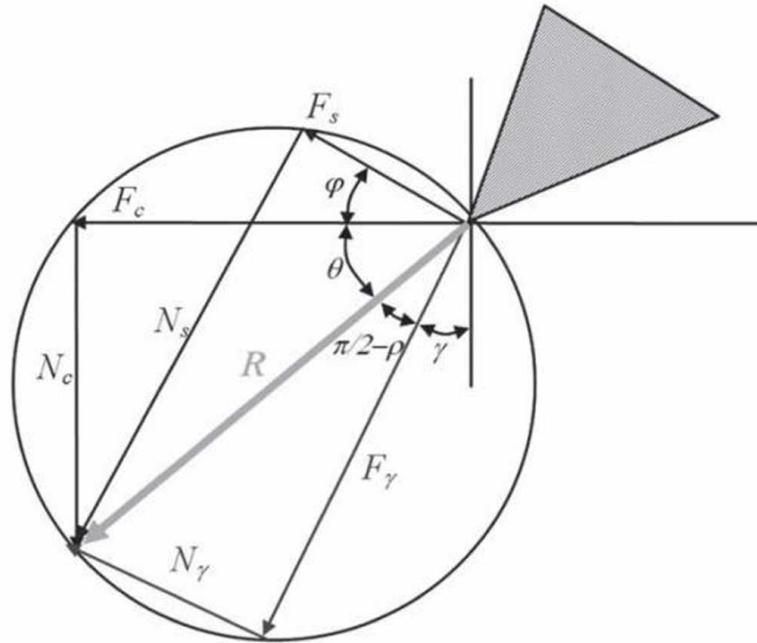


Figura 2.2. Descomposición de la resultante de fuerzas, R , que actúan sobre la herramienta de corte según la dirección del corte, del plano de deslizamiento y del plano de desprendimiento.

Como además de la fuerza ejercida sobre la herramienta se pide calcular la potencia necesaria para llevar a cabo el corte de las distintas fuerzas en que puede descomponerse la resultante, es interesante saber cuál es la fuerza de corte, F_c , puesto que va a permitir calcular la potencia necesaria con tan solo multiplicar su valor por la velocidad de corte V .

Hay que tener en cuenta los datos de partida γ , h_1 , b , τ_s , l_1 , l_2 , μ y V y las siguientes relaciones:

$$F_s = \tau_s \cdot b \cdot \frac{h_1}{\text{sen}\varphi}$$

$$R = \frac{F_s}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

$$F_c = R \cdot \cos(\rho - \gamma)$$

$$F_c = \tau_s \cdot b \cdot h_1 \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\text{sen}\varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

donde todo es conocido salvo φ y ρ , que a su vez se pueden calcular con los datos del problema y de las siguientes expresiones:

$$\text{tg}\varphi = \frac{\cos\gamma}{\xi - \text{sen}\gamma}$$

$$\rho = \text{arctg}\mu$$

siendo:

$$\xi = \frac{l_1}{l_2} = \frac{130}{20} = 6,5$$

Con los valores numéricos de las anteriores expresiones se obtiene:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{\cos 25^\circ}{6,5 - \operatorname{sen} 25^\circ}\right) = 8,48^\circ$$

$$\rho = \operatorname{arctg} 0,6 = 30,96^\circ$$

$$F_c = \tau_s \cdot b \cdot h_1 \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\operatorname{sen}\varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

$$F_c = 310 \cdot 4,25 \cdot 0,11 \cdot \frac{\cos(30,96^\circ - 25^\circ)}{\operatorname{sen} 8,48^\circ \cdot \cos(8,48^\circ + 30,96^\circ - 25^\circ)} = 986,09 \text{ N}$$

$$R = \frac{F_c}{\cos(\rho - \gamma)} = \frac{986,09}{\cos(30,96^\circ - 25^\circ)} = 996,05 \text{ N} \approx 1 \text{ kN}$$

$$\dot{W} = F_c \cdot V = 996,05 \cdot \frac{40}{60} = 664,03 \text{ W} \approx 664 \text{ W}$$

EJERCICIO 3

Fuerza y potencia de corte

Determinar la fuerza ejercida sobre la herramienta y la potencia necesaria para realizar el corte ortogonal de una aleación de aluminio cuyos parámetros son:

Ángulo de desprendimiento	$\gamma = 20^\circ$
Espesor de la viruta no deformada	$h_1 = 0,115 \text{ mm}$
Ancho de corte	$b = 4 \text{ mm}$
Tensión dinámica de deslizamiento	$\tau_s = 310 \text{ N/mm}^2$
Longitud de la viruta no deformada	$l_1 = 125 \text{ mm}$
Longitud de la viruta	$l_2 = 30 \text{ mm}$
Coefficiente aparente de rozamiento	$\mu = 0,6$
Velocidad de corte	$V = 35 \text{ m/min}$

SOLUCIÓN

Para calcular la fuerza total ejercida sobre la herramienta es necesario conocer el valor de la resultante de fuerzas, R , que actúan sobre ella (Figura 3.1), así como el de las fuerzas en que puede descomponerse y el de los ángulos que las relacionan con ella (Figura 3.2).

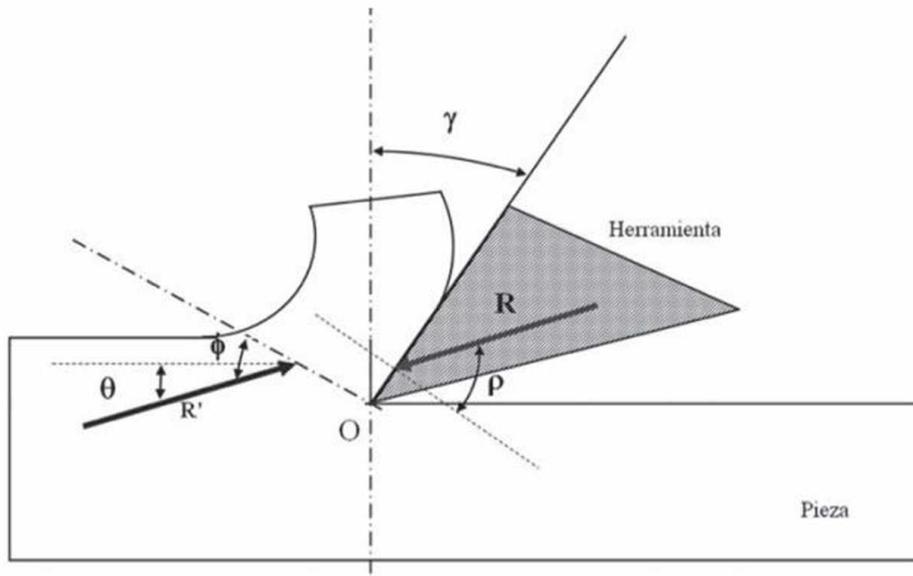


Figura 3.1. Equilibrio de fuerzas sobre la viruta en el corte ortogonal.

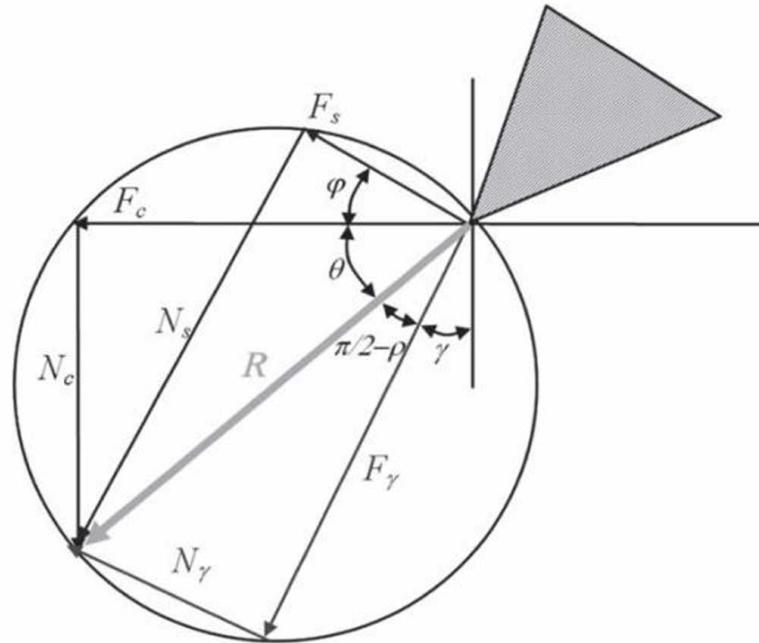


Figura 3.2. Descomposición de la resultante de fuerzas, R , que actúan sobre la herramienta de corte según la dirección del corte, del plano de deslizamiento y del plano de desprendimiento.

Como además de la fuerza ejercida sobre la herramienta se pide calcular la potencia necesaria para llevar a cabo el corte de las distintas fuerzas en que puede descomponerse la resultante, es interesante saber cuál es la fuerza de corte, F_c , puesto que va a permitir calcular la potencia necesaria con tan solo multiplicar su valor por la velocidad de corte V .

Hay que tener en cuenta los datos de partida γ , h_1 , b , τ_s , l_1 , l_2 , μ y V y las siguientes relaciones:

$$F_s = \tau_s \cdot b \cdot \frac{h_1}{\text{sen}\varphi}$$

$$R = \frac{F_s}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

$$F_c = R \cdot \cos(\rho - \gamma)$$

$$F_c = \tau_s \cdot b \cdot h_1 \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\text{sen}\varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

donde todo es conocido salvo φ y ρ , que a su vez se pueden calcular con los datos del problema y de las siguientes expresiones:

$$\text{tg}\varphi = \frac{\cos\gamma}{\xi - \text{sen}\gamma}$$

$$\rho = \text{arctg}\mu$$

siendo:

$$\xi = \frac{h_2}{h_1} = \frac{l_1}{l_2}$$

Con los valores numéricos de las anteriores expresiones se obtiene:

$$\xi = \frac{l_1}{l_2} = \frac{125}{30} = 4,17$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\cos 20^\circ}{4,17 - \text{sen} 20^\circ}\right) = \arctg 0,245 = 13,80^\circ$$

$$\rho = \arctg 0,6 = 30,96^\circ$$

$$F_c = \tau_s \cdot b \cdot h_1 \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\text{sen} \varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$$

$$F_c = 310 \cdot 4 \cdot 0,115 \cdot \frac{\cos(30,96^\circ - 20^\circ)}{\text{sen} 13,80^\circ \cdot \cos(13,80^\circ + 30,96^\circ - 20^\circ)} = 646,33 \text{ N}$$

$$R = \frac{F_c}{\cos(\rho - \gamma)} = \frac{646,33}{\cos(30,96^\circ - 20^\circ)} = 658,34 \text{ N} \approx 658,5 \text{ N}$$

$$\dot{W} = F_c \cdot V = 646,33 \cdot \frac{35}{60} = 377,03 \text{ W} \approx 377 \text{ W}$$

EJERCICIO 4

Torno: cilindrado

Se tiene un redondo de acero inoxidable de 15 mm de diámetro y 150 mm de longitud, cuyo diámetro se reduce hasta 14,5 mm mediante una operación de cilindrado en la que el husillo gira a $N = 400$ rpm y la velocidad de avance de la herramienta es de $f = 200$ mm/min.

Calcular la potencia disipada y la fuerza de corte.

Dato: Energía específica $w = 4,1$ GJ/m³.

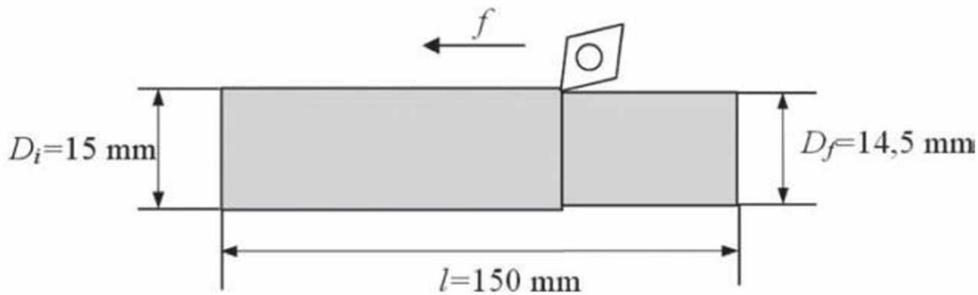
SOLUCIÓN

Figura 4.1. Esquema de la operación de cilindrado en el proceso de torneado.

La potencia disipada se puede calcular a partir del valor de la energía específica y del volumen total de material eliminado por unidad de tiempo:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$$

siendo:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N$$

donde:

— D_m es el diámetro medio que viene dado por:

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2} = \frac{15 + 14,5}{2} = 14,75 \text{ mm}$$

— d es la *profundidad de corte* o *profundidad de pasada* dada por:

$$d = \frac{D_i - D_f}{2} = \frac{15 - 14,5}{2} = 0,25 \text{ mm}$$

— a es el *avance* en mm/rev, relacionado con la *velocidad de avance*, f , por:

$$f = a \cdot N$$

N son las revoluciones por minuto a las que gira el husillo.

Por tanto, el volumen de material eliminado por minuto será:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot f = \pi \cdot 14,75 \cdot 0,25 \cdot 200 = 2.316,92 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Con ello, la potencia se obtiene de

$$\dot{W} = 4,1 \cdot \frac{2.316,92}{60} = 158,32 \text{ W} \approx 158,5 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que la potencia puede expresarse:

$$\dot{W} = T \cdot \omega \quad \text{siendo} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot N \quad \text{y} \quad T = F_c \cdot \frac{D_m}{2}$$

Lo que permite formular la fuerza de corte, F_c , o fuerza tangencial que ejerce la herramienta:

$$\dot{W} = F_c \cdot \frac{D_m}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N \Rightarrow F_c = \frac{\dot{W}}{D_m \cdot \pi \cdot N} = \frac{158,32}{14,75 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \frac{400}{60}} = 512,5 \text{ N}$$

EJERCICIO 5

Torno: cilindrado

Se dispone de un torno con las siguientes características:

- Gama de velocidades del torno (en rpm): 2.000, 1.500, 750, 500, 250, 125 y 62.
- Potencia máxima: 5 kW.
- Rendimiento global estimado: $\eta = 0,9$.

En él se van a mecanizar piezas de acero al carbono con una herramienta de acero rápido. Se cilindran en desbaste preformas de 200 mm de longitud y 50 mm de diámetro hasta que el diámetro final sea 45 mm. Se tiene en cuenta que la velocidad de corte recomendada por el fabricante de la herramienta es 40 m/min para el proceso y el material elegidos, y que la presión de corte del acero al carbono es $p_c = 500 \text{ MN/m}^2$.

Determinar las condiciones de corte (velocidad de corte, V ; avance, a , y profundidad de pasada, d) en condiciones de potencia máxima, y el tiempo necesario para llevar a cabo el mecanizado.

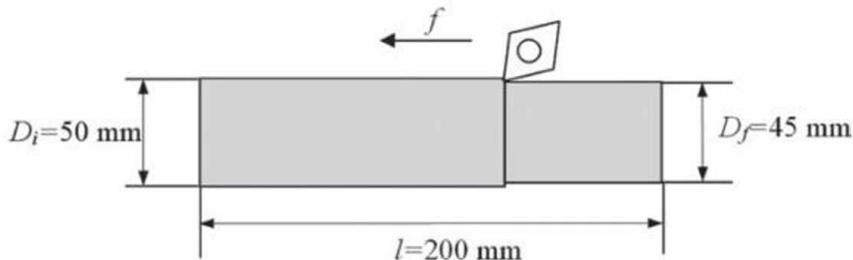
SOLUCIÓN

Figura 5.1. Esquema de la operación de cilindrado en el proceso de torneado.

Se parte de una geometría concreta de la preforma y de una velocidad de corte recomendada por el fabricante de la herramienta. Otros datos de partida son: la presión de corte del material que se va a mecanizar así como la potencia que se tiene disponible para poder eliminar el material. Con estos datos, se obtiene una velocidad de rotación N^* del torno a partir de la fórmula:

$$N^* = \frac{1.000 \cdot V^*}{\pi \cdot D}$$

donde:

- N^* es la velocidad de rotación del torno en revoluciones por minuto.
- V^* es la velocidad recomendada para el corte en metros por minuto
- D es el diámetro de la pieza en milímetros.

$$N^* = \frac{1.000 \cdot 40}{\pi \cdot 50} = 254,64 \text{ rpm}$$

Ahora bien, en general el valor de N^* no va a coincidir con ninguno de los valores disponibles en el torno que se esté usando, por lo que es necesario elegir un valor de N dentro de la gama de velocidades de rotación del torno lo más próximo posible a N^* . Por lo general, se elige por defecto, aunque se puede usar un valor por exceso, siempre y cuando el valor resultante de la velocidad de corte no supere demasiado al valor de la velocidad de corte recomendado, V^* . En este caso se toma $N = 250$ rpm.

Una vez fijado N , se obtiene V , de la expresión:

$$V = \frac{\pi \cdot D_m \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 47,5 \cdot 250}{1.000} = 37,3 \text{ m/min}$$

donde $D_m = \frac{D_i + D_f}{2}$ y las unidades son las ya indicadas.

Para este valor de V , y con los datos de p_c y la potencia de corte \dot{W} , es posible determinar el valor de la sección de viruta A_1 y los valores de avance y profundidad de pasada en función de los criterios establecidos para desbaste y acabado. Hay que ajustar el valor del avance obtenido a un valor disponible en la gama de avances del torno, quedando finalmente establecidos los valores de las condiciones de corte.

$$F_c = \frac{\dot{W}}{V} = \eta \cdot \frac{\dot{W}_m}{V} = 0,9 \cdot \frac{5.000}{(37,3 / 60)} = 7.238,6 \text{ N}$$

$$A_1 = \frac{F_c}{p_c} = \frac{7.238,6}{500 \cdot 10^6} = 1,447 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 = 14,47 \text{ mm}^2$$

$$a = \frac{A_1}{d} = \frac{14,47}{2,5} = 5,8 \text{ mm/rev}$$

La potencia necesaria para realizar el corte \dot{W} debe ser menor que la potencia disponible para llevar a cabo el mecanizado, también llamada potencia útil \dot{W}_u . Esta potencia se obtiene multiplicando el valor de la potencia del motor o accionamiento de la máquina-herramienta \dot{W}_m por un rendimiento η que recoge las pérdidas de potencia en las transmisiones de los accionamientos:

$$\dot{W} < \dot{W}_u$$

$$\dot{W}_u = \eta \dot{W}_m$$

siendo η el rendimiento de la máquina.

En este caso se puede tomar como primera aproximación, que $\dot{W} = \dot{W}_u$.

Por tanto, los valores pedidos son:

$$\begin{aligned} d &= 2,5 \text{ mm} \\ a &= 5,8 \text{ mm/rev} \\ V &= 37,3 \text{ m/min} \end{aligned}$$

El tiempo empleado en el corte viene dado por la ecuación:

$$t = \frac{l}{f}$$

siendo l la longitud de la barra que hay que mecanizar y f la velocidad de avance:

$$f = a \cdot N$$

$$f = 5,8 \cdot 250 = 1.447 \text{ mm/min}$$

$$t = \frac{l}{f} = \frac{200}{1.375} = 0,138 \text{ min} = 8,29 \text{ s} \approx 8 \text{ s}$$

EJERCICIO 6

Torno: cilindrado

Se tiene una barra cilíndrica de acero inoxidable de 15 mm de diámetro y 150 mm de longitud. Su diámetro se reduce hasta 14,5 mm mediante una operación de cilindrado en la que el husillo gira a $N = 400$ rpm, y la velocidad de avance de la herramienta es de $f = 200$ mm/min.

Calcular la velocidad de corte, el volumen de material eliminado por minuto o caudal de material eliminado y el tiempo de corte.

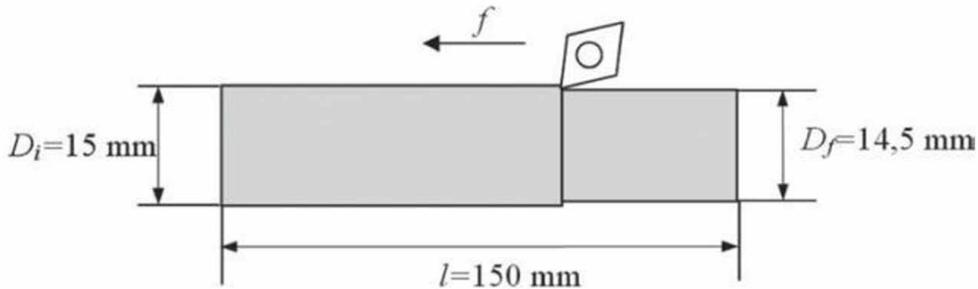
SOLUCIÓN

Figura 6.1. Esquema de la operación de cilindrado en el proceso de torneado.

La velocidad de corte, V , viene dada por la expresión:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000}$$

donde V se da en metros por minuto cuando D se da en milímetros y N en revoluciones por minuto.

Para el cálculo de V , es habitual emplear el valor del diámetro medio de cada pasada:

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2}$$

En este caso, dado que la profundidad de pasada es pequeña, el valor de la velocidad de corte se puede calcular empleando el diámetro inicial, el final o el medio sin que existan diferencias significativas, como se puede ver a continuación:

$$V = \frac{\pi \cdot D_i \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 15 \cdot 400}{1.000} = 18,85 \text{ m/min}$$

$$V = \frac{\pi \cdot D_f \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 14,5 \cdot 400}{1.000} = 18,22 \text{ m/min}$$

$$V = \frac{\pi \cdot D_m \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 14,5 \cdot 400}{1.000} = 18,54 \text{ m/min}$$

El volumen de material eliminado por minuto viene dado por:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot f$$

donde:

— D_m es el diámetro medio:

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2} = \frac{15 + 14,5}{2} = 14,75 \text{ mm}$$

— d es la profundidad de corte o profundidad de pasada:

$$d = \frac{D_i - D_f}{2} = \frac{15 - 14,5}{2} = 0,25 \text{ mm}$$

— a es el avance en milímetros por revolución, relacionado con la velocidad de avance, f , por N :

$$f = a \cdot N$$

— N son las revoluciones por minuto a las que gira el husillo.

Por tanto, el volumen de material eliminado por minuto es:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot f = \pi \cdot 14,75 \cdot 0,25 \cdot 200 = 2.316,92 \text{ mm}^3/\text{min}$$

El tiempo empleado en el corte viene dado por la ecuación:

$$t = \frac{l}{f} = \frac{150}{200} = 0,75 \text{ min} = 45 \text{ s}$$

EJERCICIO 7

Torno: cilindrado

En un torno que tiene una gama de regímenes de giro con un escalonamiento de 100 rpm, se mecaniza un redondo de 90 mm de diámetro y 180 mm de longitud hasta un diámetro de 84 mm mediante tres pasadas de 1 mm de profundidad. El torno se pone a girar a 300 rpm y la velocidad de avance es de 0,15 mm/rev.

Calcular:

- La velocidad de corte en cada pasada.
- El tiempo total empleado en el mecanizado.
- El volumen de material eliminado.
- Los cálculos anteriores si el torno se pone a girar a 500 rpm.
- Las revoluciones por minuto que habría que seleccionar en el torno para trabajar a velocidades de corte de valor próximo a 100 m/min.

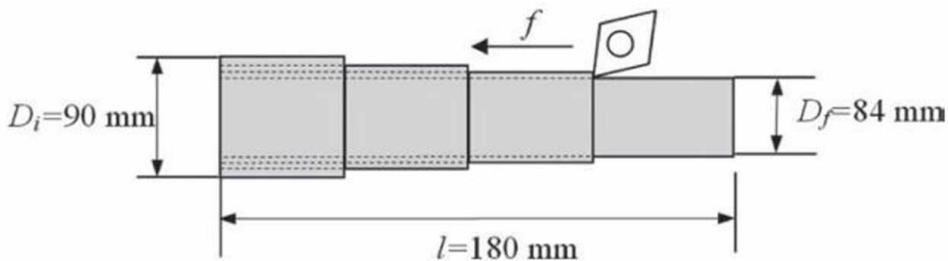
SOLUCIÓN

Figura 7.1. Esquema de la operación de cilindrado en el proceso de torneado.

Apartado A

Para determinar la velocidad de corte en cada pasada se utiliza la siguiente expresión:

$$V = \frac{\pi \cdot D_m \cdot N}{1.000}$$

siendo D_m el diámetro medio de cada pasada, que se halla de la siguiente manera:

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2}$$

donde:

$$— D_f = D_i - 2 \cdot d.$$

— d es la profundidad de corte o profundidad de pasada.

Aplicando la expresión para el cálculo de la velocidad de corte, considerando los datos indicados en el enunciado, $N = 300$ rpm, $d = 1$ mm y conociendo el total de pasadas, se calcula la velocidad de corte en cada pasada:

Pasada 1:

$$D_f = 90 - 2 \cdot 1 = 88 \text{ mm} ; D_m = \frac{90 + 88}{2} = 89 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 89 \cdot 300}{1.000} = 83,88 \text{ mm/min}$$

Pasada 2:

$$D_f = 88 - 2 \cdot 1 = 86 \text{ mm} ; D_m = \frac{88 + 86}{2} = 87 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 87 \cdot 300}{1.000} = 81,99 \text{ mm/min}$$

Pasada 3:

$$D_f = 86 - 2 \cdot 1 = 84 \text{ mm} ; D_m = \frac{86 + 84}{2} = 85 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 85 \cdot 300}{1.000} = 80,11 \text{ mm/min}$$

Apartado B

Para determinar el tiempo empleado en el mecanizado se aplica la siguiente expresión:

$$t = \frac{l}{f}$$

donde:

— l es la longitud a mecanizar. En este caso es un dato conocido: $l = 180$ mm.

— f es la velocidad de avance. Se puede calcular con: $f = a \cdot N$.

$$f = 0,15 \cdot 300 = 45 \text{ mm/min}$$

por lo que:

$$t = \frac{l}{f} = \frac{180}{45} = 4 \text{ min}$$

El tiempo que se obtiene es el invertido en la realización de una pasada, pero como ha de calcularse el tiempo total empleado en el mecanizado y es necesaria la realización de tres pasadas, el tiempo total en el mecanizado es 12 min (720 s).

Apartado C

Se determina el volumen eliminado a partir de la expresión que permite el cálculo del volumen de un cilindro:

$$Vol = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot l$$

Por tanto, el material total eliminado es el volumen inicial menos el volumen final:

$$Vol = \frac{\pi}{4}(D_i^2 - D_f^2) \cdot l = \frac{\pi}{4}(90^2 - 84^2) \cdot 180 = 147.592,02 \text{ mm}^3 \approx 1,48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Apartado D

La resolución de este apartado consiste en repetir los cálculos realizados aplicando el valor de las revoluciones de giro del husillo, N , indicadas. Por tanto, tomando $N = 500$ rpm, se calcula la velocidad de corte en cada pasada:

Pasada 1:

$$D_f = 90 - 2 \cdot 1 = 88 \text{ mm} ; D_m = \frac{90 + 88}{2} = 89 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 89 \cdot 500}{1.000} = 139,80 \text{ mm/min}$$

Pasada 2:

$$D_f = 88 - 2 \cdot 1 = 86 \text{ mm} ; D_m = \frac{88 + 86}{2} = 87 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 87 \cdot 500}{1.000} = 136,66 \text{ mm/min}$$

Pasada 3:

$$D_f = 86 - 2 \cdot 1 = 84 \text{ mm} ; D_m = \frac{86 + 84}{2} = 85 \text{ mm} ; V = \frac{\pi \cdot 85 \cdot 500}{1.000} = 133,52 \text{ mm/min}$$

La velocidad de avance que se debe considerar es:

$$f = 0,15 \cdot 500 = 75 \text{ mm/min}$$

por lo que:

$$t = \frac{l}{f} = \frac{180}{75} = 2,4 \text{ min}$$

El tiempo que se obtiene es el invertido en la realización de una pasada, pero como ha de calcularse el tiempo total empleado en el mecanizado y es necesaria la realización de tres pasadas, el tiempo total en el mecanizado es 7,2 min (432 s).

El volumen total de material eliminado será el mismo, puesto que no depende de N .

Apartado E

Considerando la velocidad de corte $V = 100$ m/min, se despeja N en la fórmula:

$$V = \frac{\pi \cdot D_m \cdot N}{1.000}$$

Pasada 1:

$$100 = \frac{\pi \cdot 89 \cdot N}{1.000} ; N = \frac{100 \cdot 1.000}{\pi \cdot 89} = 357,65 \text{ rpm}$$

Pasada 2:

$$100 = \frac{\pi \cdot 87 \cdot N}{1.000} ; N = \frac{100 \cdot 1.000}{\pi \cdot 87} = 365,87 \text{ rpm}$$

Pasada 3:

$$100 = \frac{\pi \cdot 85 \cdot N}{1.000} ; N = \frac{100 \cdot 1.000}{\pi \cdot 85} = 374,48 \text{ rpm}$$

Se toma el valor inferior más cercano a la gama de revoluciones, en este caso se tiene un escalonamiento de 100 rpm, por tanto, $N = 300$ rpm, similar al caso anterior, en el que se puede ver que las velocidades de corte están en torno a 80 m/min, por lo que no llegan a los 100 m/min que se piden en este apartado.

Por esto, se toma el siguiente valor de la gama de revoluciones, $N = 400$ rpm. Volviendo a realizar los cálculos, se obtienen las siguientes velocidades de corte:

Pasada 1:

$$V = \frac{\pi \cdot 89 \cdot 400}{1.000} = 111,84 \text{ m/min}$$

Pasada 2:

$$V = \frac{\pi \cdot 87 \cdot 400}{1.000} = 109,33 \text{ m/min}$$

Pasada 3:

$$V = \frac{\pi \cdot 85 \cdot 400}{1.000} = 106,81 \text{ m/min}$$

De lo que se deduce que son necesarias 400 rpm para trabajar a velocidades de corte próximas, aunque ligeramente superiores, a 100 m/min.

EJERCICIO 8

Fresado frontal

Sobre un bloque de una aleación de aluminio de alta resistencia de 600 mm de longitud y 70 mm de ancho, se realiza una operación de planeado con una fresa de 10 dientes y 100 mm de diámetro. Las condiciones de corte empleadas en la operación son $N = 150$ rpm, una velocidad de avance $f = 500$ mm/min y una profundidad de corte de 2,5 mm.

Calcular la potencia requerida en la operación, el par y la fuerza de corte.

Dato: Energía específica $w = 0,75$ GJ/m³.

SOLUCIÓN

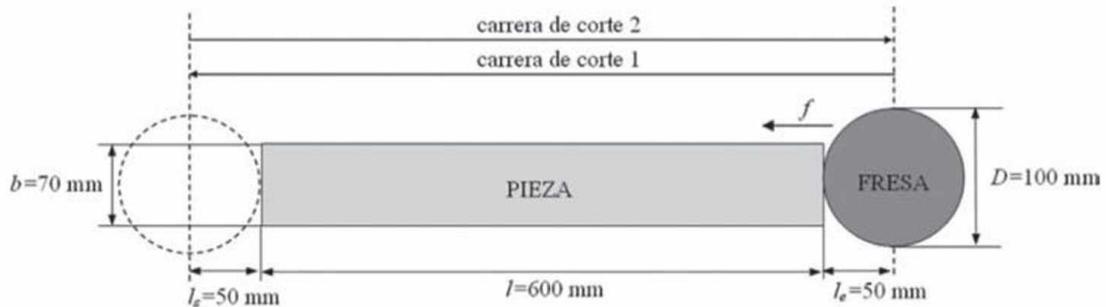


Figura 8.1. Esquema del proceso de mecanizado: fresado frontal.

La potencia consumida se puede calcular como el producto de la energía específica por el volumen total de material eliminado en la unidad de tiempo.

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} = w \cdot b \cdot d \cdot f$$

donde:

- b es el ancho del corte de valor $b = 70$ mm. (No se emplea el diámetro de la fresa en el cálculo ya que solo trabaja en una anchura igual al de la pieza.)
- d es la profundidad de corte o profundidad de pasada de valor $d = 2,5$ mm.
- f es la velocidad de avance de la pieza de valor 500 mm/min.

Por otra parte, la cantidad de material eliminado por minuto viene dada por:

$$\dot{z} = b \cdot d \cdot f = 70 \cdot 2,5 \cdot 500 = 87.500 \text{ mm}^3/\text{min}$$

Por tanto, tiene como resultado:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} = 0,75 \cdot \frac{87.500}{60} = 1.093,75 \text{ W} \approx 1.094 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que la potencia está relacionada con el par mediante la expresión:

$$\dot{W} = T \cdot \omega$$

donde $\omega = 2\pi N$, el par se puede calcular a partir de:

$$T = \frac{\dot{W}}{\omega} = \frac{1.093,75}{2 \cdot \pi \cdot \frac{150}{60}} = 69,63 \text{ Nm} \approx 70 \text{ Nm}$$

Sabiendo que el par es la función de la fuerza de corte, F_c , y está relacionado con ella a través de la siguiente expresión:

$$T = F_c \cdot \frac{D}{2} \Rightarrow F_c = \frac{2 \cdot T}{D}$$

Se obtiene el siguiente valor para la fuerza de corte, F_c :

$$F_c = \frac{2 \cdot 69,63}{100 \cdot 10^{-3}} = 1.392,6 \text{ N} \approx 1.393 \text{ N}$$

EJERCICIO 9

Fresado frontal

Sobre un bloque de una aleación de aluminio de alta resistencia de 600 mm de longitud y 70 mm de ancho, se realiza una operación de planeado con una fresa de 10 dientes y 100 mm de diámetro. Las condiciones de corte empleadas en la operación son $N = 150$ rpm, una velocidad de avance $f = 500$ mm/min y una profundidad de corte de 2,5 mm.

Calcular el volumen de material eliminado por minuto, el tiempo de corte y el avance por diente.

SOLUCIÓN

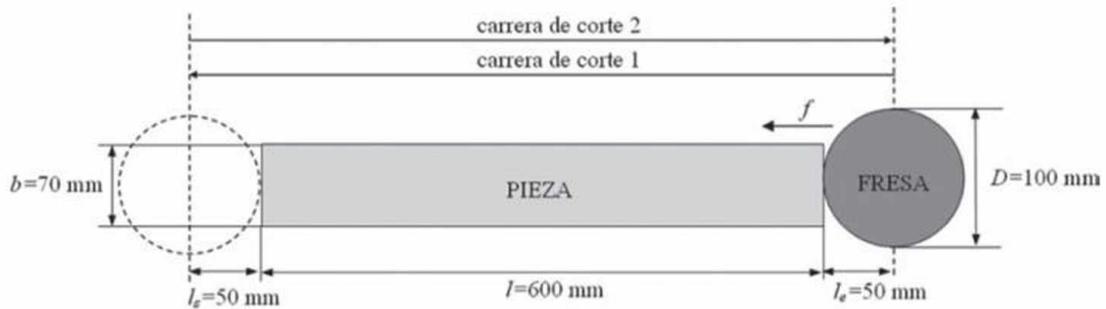


Figura 9.1. Esquema del proceso de mecanizado: fresado frontal.

Teniendo en cuenta que el volumen de material eliminado por minuto viene dado por la siguiente expresión:

$$\dot{z} = b \cdot d \cdot f$$

donde:

- b es el ancho del corte de valor $b = 70$ mm. (No se emplea el diámetro de la fresa en el cálculo ya que solo trabaja en una anchura igual al de la pieza.)
- d es la profundidad de corte o profundidad de pasada de valor $d = 2,5$ mm.
- f es la velocidad de avance de la pieza de valor 500 mm/min.

Quedando por tanto:

$$\dot{z} = b \cdot d \cdot f = 70 \cdot 2,5 \cdot 500 = 87.500 \text{ mm}^3/\text{min}$$

El tiempo de mecanizado se calcula con la expresión:

$$t = \frac{l + 2 \cdot l_c}{f}$$

donde:

— l es la longitud de corte.

— l_c es la longitud hasta que la fresa toma contacto con la pieza. Dada aproximadamente por:

$$l_c = \frac{D}{2} = \frac{100}{2} = 50 \text{ mm}$$

Luego el tiempo es:

$$t = \frac{l + 2 \cdot l_c}{f} = \frac{600 + 100}{500} = 1,40 \text{ min} = 84 \text{ s}$$

El avance por diente se calcula teniendo en cuenta la fórmula:

$$f = a_z \cdot N \cdot n_z$$

donde:

$$a_z = \frac{f}{N \cdot n_z} = \frac{500}{150 \cdot 10} = 0,33 \text{ mm/diente}$$

EJERCICIO 10

Fresado frontal

Un proceso de fresado frontal se realiza con una herramienta de acero rápido de 180 mm de diámetro y 12 dientes; la profundidad de pasada es de 3 mm, el avance 0,15 mm/diente y la velocidad de rotación de la fresa 150 rpm.

Calcular la velocidad de corte en metros por segundo; el tiempo que tardaría en planificar una superficie rectangular de 2.000 mm de longitud y 300 mm de anchura y la potencia necesaria en el accionamiento principal si la presión de corte del material en las condiciones del proceso es de 3 GN/m² y el rendimiento global de la transmisión del movimiento principal se estima en el 80%.

SOLUCIÓN

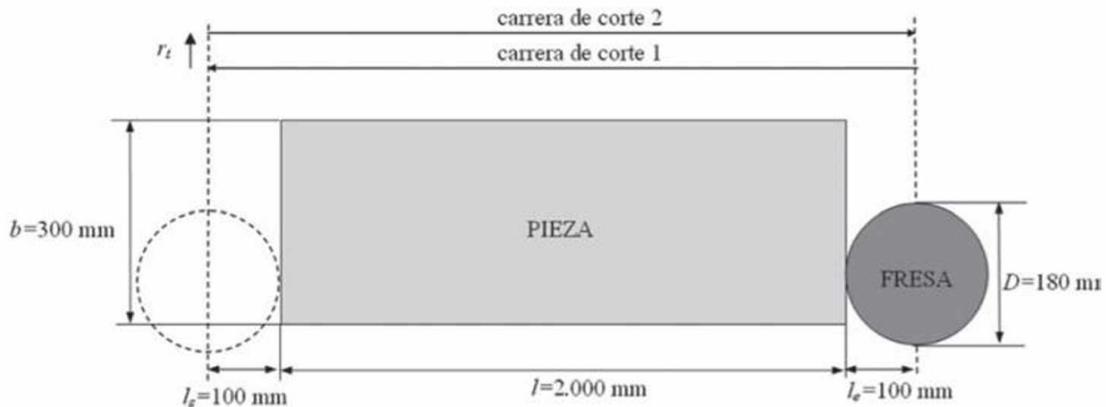


Figura 10.1. Esquema del proceso de mecanizado: fresado frontal.

La velocidad de corte se calcula:

$$V = \frac{\pi \cdot N \cdot D}{1.000} = \frac{\pi \cdot 150 \cdot 180}{1.000} = 84,82 \text{ m/min} = 1,41 \text{ m/s}$$

El proceso se realiza mediante dos únicas carreras de corte (1 y 2) dado que el diámetro de la fresa es mayor que la mitad del ancho de la superficie que hay que mecanizar. Además, se tiene un recorrido transversal (r_t) en vacío de, aproximadamente, 180 mm de longitud.

La longitud de cada carrera de corte (l_c) es:

$$l_c = l_e + 2.000 + l_s = 100 + 2.000 + 100 = 2.200 \text{ mm}$$

donde l_e y l_s son las longitudes de entrada y salida de la herramienta respectivamente. Se van a tomar de valor $l_e = l_s = 100 \text{ mm}$, algo mayor que el radio de la fresa, dado por:

$$R = D / 2 = 90 \text{ mm}$$

La velocidad de avance de la fresa resulta:

$$f = a_z \cdot n_z \cdot N = 0,15 \cdot 12 \cdot 150 = 270 \text{ mm/min} = 4,50 \text{ mm/s}$$

El tiempo empleado en el proceso hace:

$$t_c = \frac{l_t}{f} = \frac{2 \cdot l_c + r_t}{f} = \frac{2 \cdot 2.200 + 180}{4,50} = 1.017,78 \text{ s} \approx 16 \text{ min } 58 \text{ s}$$

siendo l_t la longitud total que hay que mecanizar.

La potencia total es el resultado de multiplicar el valor de la presión de corte por el volumen total de material eliminado en la unidad de tiempo:

$$\dot{W} = p_c \cdot \dot{z} = p_c \cdot d \cdot b \cdot f = 3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 150 \cdot 10^{-3} \cdot 4,50 \cdot 10^{-3} = 6.075 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que el rendimiento global de la transmisión del movimiento principal se estima en el 80%, la potencia total necesaria es:

$$\dot{W}_T = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{6.075}{0,80} = 7.593,75 \text{ W} \approx 7,6 \text{ kW}$$

EJERCICIO 11

Fresado periférico

Sobre un bloque de acero inoxidable de 300 mm de longitud y 100 mm de ancho se realiza un fresado periférico con un avance $a_z = 0,25$ mm/diente y una profundidad de corte de 3 mm. La fresa empleada tiene un diámetro $D = 50$ mm, 20 dientes y es más ancha que el bloque que se va a fresar. Calcular la potencia que requiere la operación, el par y la fuerza de corte, si la fresa gira a $N = 100$ rpm.

Dato: Energía específica del acero inoxidable $w = 3$ GJ/m³.

SOLUCIÓN

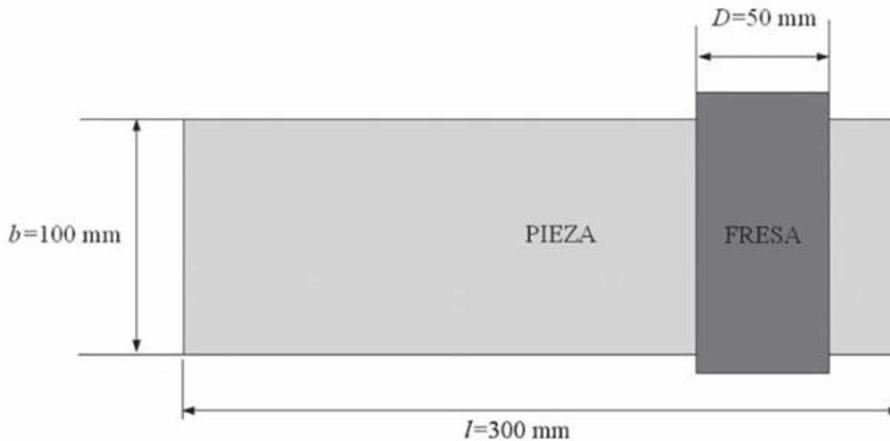


Figura 11.1. Esquema del proceso de mecanizado: fresado periférico.

La potencia total es el resultado de multiplicar el valor de la energía específica por el volumen total de material eliminado en la unidad de tiempo:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$$

Teniendo en cuenta que el volumen de material eliminado por minuto viene dado por la expresión:

$$\dot{z} = b \cdot d \cdot f$$

donde:

- b es el ancho del corte de valor $b = 100$ mm.
- d es la profundidad de corte o de pasada de valor $d = 3$ mm.
- f es la velocidad de avance que se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$f = a_z \cdot n_z \cdot N = 0,25 \cdot 20 \cdot 100 = 500 \text{ mm/min}$$

Por tanto, el caudal eliminado es:

$$\dot{z} = b \cdot d \cdot f = 100 \cdot 3 \cdot 500 = 150.000 \text{ mm}^3/\text{min}$$

y la potencia:

$$\dot{W} = 3 \cdot \frac{150.000}{60} = 7.500 \text{ W} = 7,5 \text{ kW}$$

El par se puede calcular de la siguiente manera:

$$T = \frac{\dot{W}}{\omega}$$

siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$.

luego:

$$T = \frac{7.500}{2 \cdot \pi \cdot \frac{100}{60}} = 716,2 \text{ Nm}$$

Pudiéndose calcular la fuerza de corte:

$$T = F_c \cdot \frac{D}{2} \Rightarrow F_c = \frac{2 \cdot T}{D} = \frac{2 \cdot 716,20}{50 \cdot 10^{-3}} = 28.648 \text{ N} \approx 28,6 \text{ kN}$$

EJERCICIO 12

Taladrado

Sobre un bloque de una aleación de aluminio se realiza un agujero con una broca de 8 mm y un avance de 0,15 mm/rev con el husillo girando a $N = 1.000$ rpm.

Calcular el volumen de material eliminado en la unidad de tiempo y el par de torsión sobre la broca.

Dato: Energía específica $w = 0,9$ GJ/m³.

SOLUCIÓN

El volumen de material eliminado en la unidad de tiempo en el caso del taladrado viene dado por la ecuación:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N$$

Luego, con los datos aportados en el enunciado resulta:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N = \left[\frac{\pi \cdot 8^2}{4} \right] \cdot 0,15 \cdot \frac{1.000}{60} = 125,66 \text{ mm}^3/\text{s}$$

La potencia total es el resultado de multiplicar el valor de la energía específica por el volumen total de material eliminado en la unidad de tiempo:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} = 0,9 \cdot 125,66 = 113,09 \text{ W} \approx 113,1 \text{ W}$$

Como la potencia se puede calcular también como el par de torsión sobre la broca por la velocidad de rotación, se tiene:

$$T = \frac{\dot{W}}{\omega}$$

siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$

luego:

$$T = \frac{113,09}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1.000}{60}} = 1,08 \text{ Nm} \approx 1,1 \text{ Nm}$$

EJERCICIO 13***Taladrado***

Sobre un bloque de acero con una energía específica $w = 1,9 \text{ GJ/m}^3$ se quiere realizar un agujero con una taladradora de 500 W de potencia en la que la velocidad de giro del husillo es $N = 300 \text{ rpm}$. El avance es de 0,20 mm/rev y el rendimiento de la máquina es del 90%.

Calcular el par de torsión y el diámetro máximo de la broca que se puede emplear con la máquina indicada.

SOLUCIÓN

La potencia efectiva de la máquina se obtiene a partir de la potencia total y el rendimiento:

$$\dot{W} = \dot{W}_T \cdot \eta = 500 \cdot 0,9 = 450 \text{ W}$$

El par de torsión sobre la broca se puede calcular a partir de la potencia y de la velocidad de rotación, por lo que se tiene:

$$T = \frac{\dot{W}}{\omega}$$

siendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$

luego:

$$T = \frac{450}{2 \cdot \pi \cdot \frac{300}{60}} = 14,32 \text{ Nm}$$

Para obtener el diámetro de la broca primero se calcula el volumen de material eliminado en el proceso como en la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \dot{W} = w \cdot \dot{z} &\Rightarrow 450 = 1,9 \cdot 10^9 \cdot \dot{z} \\ \dot{z} = \frac{450}{1,9 \cdot 10^9} &= 2,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} = 236,84 \text{ mm}^3/\text{s} \end{aligned}$$

El volumen de material eliminado en la unidad de tiempo en el caso del taladrado viene dado por la expresión:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N$$

Con los datos aportados y obtenidos, se puede calcular el diámetro:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N \Rightarrow 236,84 = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot 0,20 \cdot \frac{300}{60}$$

$$D = \sqrt{\frac{236,84 \cdot 4 \cdot 60}{\pi \cdot 0,20 \cdot 300}} = 17,37 \text{ mm} \approx 17 \text{ mm}$$

EJERCICIO 14

Taladrado

En una aleación de magnesio con una energía específica $w = 0,5 \text{ GJ/m}^3$ se quiere realizar un taladro con una broca de 10 mm de diámetro. La velocidad de corte que recomienda el fabricante para la broca es de 25 m/min con un avance de 0,10 mm/filo. La taladradora posee un escalonamiento de la velocidad de giro de 10 rpm y tiene un rendimiento del 85%.

Calcular la velocidad de corte en metros por minuto, la velocidad de avance en milímetros por segundo y la potencia consumida en la realización del taladro.

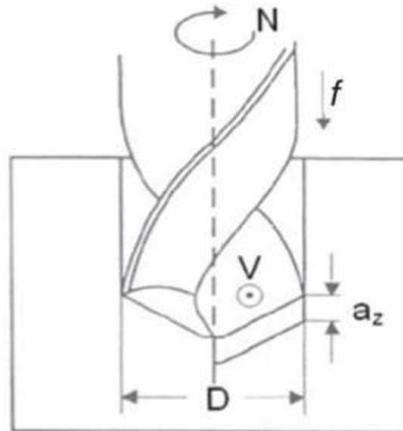
SOLUCIÓN

Figura 14.1. Esquema del proceso de taladrado.

Partiendo de los datos aportados y de la velocidad de corte recomendada se obtiene una frecuencia rotacional a partir de la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} \Rightarrow N = \frac{V \cdot 1.000}{\pi \cdot D} = \frac{25 \cdot 1.000}{\pi \cdot 10} = 795,77 \text{ rpm}$$

Este valor de N no va a coincidir con ninguno de los valores disponibles en la taladradora empleada, por lo que será necesario elegir un valor N dentro de la gama de velocidades de rotación del taladro lo más próximo posible a N . Por lo general, la elección se hace por defecto, aunque puede usarse un valor por exceso siempre y cuando el valor resultante de la velocidad de corte no supere demasiado al valor de la velocidad de corte recomendado. En este caso se toma $N = 790$ rpm.

Una vez fijado el valor de N se obtiene V de la expresión:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 790}{1.000} = 24,82 \text{ m/min} \approx 24,8 \text{ m/min}$$

Para calcular la velocidad de avance se tiene que tener en cuenta que los datos aportados en el enunciado hacen referencia al avance por filo y que la broca tiene dos, por lo que:

$$f = a_z \cdot n_z \cdot N = 0,10 \cdot 2 \cdot 790 = 158 \text{ mm/min} = 2,63 \text{ mm/s} \approx 2,6 \text{ mm/s}$$

La potencia empleada en el proceso de taladrado es el resultado de multiplicar la energía específica por el volumen de material eliminado en la unidad de tiempo:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$$

El volumen de material eliminado en la unidad de tiempo en el caso del taladrado viene dado por la expresión:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot f$$

Por tanto, aplicando los datos del enunciado y los obtenidos en cálculos anteriores se obtiene:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot f = \left[\frac{\pi \cdot 10^2}{4} \right] \cdot 2,63 = 206,56 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Con lo que ya se puede realizar el cálculo de la potencia:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} = 0,5 \cdot 206,56 = 103,28 \text{ W}$$

Esta potencia obtenida es la que se necesita en el proceso de taladrado, pero la potencia total que consumirá la máquina, teniendo en cuenta el rendimiento indicado, es:

$$\dot{W} = \dot{W}_T \cdot \eta \Rightarrow \dot{W}_T = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{103,28}{0,85} = 121,51 \text{ W} \approx 122 \text{ W}$$

EJERCICIO 15

Taladrado

Sobre una placa de acero con un valor de la energía específica $w = 8,5 \text{ GJ/m}^3$ se quiere realizar un agujero con una taladradora de 1.500 W de potencia y una broca de 4 mm de diámetro. El avance es de 0,20 mm/rev y el rendimiento de la máquina es del 85%.

Calcular la velocidad de giro del husillo en revoluciones por minuto.

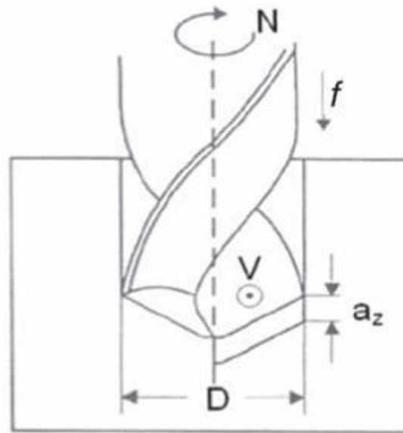
SOLUCIÓN

Figura 15.1. Esquema del proceso de taladrado.

La potencia efectiva de la máquina se obtiene a partir de la potencia total y el rendimiento:

$$\dot{W} = \dot{W}_T \cdot \eta = 1.500 \cdot 0,85 = 1.275 \text{ W}$$

Para calcular la velocidad de giro del husillo se debe partir de los datos indicados en el enunciado y el volumen de material eliminado en el proceso, según la expresión:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} \Rightarrow 1.275 = 8,5 \cdot 10^9 \cdot \dot{z}$$

$$\dot{z} = \frac{1.275}{8,5 \cdot 10^9} = 1,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} = 150 \text{ mm}^3/\text{s}$$

El volumen de material eliminado en la unidad de tiempo en el caso del taladrado viene dado por:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N$$

Con los datos aportados y los obtenidos se puede realizar el cálculo de la velocidad de giro del husillo:

$$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N \Rightarrow 150 = \left[\frac{\pi \cdot 4^2}{4} \right] \cdot 0,20 \cdot N$$

$$N = \frac{150 \cdot 4}{\pi \cdot 4^2 \cdot 0,2} = 59,68 \frac{rev}{s} = 59,68 \frac{rev}{s} \cdot \frac{60s}{min} = 3.580,97 \text{ rpm} \simeq 3.580 \text{ rpm}$$

EJERCICIO 16

Rectificado

Sobre una pieza de acero al carbono se realiza una operación de rectificado plano. Se emplea una muela de 250 mm de diámetro que gira a 3.000 rpm. El ancho de corte es $b = 25$ mm, la profundidad de corte es $d = 0,05$ mm y la velocidad de avance de la pieza es $f = 1.500$ mm/min.

Calcular la fuerza de corte (tangencial a la pieza), F_c , y la fuerza de empuje (normal a la superficie), F_n .

Dato: Energía específica $w = 41$ GJ/m³.

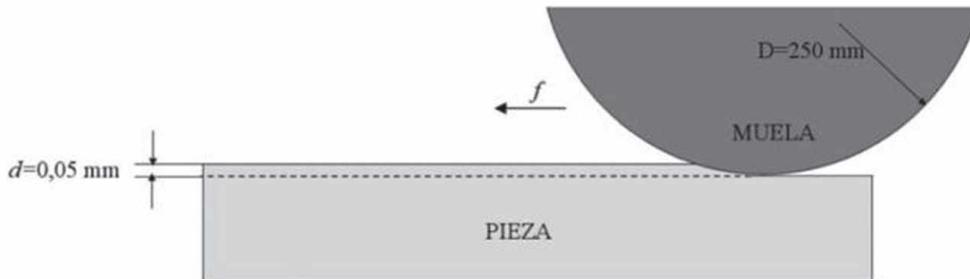
SOLUCIÓN

Figura 16.1. Esquema del proceso de rectificado.

La potencia consumida se puede calcular como el producto de la energía específica por el volumen total de material eliminado:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$$

La cantidad de material eliminado por minuto viene dada por:

$$\dot{z} = d \cdot b \cdot f = 0,05 \cdot 25 \cdot 1.500 = 1.875 \text{ mm}^3/\text{min}$$

donde:

- b es el ancho del corte de valor $b = 25$ mm.
- d es la profundidad de corte o de pasada de valor $d = 0,05$ mm.
- f es la velocidad de avance de la pieza de valor $f = 1.500$ mm/min.

Por tanto, resulta:

$$\dot{W} = w \cdot \dot{z} = 41 \cdot \frac{1.875}{60} = 1.281,25 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta que la potencia está relacionada con el par mediante la expresión:

$$\dot{W} = T \cdot \omega$$

donde: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$ y $T = F_c \frac{D}{2}$

F_c se puede expresar del siguiente modo:

$$\dot{W} = F_c \frac{D}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N \Rightarrow F_c = \frac{\dot{W}}{D \cdot \pi \cdot N} = \frac{1.281,25}{250 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot \frac{3.000}{60}} = 32,63 \text{ N} \approx 32,6 \text{ N}$$

La fuerza de empuje F_n se puede calcular teniendo en cuenta que, según datos experimentales en las publicaciones técnicas, suele ser un 30% mayor que la fuerza de corte, F_c ; en consecuencia:

$$F_n = 1,30 \cdot F_c = 1,30 \cdot 32,63 = 42,42 \text{ N} \approx 42,4 \text{ N}$$

EJERCICIO 17

Rectificado

Con una muela de 150 mm de diámetro que cuenta con una cantidad de puntas de corte por unidad de área de la periferia de la piedra entre 0,1 y 10 por cada milímetro cuadrado, se realiza una operación de rectificado plano con una profundidad de pasada $d = 0,05$ mm, una velocidad de avance $f = 25$ m/min y una velocidad de corte $V = 1.800$ m/min.

Calcular el espesor y la longitud de la viruta.

Nota: Considérese que r , relación entre el ancho de viruta y el espesor promedio no deformado de viruta, tiene un valor aproximado entre 10 y 20.

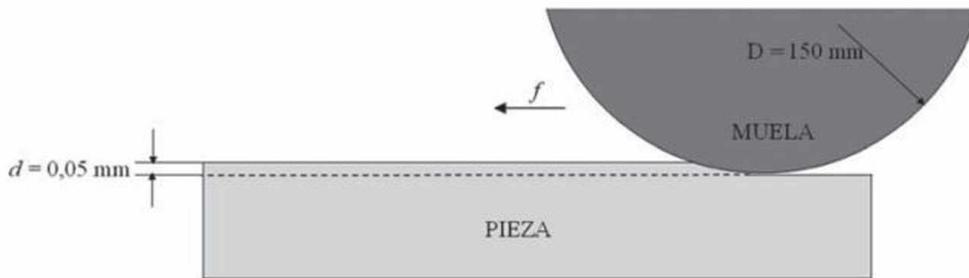
SOLUCIÓN

Figura 17.1. Esquema del proceso de rectificado.

Se puede demostrar, a partir de consideraciones geométricas, que la longitud no deformada l de la viruta, en el rectificado plano, se calcula de forma aproximada con la expresión:

$$l = \sqrt{D \cdot d}$$

donde:

- D es el diámetro de la muela.
- d es la profundidad de pasada.

Por tanto, en este caso da como resultado:

$$l = \sqrt{150 \cdot 0,05} = 2,74 \text{ mm}$$

Con respecto al espesor de la viruta, este se puede calcular mediante:

$$h = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot f}{V \cdot C \cdot r}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}}$$

donde:

- f es la velocidad de avance.
- V es la velocidad de corte.
- C es la cantidad de puntas de corte por unidad de área de la periferia de la piedra, comprendida entre 0,1 y 10 por cada milímetro cuadrado. En este caso se toma $C = 2$.
- r es la relación entre el ancho de viruta y el espesor promedio no deformado de viruta. Su valor aproximado se encuentra entre 10 y 20. En este caso se toma $r = 15$.

Resultando, por tanto:

$$h = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot f}{V \cdot C \cdot r}\right)} \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 25}{1.800 \cdot 2 \cdot 15}\right)} \cdot \sqrt{\frac{0,05}{150}} = 5,81 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \approx 0,006 \text{ mm}$$

EJERCICIO 18

Rectificado

En una operación de rectificado se emplean: una muela de 250 mm de diámetro, una velocidad de avance $f = 30$ m/min y una velocidad de corte $V = 1.500$ m/min. Se requiere que las virutas no excedan de 3 mm de longitud y 0,007 mm de espesor.

Calcular la profundidad máxima de pasada que se podrá efectuar y la cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia de la piedra.

Nota: Considérese que r , relación entre el ancho de viruta y el espesor promedio no deformado de viruta, tiene un valor aproximado de 12.

SOLUCIÓN

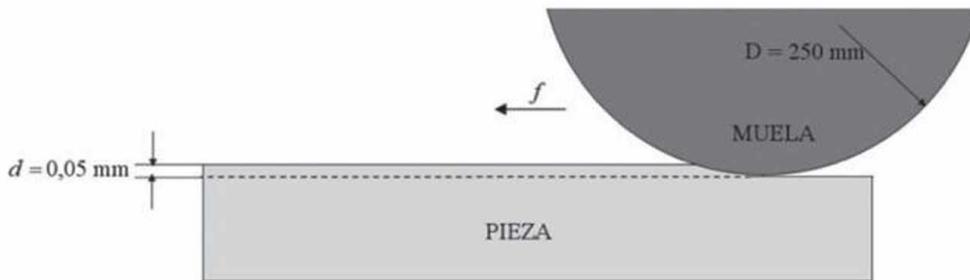


Figura 18.1. Esquema del proceso de rectificado.

Se puede demostrar, a partir de consideraciones geométricas, que la longitud no deformada l de la viruta, en el rectificado plano, se calcula en forma aproximada con la expresión:

$$l = \sqrt{D \cdot d}$$

donde:

- D es el diámetro de la muela.
- d es la profundidad de pasada.

Por tanto, en este caso da como resultado:

$$3 = \sqrt{250 \cdot d} \Rightarrow d = \frac{3^2}{250} = 0,036 \text{ mm}$$

Con respecto al espesor de la viruta, éste se calcula en relación a los siguientes parámetros por medio de la expresión:

$$h = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot f}{V \cdot C \cdot r}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}}$$

donde:

- f es la velocidad de avance.
- V es la velocidad de corte.
- C es la cantidad de puntos de corte por unidad de área de la periferia de la piedra.
- r es la relación entre el ancho de viruta y el espesor promedio no deformado de viruta.

Obteniéndose un valor de C de unos 5 o 6 puntos de corte por milímetro cuadrado.

$$h = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot f}{V \cdot C \cdot r}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}} \Rightarrow 7 \cdot 10^{-3} = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 30}{1.500 \cdot C \cdot 12}\right) \cdot \sqrt{\frac{0,036}{250}}}$$

$$C = 5,87$$

EJERCICIO 19

Movimiento principal rectilíneo: cepillado

Un proceso de cepillado tiene lugar en una máquina-herramienta cepilladora con velocidad de corte aproximadamente constante de valor $V = 10$ m/min y una velocidad de retroceso, también constante de $V_r = 25$ m/min. Dicho proceso consiste en planificar en una única pasada la superficie superior de una pieza con forma de paralelepípedo de 2.000 mm de longitud, 300 mm de ancho y 200 mm de alto. El material para mecanizar es acero al carbono, la profundidad de pasada es de 4 mm y el avance de 0,3 mm. La carrera complementaria de entrada es de 150 mm y la de salida de 50 mm, y los tiempos de inversión son de $t_i = 2$ s.

Calcular el tiempo necesario para el mecanizado de la pieza y la potencia de cepillado si la presión de corte del material en las condiciones del proceso es de $2 \cdot 10^9$ Pa.

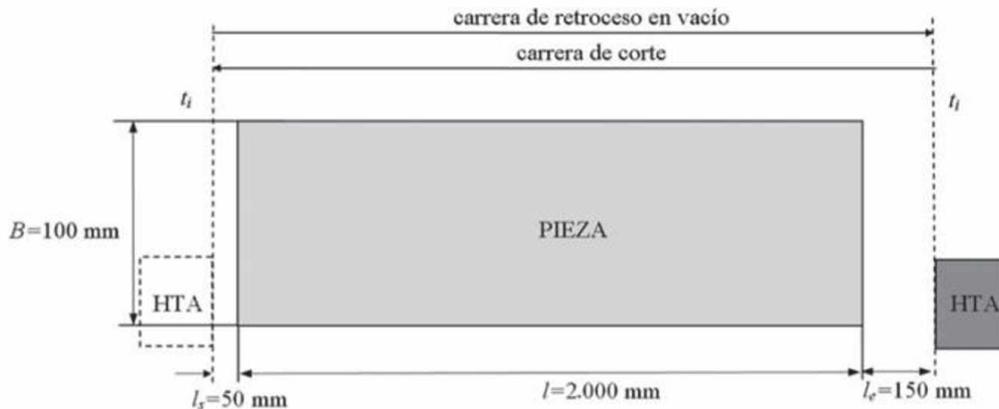
SOLUCIÓN

Figura 19.1. Esquema de un proceso de cepillado.

La longitud de cada carrera, l_c , viene dada por:

$$l_c = l_e + l + l_s = 150 + 2.000 + 50 = 2.200 \text{ mm}$$

donde l_e y l_s son las carreras de entrada y salida y l la longitud de la pieza que hay que mecanizar.

El tiempo empleado en la doble carrera, t_{dc} , es:

$$t_{dc} = \frac{l_c}{V} + \frac{l_c}{V_r} + 2 \cdot t_i = \frac{2,2}{10} + \frac{2,2}{25} + 2 \cdot \frac{2}{60} = 0,37 \text{ min} = 22,2 \text{ s}$$

El número de dobles carreras, N_{dc} , necesarias para el planificado de la superficie de la pieza se obtiene de:

$$N_{dc} = \frac{300}{a} = \frac{300}{0,3} = 1.000$$

El tiempo total de mecanizado de la pieza, t_m , es:

$$t_m = N_{dc} \cdot t_{dc} = 1.000 \cdot 22,20 = 22.200 \text{ s} = 370 \text{ min} = 6 \text{ h } 10 \text{ min}$$

La expresión de la potencia de mecanizado en función de la presión de corte, siendo \dot{z} el volumen de material eliminado por unidad de tiempo, tiene como resultado:

$$\dot{W} = p_c \cdot \dot{z} = p_c \cdot d \cdot a \cdot V = 2 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{10}{60} = 400 \text{ W}$$

EJERCICIO 20

Movimiento principal rectilíneo: cepillado

Un proceso de cepillado tiene lugar en una cepilladora con velocidad de corte aproximadamente constante de valor $V = 15$ m/min y una velocidad de retroceso, también constante de $V_r = 30$ m/min. Dicho proceso consiste en planificar, en una única pasada, la superficie superior de una pieza con forma de paralelepípedo de 1.000 mm de longitud, 100 mm de ancho y 100 mm de alto. El material para mecanizar es acero al carbono con una presión de corte de 250 daN/mm². El proceso se realiza con un avance de $0,2$ mm por doble carrera; las carreras complementarias de entrada y salida son de 100 mm cada una, y los tiempos de inversión son de $t_i = 3$ s.

Calcular la máxima profundidad de pasada si la potencia es de 500 W y el rendimiento del 85% , y el tiempo necesario para el mecanizado de la pieza.

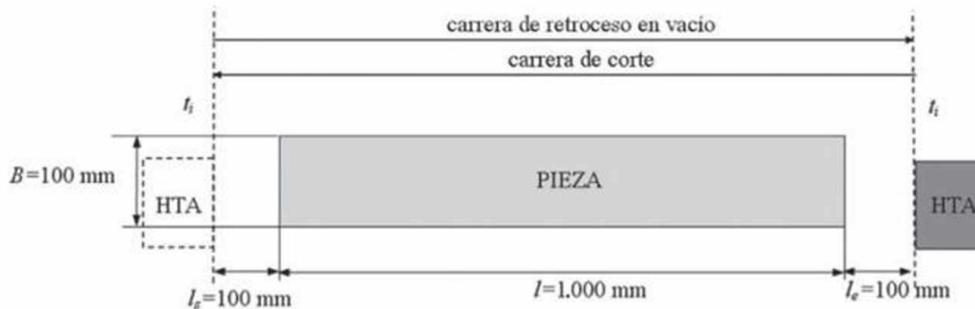
SOLUCIÓN

Figura 20.1. Esquema de un proceso de cepillado.

La potencia efectiva de la máquina se obtiene a partir de la potencia total y el rendimiento indicado:

$$\dot{W} = \dot{W}_T \cdot \eta = 500 \cdot 0,85 = 425 \text{ W}$$

A partir de la expresión de la potencia en función de la presión de corte, se puede hallar el volumen de material eliminado por unidad de tiempo:

$$\dot{W} = p_c \cdot \dot{z} = p_c \cdot d \cdot a \cdot V$$

$$\dot{z} = \frac{\dot{W}}{p_c} = \frac{425}{2.500 \cdot 10^6} = 1,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} = 170 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Y con este valor y el resto de los datos disponibles, es posible obtener la profundidad de pasada máxima:

$$\dot{z} = d \cdot a \cdot V \Rightarrow d = \frac{\dot{z}}{a \cdot V} = \frac{170}{0,2 \cdot \frac{15 \cdot 10^3}{60}} = 3,4 \text{ mm}$$

Para calcular el tiempo empleado en el proceso hay que conocer la longitud de cada carrera, l_c :

$$l_c = l_e + l + l_s = 100 + 1.000 + 100 = 1.200 \text{ mm}$$

así como el tiempo empleado en la doble carrera (dc):

$$t_{dc} = \frac{l_c}{V} + \frac{l_c}{V_r} + 2 \cdot t_i = \frac{1,2}{15} + \frac{1,2}{30} + 2 \cdot \frac{3}{60} = 0,22 \text{ min} = 13,2 \text{ s}$$

Y el número de dobles carreras necesarias para el planificado de la superficie de la pieza:

$$N_{dc} = \frac{B}{a} = \frac{100}{0,2} = 500$$

Con estos valores se puede calcular el tiempo total de mecanizado, t_m , de la pieza:

$$t_m = N_{dc} \cdot t_{dc} = 500 \cdot 13,20 = 6.600 \text{ s} = 110 \text{ min} = 1 \text{ h } 50 \text{ min}$$

EJERCICIO 21

Movimiento principal rectilíneo: brochado

Se quiere seleccionar una brocha de tracción para realizar el acabado interno de un agujero previamente realizado en una operación de taladrado. El espesor de la pieza es de 10 mm, el diámetro del taladro inicial es de 8 mm y el diámetro final que se pretende es de 9 mm.

Calcular el paso de la brocha y la longitud que debe tener considerando un incremento estándar por diente.

SOLUCIÓN

La longitud P o paso es la dimensión que controla el tamaño del hueco entre los dientes, cuya misión fundamental es la de servir de alojamiento a la totalidad de la viruta generada en la carrera de trabajo.

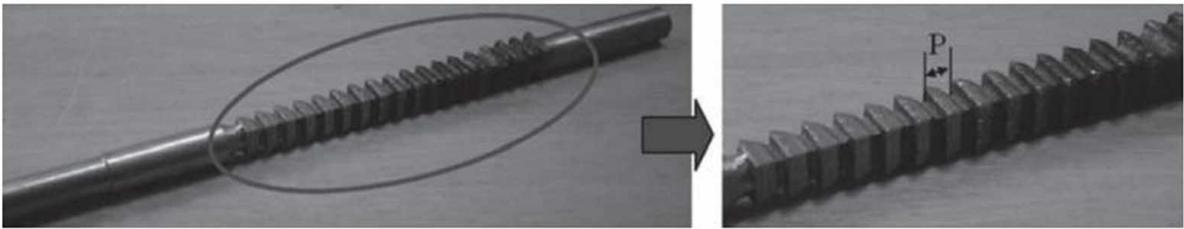


Figura 21.1. Detalle de una brocha.

Para un trabajo de acabado el cálculo se realiza de acuerdo a la siguiente relación y teniendo en cuenta la longitud que hay que mecanizar, l :

$$P = 0,6 \cdot \sqrt{3 \cdot l}$$

En este caso, aplicando los datos indicados en el enunciado, se obtiene:

$$P = 0,6 \cdot \sqrt{3 \cdot 10} = 3,28 \text{ mm}$$

Conocido el paso, P , la longitud de la brocha, L , se calcula a través de la siguiente expresión:

$$L = n_d \cdot P$$

Por lo que es necesario conocer el número de dientes, n_d :

$$n_d = \frac{d}{i}$$

donde:

- d es la profundidad de pasada total.
- i es el incremento estándar por diente.

En este caso, se contempla un incremento estándar por diente para acabado de valor $i = 0,05$ mm se pretende pasar de un diámetro de 8 mm a uno de 9 mm.

Se tiene una profundidad de pasada total de:

$$d = \frac{D_f - D_i}{2} = \frac{9 - 8}{2} = 0,50 \text{ mm}$$

Y su número de dientes es:

$$n_d = \frac{d}{i} = \frac{0,50}{0,05} = 10 \text{ dientes}$$

Por tanto, la longitud de la brocha, L , considerando el número de dientes necesarios para la realización del brochado en las condiciones indicadas y el paso, P , entre dientes ya calculado es:

$$L = n_d \cdot P = 10 \cdot 3,28 = 32,8 \text{ mm}$$

EJERCICIO 22

Movimiento principal rectilíneo: brochado

Se quiere seleccionar una brocha de tracción para mecanizar un agujero previamente realizado en una operación de taladrado. La longitud a mecanizar, l , es de 10 mm, el diámetro del taladro inicial es de 9 mm y el diámetro final es de 10 mm.

Calcular el paso de la brocha y la longitud de la parte activa de la misma, L , que debe tener si el incremento por diente, i , es igual a 0,25 mm en la zona de desbaste y a 0,05 mm en la zona de acabado.

SOLUCIÓN

Si es l la longitud a mecanizar, el paso, P , se puede calcular para la zona de desbaste, P_d , y para la zona de acabado, P_a , por las siguientes expresiones:

$$P_d = \sqrt{3 \cdot l}$$

$$P_a = 0,6 \cdot \sqrt{3 \cdot l}$$

Aplicando los datos indicados en el enunciado se obtiene:

$$P_d = \sqrt{3 \cdot 10} = 5,48 \text{ mm}$$

$$P_a = 0,6 \cdot \sqrt{3 \cdot 10} = 3,28 \text{ mm}$$

Conocido los pasos P_d y P_a , la longitud de la brocha, L , se calcula a través de la siguiente expresión:

$$L = L_d + L_a = n_{dd} \cdot P_d + n_{da} \cdot P_a$$

siendo n_{dd} y n_{da} el número de dientes para el desbaste y para el acabado respectivamente. Cada uno de ellos puede calcularse mediante la siguiente expresión general:

$$n_d = \frac{d}{i}$$

donde:

- d es la profundidad de pasada total.
- i es el incremento por diente (de valor 0,25 mm en la zona de desbaste y 0,05 mm en la zona de acabado).

Teniendo esto en cuenta, la longitud de la brocha de la parte activa de la misma, L , es igual a:

$$L = L_d + L_a = n_{dd} \cdot P_d + n_{da} \cdot P_a = \frac{(10-9)}{0,25} 5,48 + \frac{(10-9)}{0,05} 3,28 = 87,52 \text{ mm}$$

EJERCICIO 23

Otros procesos: fresado químico

Una placa de una aleación de aluminio de 1.000 mm de largo, 500 mm de ancho y 40 mm de espesor se mecaniza mediante fresado químico durante 4 h en el 40% de su área.

Calcular el espesor rebajado en el proceso suponiendo una eliminación de material media y el tiempo necesario para rebajar el 100% de la superficie en 15 mm.

Dato: La velocidad de ataque en este tipo de procesos oscila entre 0,012 y 0,07 mm/min.

SOLUCIÓN

La eliminación de material, según se indica en el enunciado, se realiza a velocidad media. Por ello, se toma como velocidad de ataque el valor medio de los valores límites dados:

$$\frac{0,012 + 0,07}{2} = 0,041 \text{ mm/min}$$

Teniendo en cuenta el tiempo del proceso indicado y la velocidad de ataque media calculada, el espesor del rebaje que hay que conseguir se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$t = \frac{h}{f}$$

donde:

- t es el tiempo empleado en el proceso.
- h es el espesor del rebaje que se debe conseguir.
- f es la velocidad de ataque.

por lo que el rebaje obtenido en el tiempo indicado es:

$$t = \frac{h}{f} \Rightarrow 4 \cdot 60 = \frac{h}{0,041} \Rightarrow h = 240 \cdot 0,041 = 9,84 \text{ mm}$$

El tiempo empleado en realizar un determinado rebaje es independiente del tanto por ciento de la superficie mecanizada. Por tanto, para saber el tiempo que necesita el fresado químico para conseguir el rebaje indicado, se aplica la misma expresión que en la fórmula anterior:

$$t = \frac{h}{f} \Rightarrow t = \frac{15}{0,041} \Rightarrow t = 365,85 \text{ min} \approx 6 \text{ h } 5 \text{ min } 51 \text{ s}$$

EJERCICIO 24***Vida de la herramienta***

Con la intención de determinar la vida de una herramienta se ha realizado un ensayo para el que se han empleado dos velocidades distintas, 40 m/min y 110 m/min, pero se han mantenido invariables el resto de parámetros. Para cada uno de los casos, se ha tomado el valor que presenta el ancho de la franja de desgaste, VB , a intervalos de 5 min; obteniéndose los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tiempo t (min)	VB_{40} (mm)	VB_{110} (mm)
0	0	0
5	0,200	0,400
10	0,325	0,575
15	0,450	0,750
20	0,575	0,925
25	0,700	1,100

Calcular la vida de la herramienta cuando se trabaja en condiciones semejantes a las del ensayo pero con una velocidad de corte de 65 m/min y tomando como criterio de inutilidad un valor de $VB = 0,600$ mm.

SOLUCIÓN

La solución a este problema se puede abordar de dos formas: analítica y gráfica.

SOLUCIÓN ANALÍTICA

Al tratarse de un ensayo en el que solo se varía la velocidad de corte, se puede aplicar la ecuación de Taylor:

$$V \cdot T^n = K$$

En primer lugar, es necesario comprobar que el valor de VB dado como criterio de inutilidad de la herramienta, se encuentra en la zona de crecimiento lineal de VB con t ; para lo que basta examinar los valores que se muestran en la tabla de datos.

En segundo lugar, es necesario calcular la vida de la herramienta para las velocidades ensayadas, lo que puede hacerse tan sencillamente como:

$$\frac{T_{40} - 20}{25 - 20} = \frac{0,600 - 0,575}{0,700 - 0,575} \Rightarrow T_{40} = 21 \text{ min}$$

$$\frac{T_{110} - 10}{15 - 10} = \frac{0,600 - 0,575}{0,750 - 0,575} \Rightarrow T_{110} = 10,71 \text{ min}$$

Luego:

$$40 \cdot 21^n = K \quad \text{y} \quad 110 \cdot 10,71^n = K$$

$$\left(\frac{21}{10,71} \right)^n = \frac{110}{40} \Rightarrow n = 1,502 \approx 1,50 \Rightarrow K = 40 \cdot 21^{1,50} = 3.872,87$$

Una vez obtenidas las constantes se puede calcular la vida de la herramienta para la velocidad indicada con tan solo aplicar la ecuación de Taylor:

$$V \cdot T^n = K \Rightarrow T^n = \frac{K}{V} \Rightarrow T^{1,50} = \frac{3.872,87}{65} \Rightarrow T = 15,20 \text{ min} = 912 \text{ s}$$

SOLUCIÓN GRÁFICA

Otra forma de solucionar el ejercicio es mediante una representación gráfica de los datos.

Primero se construye una gráfica con los valores aportados en el enunciado.

Un vez dibujada se localizan los puntos de intersección del valor que se da como criterio de inutilidad ($VB = 0,600 \text{ mm}$) y los valores de las velocidades. Estas intersecciones, llevadas a las abscisas, aportan el tiempo de vida de la herramienta para cada una de las velocidades ensayadas.

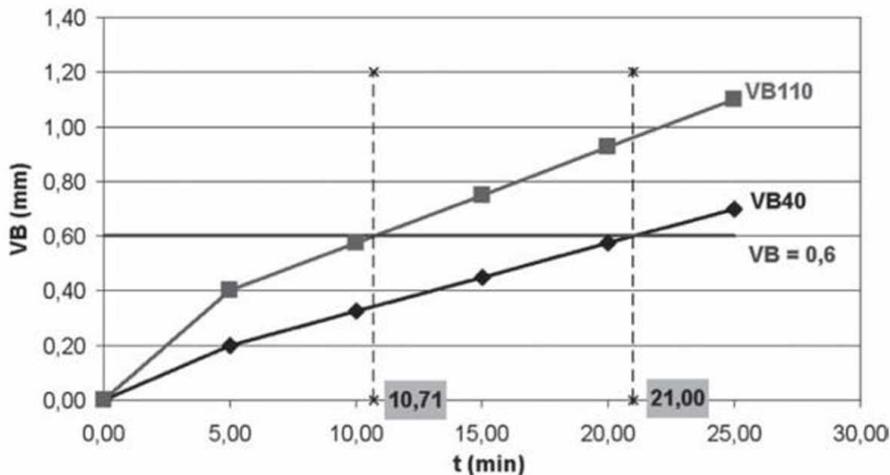


Figura 24.1. Valor del ancho de la franja de desgaste, VB , frente al tiempo, t .

Con el par de valores $(V;t)$ obtenidos $(40;21)$ y $(110;10,71)$, se realiza una nueva gráfica en escala logarítmica y se localiza el punto de intersección de la misma con el valor del logaritmo de la velocidad de corte para la que se quiere calcular la vida de la herramienta, es decir, $V = 65\text{m/min}$ ($\log 65 = 1,81$). El valor que se obtiene en ordenadas es el valor del logaritmo del tiempo de vida de la herramienta (1,18) para esa velocidad. Despejando en la expresión:

$$\log T = 1,18 \Rightarrow T = 15,20 \text{ min} = 912 \text{ s}$$

se obtiene el valor solicitado.

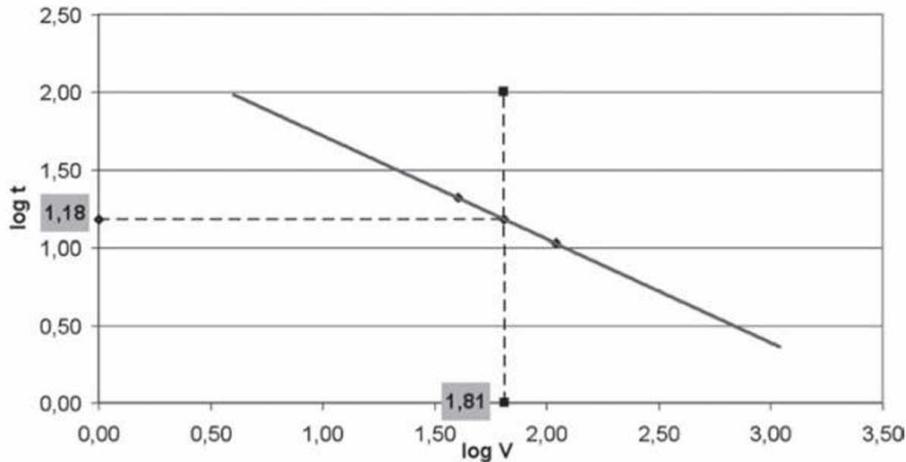


Figura 24.2. Vida de la herramienta frente a la velocidad de corte, V , en escala logarítmica.

EJERCICIO 25

Vida de la herramienta

Con la intención de determinar la vida de una herramienta se ha realizado un ensayo para el que se han empleado dos velocidades distintas, 35 m/min y 120 m/min, pero se han mantenido invariables el resto de parámetros. Para cada uno de los casos, se ha tomado el valor que presenta el ancho de la franja de desgaste, VB , a intervalos de 5 min; obteniéndose los resultados que se muestran en la siguiente tabla:

Tiempo t (min)	VB_{35} (mm)	VB_{120} (mm)
0	0	0
5	0,180	0,300
10	0,355	0,500
15	0,530	0,700
20	0,705	0,900
25	0,880	1,100

Calcular la vida de la herramienta cuando se trabaja en condiciones semejantes a las del ensayo pero con una velocidad de corte de 50 m/min y tomando como criterio de inutilidad un valor de $VB = 0,600$ mm.

SOLUCIÓN

La solución a este problema se puede abordar de dos formas: analítica y gráfica.

SOLUCIÓN ANALÍTICA

Al tratarse de un ensayo en el que solo se varía la velocidad de corte, se puede aplicar la ecuación de Taylor:

$$V \cdot T^n = K$$

En primer lugar, es necesario comprobar que el valor de VB dado como criterio de inutilidad de la herramienta, se encuentra en la zona de crecimiento lineal de VB con t ; para lo que basta examinar los valores que se muestran en la tabla de datos.

Después, es necesario calcular la vida de la herramienta para las velocidades ensayadas, lo cual puede hacerse tan sencillamente como:

$$\frac{T_{35} - 15}{20 - 15} = \frac{0,600 - 0,530}{0,700 - 0,530} \Rightarrow T_{35} = 17 \text{ min}$$

$$\frac{T_{120} - 10}{15 - 10} = \frac{0,600 - 0,500}{0,700 - 0,500} \Rightarrow T_{120} = 12,5 \text{ min}$$

Luego:

$$35 \cdot 17^n = K \quad \text{y} \quad 120 \cdot 12,5^n = K$$

$$\left(\frac{17}{12,5} \right)^n = \frac{120}{35} \Rightarrow n = 4,007 \approx 4,01 \Rightarrow K = 35 \cdot 17^{4,01} = 3.007.240$$

Una vez obtenidas las constantes se puede calcular la vida de la herramienta para la velocidad indicada con tan solo aplicar la ecuación de Taylor:

$$V \cdot T^n = K \Rightarrow T^n = \frac{K}{V} \Rightarrow T^{4,01} = \frac{3.007.240}{50} \Rightarrow T = 15,55 \text{ min} = 933 \text{ s}$$

SOLUCIÓN GRÁFICA

Otra forma de solucionar el ejercicio es mediante una representación gráfica de los datos.

Primero se construye una gráfica con los valores aportados en el enunciado.

Un vez dibujada se localizan los puntos de intersección del valor que se da como criterio de inutilidad (dato del problema: $VB = 0,600 \text{ mm}$) y los valores de las velocidades. Estas intersecciones, llevadas a las abscisas, aportan el tiempo de vida de la herramienta para cada una de las velocidades ensayadas.

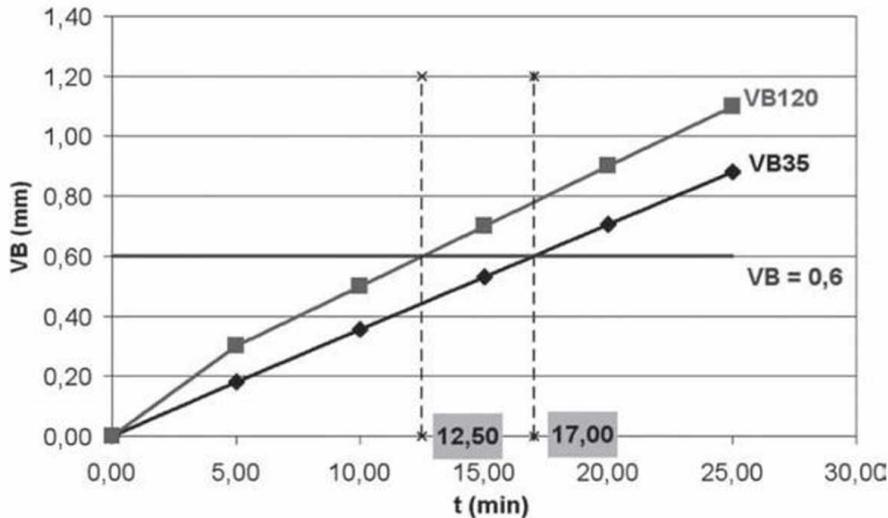


Figura 25.1. Valor del ancho de la franja de desgaste, VB , frente al tiempo, t .

Con el par de valores $(V;t)$ obtenidos $(35;17)$ y $(120;12,50)$, se realiza una nueva gráfica en escala logarítmica y se localiza el punto de intersección de la misma con el valor del logaritmo de la velocidad de corte para la que se quiere calcular la vida de la herramienta, es decir, $V = 50$ m/min ($\log 50 = 1,70$). El valor que se obtiene en ordenadas es el valor del logaritmo del tiempo de vida de la herramienta $(1,19)$ para esa velocidad. Despejando la expresión:

$$\log T = 1,19 \Rightarrow T = 15,55 \text{ min} = 933 \text{ s}$$

se obtiene el valor solicitado.

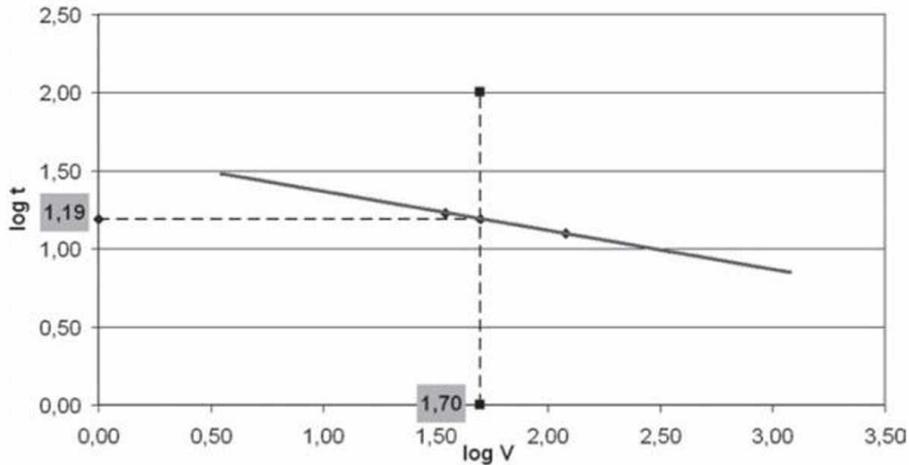


Figura 25.2. Vida de la herramienta frente a la velocidad de corte, V , en escala logarítmica.

EJERCICIO 26

Vida de la herramienta: torno

Ensayos realizados en un proceso de cilindrado con una herramienta de metal duro recubierto, con avance y profundidad de pasada constante, permiten apreciar que el criterio de inutilidad de la parte activa de la herramienta empleada se alcanza a los 10 min de funcionamiento, cuando la velocidad de corte es de 300 m/min, y a los 20 min cuando dicha velocidad es de 200 m/min.

Calcular la velocidad de corte para una vida de herramienta de 15 min, valor que es usual en catálogos de herramientas de este tipo, e indicar cuál ha de ser la velocidad de giro seleccionada en el torno para cilindrar con una vida de herramienta igual o lo más próxima posible, pero en todo caso superior, a 15 min, si se mecanizan, bajo condiciones análogas, piezas cilíndricas desde un diámetro inicial de 54 mm a uno final de 50 mm.

Nota: El torno tiene una gama de regímenes de giro con un escalonamiento de 100 rpm.

SOLUCIÓN

La expresión de la ecuación de Taylor es:

$$V \cdot T^n = K$$

y aplicando los valores de los ensayos se obtiene:

$$300 \cdot 10^n = K$$

$$200 \cdot 20^n = K$$

luego:

$$30 \cdot 10^n = 200 \cdot 20^n$$

donde:

$$n \cdot \log 0,50 = \log 0,67 \Rightarrow n = 0,58$$

y de las ecuaciones anteriores, se extrae:

$$300 \cdot 10^{0,58} = K = 1.140,57$$

Por lo que la ecuación de Taylor para el caso considerado es:

$$V \cdot T^{0,58} = 1.140,57$$

Para una vida de herramienta de 15 min, se tiene:

$$V \cdot 15^{0,58} = 1.140,57 \Rightarrow V = \frac{1.140,57}{15^{0,58}} = 237,13 \text{ m/min} = 3,95 \text{ m/s}$$

Para conseguir alcanzar 237,13 m/min con un diámetro medio de 52 mm, el cabezal del torno debe girar a:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} \Rightarrow N = \frac{V \cdot 1.000}{\pi \cdot D} = \frac{237,13 \cdot 1.000}{\pi \cdot 52} = 1.451,55 \text{ rpm}$$

Por tanto, para cumplir la condición impuesta en el enunciado se toma $N = 1.400$ rpm.

Para el cálculo de la vida de la herramienta se necesita conocer la velocidad de trabajo para el giro del torno calculado:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 52 \cdot 1.400}{1.000} = 228,71 \text{ m/min}$$

Y en este caso, la vida de la herramienta es:

$$V \cdot T^{0,58} = 1.140,57 \Rightarrow 228,71 \cdot T^{0,58} = 1.140,57 \Rightarrow T = \left(\frac{1.140,57}{228,71} \right)^{1/0,58} = 15,96 \text{ min}$$

EJERCICIO 27***Vida de la herramienta: torno***

Mediante la realización de diversos ensayos de cilindrado en una pasada, con una herramienta de acero rápido, con un avance de 0,2 mm/vuelta y una profundidad de pasada de 2 mm, se obtiene la siguiente ecuación de vida de la herramienta:

$$V(\text{m/min}) \cdot T(\text{min})^{0,15} = 515$$

Para un proceso de cilindrado en condiciones operativas análogas, calcular:

- ¿Cuál debe ser la velocidad de corte para que la vida de la herramienta sea de 15 min?
- ¿Qué régimen de giro se debe emplear para que la vida de la herramienta sea la máxima posible, pero inferior a 15 min, si el diámetro de la pieza de partida es de 150 mm y los regímenes de giro del cabezal del torno, que pueden ser seleccionados, han de ser múltiplos de 5 rpm? ¿Qué velocidad de corte se estará empleando entonces?
- ¿Cuál es el caudal de material eliminado? ¿Cuál es el volumen total de material eliminado en el proceso?

Nota: Se han de hacer las hipótesis complementarias que se consideren necesarias para la resolución de estos apartados siempre que se justifiquen adecuadamente.

SOLUCIÓN**Apartado A**

Con la ecuación de Taylor y el tiempo solicitado, se calcula la velocidad de corte:

$$V \cdot 15^{0,15} = 515 \Rightarrow V = \frac{515}{15^{0,15}} = 343,08 \text{ m/min} = 5,72 \text{ m/s}$$

Apartado B

Para conseguir 343,08 m/min con un diámetro de 150 mm, el cabezal del torno debe girar a:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} \Rightarrow N = \frac{V \cdot 1.000}{\pi \cdot D} = \frac{343,08 \cdot 1.000}{\pi \cdot 150} = 728,04 \text{ rpm}$$

Por tanto, para que la vida de la herramienta sea menor de 15 min, se toma $N = 730$ rpm.

La velocidad de corte para el régimen de giro seleccionado es:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000} = \frac{\pi \cdot 150 \cdot 730}{1.000} = 344 \text{ m/min}$$

Y, en este caso, la vida de la herramienta es:

$$V \cdot T^{0,15} = 515 \Rightarrow 344 \cdot T^{0,15} = 515 \Rightarrow T = \left(\frac{515}{344} \right)^{\frac{1}{0,15}} = 14,73 \text{ min} < 15 \text{ min}$$

Apartado C

El volumen de material eliminado por minuto viene dado por:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot f$$

donde:

— D_m es el diámetro medio que se calcula de la siguiente manera:

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2}$$

— D_f es el diámetro final:

$$\Rightarrow D_f = D_i - 2d = 150 - 2 \cdot 2 = 146 \text{ mm}$$

$$D_m = \frac{D_i + D_f}{2} = \frac{150 + 146}{2} = 148 \text{ mm}$$

Por tanto, el volumen de material eliminado por minuto es:

$$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N = \pi \cdot 148 \cdot 2 \cdot 0,2 \cdot 730 = 135.767,07 \text{ mm}^3/\text{min} = 2.262,78 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Para calcular el material total eliminado en el proceso se pueden realizar varias hipótesis, que deben explicarse y justificarse adecuadamente.

Como ejemplo, se proponen dos posibles opciones de cálculo en respuesta a la segunda cuestión del apartado c.

Opción 1

Se puede calcular el volumen total del material eliminado en el proceso en función de la longitud de la preforma que hay que mecanizar. Así, si se establece una longitud de 1 m como referencia, el

cálculo se puede realizar por consideraciones geométricas, como la diferencia entre los volúmenes de las preformas inicial y final, por lo que la expresión que se debe utilizar es:

$$Vol = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i^2 - D_f^2) \cdot l = \frac{\pi}{4} \cdot (150^2 - 146^2) \cdot 1.000 = 929.911,43 \text{ mm}^3 \approx 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Opción 2

Si se considera volumen total de material eliminado aquel que se elimina mientras que una herramienta está operativa (calculada anteriormente, $T=14,73$ min), se debe tener en cuenta el volumen de material eliminado por minuto y el tiempo de vida de la herramienta:

$$Vol = \dot{z} \cdot T = 135.767,07 \cdot 14,73 = 1.999.848,94 \text{ mm}^3 \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

EJERCICIO 28

Costes en el mecanizado

Se realiza una operación de cilindrado con una herramienta monofilo de acero de alta velocidad sobre un redondo de acero suave que tiene una longitud de 600 mm y un diámetro de 150 mm. El proceso se realiza con un avance de 0,20 mm/rev y una profundidad de pasada constante de 2 mm, considerando un tiempo no productivo de 4 min y un tiempo de reposición de filo de 3 min. El costo de la máquina y operador se ha estimado en 20 €/h y el costo de la herramienta en 2 € por filo de corte.

Calcular la vida de la herramienta y la velocidad de corte tanto para un mínimo coste como para una máxima producción.

Nota: Los parámetros de la ecuación de Taylor generalizada son: $K = 65$, $n = 0,13$ y $n_1 = 0,09$.

SOLUCIÓN

La relación entre costes, velocidad de corte, avance y vida de la herramienta para un mínimo coste, viene dada por la expresión:

$$T_{mc} \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot \left(t_{rf} + \frac{C_{hf}}{\dot{c}} \right) = \frac{K}{V^{1/n} \cdot a^{1/n_1}}$$

donde:

- T_{mc} es la vida de la herramienta para un mínimo coste.
- t_{rf} es el tiempo de reposición de filo.
- C_{hf} es el coste de la herramienta por filo.
- \dot{c} es el coste por unidad de tiempo de operación de la máquina.
- V es la velocidad de corte.
- a es el avance.
- K , n y n_1 son los parámetros de la ecuación de Taylor generalizada.

Por tanto, para calcular la vida de la herramienta solicitada, se aplica la expresión:

$$T_{mc} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot \left(t_{rf} + \frac{C_{hf}}{\dot{c}} \right) = \left(\frac{1}{0,13} - 1 \right) \cdot \left(3 + \frac{2}{20/60} \right) = 60,64 \text{ min} = 60 \text{ min } 38 \text{ s}$$

Para obtener la velocidad de corte, se formula la ecuación de Taylor generalizada para una profundidad de pasada, d , constante:

$$T_{mc} = \frac{K}{V^{1/n} \cdot a^{1/n_1}} \Rightarrow 60,64 = \frac{65}{V^{1/0,13} \cdot a^{1/0,09}} \Rightarrow V = 10,32 \text{ m/min}$$

La relación entre costes, velocidad de corte, avance y vida de la herramienta para una máxima producción, viene dada por la expresión:

$$T_{mp} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot t_{rf} = \frac{K}{V^{1/n} \cdot a^{1/n_1}}$$

donde:

- T_{mp} es la vida de la herramienta para una máxima producción.
- t_{rf} es el tiempo de reposición de filo.
- V es la velocidad de corte.
- a es el avance.
- K , n y n_1 son los parámetros de la ecuación de Taylor generalizada.

Por tanto, para calcular la vida de la herramienta solicitada, se aplica la expresión:

$$T_{mp} = \left(\frac{1}{n} - 1 \right) \cdot t_{rf} = \left(\frac{1}{0,13} - 1 \right) \cdot 3 = 20,08 \text{ min} \approx 20 \text{ min}$$

Para obtener la velocidad de corte, se formula la ecuación de Taylor generalizada para una profundidad de pasada, d , constante:

$$T_{mp} = \frac{K}{V^{1/n} \cdot a^{1/n_1}} \Rightarrow 20,08 = \frac{65}{V^{1/0,13} \cdot 0,20^{1/0,09}} \Rightarrow V = 11,91 \text{ m/min}$$

Como se puede ver, los resultados obtenidos $T_{mp} < T_{mc}$ y $V_{mp} > V_{mc}$ son los que cabía esperar (Figura 28.1)

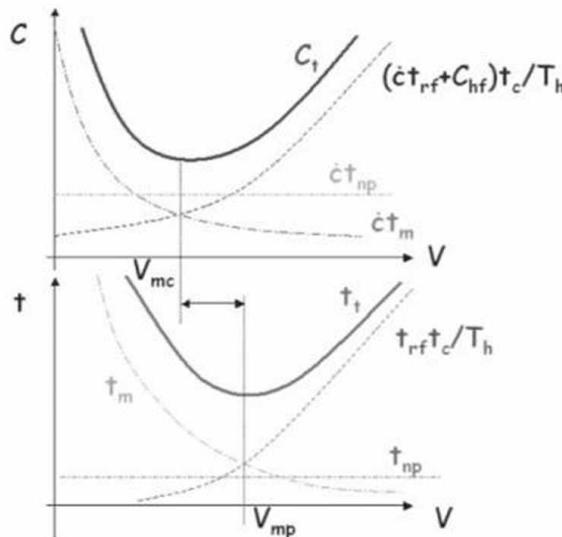


Figura 28.1. Coste y tiempo por componente frente a velocidad.

EJERCICIO 29

Planificación de procesos

Enumerar la secuencia de operaciones que hay que realizar para obtener la pieza representada en la Figura 29.1, en acero de resistencia $R = 60 \text{ daN/mm}^2$ convencional y cuyas características están recogidas en la Tabla 29.1, sabiendo que se dispone de herramientas de acero rápido. Las tolerancias no indicadas en el plano de la pieza se tomarán del intervalo IT-13 reunidas en la Tabla 29.2, basada en la norma UNE-EN 20286-1:1996.

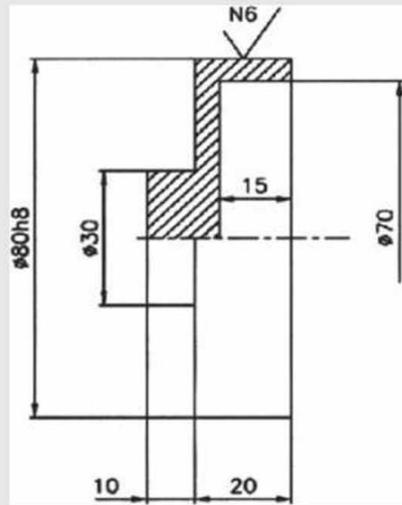


Figura 29.1. Pieza que mecanizar.

Notas:

1. La velocidad de giro del husillo principal, N , viene dada para cilindrado y refrentado por las siguientes expresiones:

a) Cilindrado:

$$T = \frac{1.000 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

b) Refrentado:

$$N = \frac{1.000 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{\left(1 + \frac{1}{n} \right)}} \right)^n$$

donde:

- r_i es el radio interior.
- r_e es el radio exterior.
- n es un coeficiente que depende del material de la herramienta. Para aceros rápidos, $n = 1/6$.

2. La velocidad de corte recomendada por el fabricante, en función del material para mecanizar y del material de la herramienta, puede tomarse de la Tabla 29.3.

Tabla 29.1. Características del torno empleado en el mecanizado

Velocidades del torno (rpm): 56 - 71 - 90 - 112 - 140 - 180 - 224 - 400 - 500 - 630 - 800 - 1.000 - 1.250 - 1.600

Potencia de accionamiento: 1,5 kW

Avances de cilindrado y refrentado (mm/rev)

N.º de dientes por rueda		1	2	3	4	5	6	7	8	9
30-120	Cilindrado	0,032	0,035	0,037	0,410	0,044	0,049	0,051	0,054	0,061
	Refrentado	0,022	0,024	0,026	0,028	0,031	0,034	0,035	0,037	0,042
30-120	Cilindrado	0,065	0,070	0,075	0,082	0,088	0,098	0,102	0,108	0,122
	Refrentado	0,044	0,048	0,052	0,056	0,062	0,068	0,070	0,074	0,084
60-60	Cilindrado	0,130	0,140	0,150	0,160	0,176	0,196	0,204	0,216	0,244
	Refrentado	0,088	0,096	0,104	0,112	0,124	0,136	0,140	0,148	0,168
60-60	Cilindrado	0,260	0,280	0,300	0,320	0,350	0,390	0,400	0,430	0,480
	Refrentado	0,176	0,192	0,208	0,024	0,248	0,270	0,280	0,290	0,330
90-45	Cilindrado	0,520	0,460	0,600	0,640	0,700	0,780	0,800	0,860	0,960
	Refrentado	0,350	0,380	0,400	0,440	0,490	0,540	0,560	0,580	0,660
90-45	Cilindrado	0,260	0,280	0,300	0,320	0,350	0,390	0,400	0,430	0,480
	Refrentado	0,176	0,192	0,208	0,022	0,248	0,270	0,280	0,290	0,330

Tabla 29.2. Calidades de tolerancias para ejes y agujeros (UNE-EN 20286-1:1996)

Grupos de diámetros (mm)	Calidades																	
	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16
	0 ≤ 3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400
3 < d ≤ 6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
6 < d ≤ 10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
10 < d ≤ 18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1.100
18 < d ≤ 30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1.300
30 < d ≤ 50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1.000	1.600
50 < d ≤ 80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1.200	1.900

Tabla 29.2. Calidades de tolerancias para ejes y agujeros (UNE-EN 20286-1:1996). (Cont.)

Grupos de diámetros (mm)	Calidades																	
	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
80 < d ≤ 120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1.400	2.200
120 < d ≤ 180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1.000	1.600	2.500
180 < d ≤ 250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1.150	1.850	2.900
250 < d ≤ 315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1.300	2.100	3.200
315 < d ≤ 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1.400	2.300	3.600
400 < d ≤ 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1.550	2.500	4.000
	Ultraprecisión					Calibre y piezas de gran precisión					Piezas o elementos para ajustar					Piezas o elementos que no se han de ajustar		

Tabla 29.3. Velocidades de corte recomendadas por el fabricante en función de los materiales de la pieza, de la herramienta y el tipo de operación

Velocidad de corte en el torneado (m/min)					
Material para mecanizar		Herramientas de acero rápido		Herramientas de carburo metálico	
		Desbaste	Acabado	Desbaste	Acabado
Aceros al carbono	R = 50 daN/mm ²	35	45	165	210
	R = 60 daN/mm ²	30	40	135	160
	R = 70 daN/mm ²	25	35	110	135
	R = 80 daN/mm ²	20	30	90	110
Acero moldeado	R = 40 daN/mm ²	25	35	120	145
	R = 50 daN/mm ²	12	20	95	110
	R = 60 daN/mm ²	10	15	65	75
Aceros aleados	R = 70-90 daN/mm ²	20	30	65	80
Aceros inoxidables	R = 70-90 daN/mm ²	10	15	35	50
Aceros de herramienta	R = 100-150 daN/mm ²	5	8	30	45

SOLUCIÓN

La resolución de este tipo de problemas en los que se parte del plano de la pieza y hay que definir el proceso de fabricación de la misma, consiste en especificar todos los elementos que intervienen (máquinas, preforma, utillajes y herramientas), las operaciones necesarias para fabricar la pieza (refrentado, cilindrado, ranurado, roscado o tronzado, por citar solo algunas de las más empleadas en torneado) y el valor de las condiciones de corte (velocidad de corte, V ; avance, a , y profundidad de pasada, d).

En este caso, las máquinas que se deben emplear son: un torno convencional, cuyas principales características están recogidas en la Tabla 29.1, y una rectificadora capaz de alcanzar el grado de acabado superficial, N6, indicado en el plano. La preforma se ha definido intentando lograr el equilibrio entre la economía del mecanizado y la seguridad de amarre a la máquina. Para ello, se ha tomado una

preforma de partida de 38 mm de longitud y 85 mm de diámetro; pero serían posibles otras preformas de dimensiones cercanas. En cuanto a los utillajes, no ha sido necesario definir ninguno específico ya que los propios dispositivos de la máquina, plato de garras, han sido suficientes para su sujeción. Lo mismo ha ocurrido con las herramientas, para lo que no ha hecho falta seleccionar ninguna en concreto. Las operaciones de mecanizado realizadas han sido de refrentado, cilindrado, punteado y taladrado. A continuación se va a indicar cómo se han definido las condiciones de corte y se va a mostrar un ejemplo de aplicación con la primera operación realizada. Para el resto de las operaciones se dan los resultados obtenidos de forma esquemática.

SELECCIÓN Y CÁLCULO DE PARÁMETROS EN OPERACIONES DE TORNEADO

Elección de la velocidad de corte

A la hora de tomar la velocidad de corte para una determinada operación de mecanizado, se pueden considerar distintos criterios. Los más extendidos son: el coste de producción mínimo, el tiempo de producción mínimo (máxima producción en la unidad de tiempo) y el máximo beneficio.

Generalmente, no es un ejercicio sencillo y, en la práctica, se suelen emplear valores, avalados por la experiencia, que proporcionan buen rendimiento y que cubren los tres criterios, aunque no se optimice ninguno de ellos en particular. Por otra parte, según se ha podido comprobar en la práctica, no existen grandes diferencias entre las velocidades óptimas encontradas para cada criterio.

En este caso, tratándose de un acero al carbono cuya resistencia a rotura es $R = 60 \text{ kg/mm}^2$, puede verse en la Tabla 29.3 que las velocidades de corte en el torneado en desbaste y en acabado han de estar en torno a 30 y 40 m/min, respectivamente.

Las dos operaciones fundamentales que se desarrollan en un proceso de mecanizado con torno son: cilindrado y refrentado. En cada uno de ellas, las velocidades de corte antes señaladas, permiten calcular la velocidad de rotación del husillo principal de la máquina-herramienta.

Así, en el cilindrado, se tiene la siguiente expresión para calcular la velocidad de giro del husillo a partir de la velocidad de corte recomendada por el fabricante:

$$N = \frac{1.000 \cdot V}{\pi \cdot D} \quad (1)$$

expresión en la que la velocidad de corte, V , se mide en metros por minutos y el diámetro de la pieza, D , en milímetros. D es conocido y depende de la geometría de la pieza y el valor de V se busca en la Tabla 29.3 teniendo en cuenta las características del material que hay que mecanizar ($R = 60 \text{ daN/mm}^2$) y las herramientas de acero rápido en desbaste (30 m/min) o acabado (40 m/min) según sea la operación de la que se trate.

Con respecto a la ecuación (1), se obtiene el valor de las revoluciones del husillo calculadas, N_{cal} , y desde la Tabla 29.1 se elige el valor de N más próximo al calculado N_{cal} y por debajo de él. Con esta velocidad de rotación y la ecuación (1) se consigue la velocidad de corte real a la que cortará la herramienta en esta operación.

En las operaciones de refrentado, aunque la velocidad de rotación del husillo principal del torno es constante, la velocidad de corte, V , es variable. Si se supone un caso general de refrentado de una superficie con forma de corona circular, de radios exterior e interior dados respectivamente por r_e y r_i , la velocidad de corte variará desde un valor mínimo, V_{min} , en la superficie exterior caracterizada por r_e , hasta un valor máximo, V_{max} , en la superficie interior dada por r_i .

En este caso, la velocidad de rotación del husillo viene dada por:

$$N = \frac{1.000 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{\left(1 + \frac{1}{n} \right)}} \right)^n \quad (2)$$

donde n depende del material de la herramienta. Para el caso de herramientas de acero rápido, $n = 1/6$.

De forma análoga al cilindrado, se toma la expresión (2) con una velocidad de corte de 30 o 40 m/min, según se trate de desbaste o acabado, se calcula el N_{cal} y se toma el N inferior más cercano que da la máquina. Con este valor y la expresión (2) se obtiene la velocidad de corte, V .

Elección del avance

Para elegir el avance, hay que distinguir entre operaciones de desbaste y acabado. En las operaciones de desbaste, la elección del avance está condicionada por criterios de máxima producción y vida de la herramienta.

Para conseguir eliminar mayor volumen de material en la unidad de tiempo y, por tanto, aumentar la producción, es preferible incrementar el avance a la velocidad de corte ya que los incrementos en la velocidad de corte reducen más la vida de la herramienta que los incrementos en el avance. Ahora bien, estos incrementos en el avance estarán limitados por las posibilidades de la máquina-herramienta, pues un aumento del avance supone un aumento de la fuerza de corte, mientras que un incremento de la velocidad de corte apenas influye en dicha fuerza.

Como resumen, en desbaste se debe seleccionar, siempre que se pueda, el avance máximo posible procurando que sea inferior a 0,5 mm/rev, para evitar problemas de desgaste de las herramientas.

En operaciones de acabado, el avance queda definido por la condición de acabado superficial impuesta a la superficie mecanizada. La rugosidad superficial de la superficie mecanizada, $R_a(\mu\text{m})$, depende del avance, a (mm/rev), y del radio, r_e (mm), de la punta de la herramienta, según la expresión:

$$R_{aideal} = 0,032 \frac{a^2}{r_e} \quad (3)$$

Generalmente es adecuado tomar valores de $r_e = 0,2$ mm ya que valores más altos, aunque mejoran el acabado, aumentan mucho el rozamiento entre la pieza y la herramienta, y pueden aparecer retemblados, fácilmente detectables con rugosímetro.

En este ejercicio se toma $R_a = 1,6$ μm para todas las superficies, salvo para la que requiere un acabado superficial N6, en la cual $R_a = 0,8$ μm , según indica la norma UNE-EN ISO 1302:2002.

A partir de la expresión (3) se obtiene el avance, a ; valor a partir del cual se elige el avance definitivo del cuadro de características del torno (Tabla 29.1), teniendo en cuenta una reducción del orden del 15%, conveniente para conseguir un mecanizado óptimo, ya que interesa utilizar un avance pequeño.

En cuanto a las limitaciones de la máquina-herramienta referidas más arriba y que vienen impuestas, principalmente, por la potencia de corte que es necesaria para realizar las distintas operaciones, en particular, las de desbaste, cabe hacer las siguientes consideraciones:

Durante el proceso de torneado, aparece una interacción entre pieza y herramienta, que da lugar a una fuerza resultante, \vec{R} , que puede ser descompuesta según diferentes direcciones. De ellas, la que suele interesar es la proyección en la dirección de la velocidad de corte, denominada fuerza de corte, F_c , por permitir calcular la potencia necesaria, \dot{W} , con tan solo multiplicar por la velocidad de corte, V . Es decir:

$$\dot{W} = F_c \cdot V \quad (4)$$

Con la fuerza de corte dada por:

$$F_c = p_c A_1 \quad (5)$$

donde A_1 es la sección de viruta sin deformar y, p_c , la presión de corte.

La presión de corte, p_c , en general no es constante, y depende de factores como el material de la pieza, el material y la geometría de la herramienta, la sección de viruta, la velocidad de corte, las condiciones de lubricación y refrigeración, y el desgaste de la herramienta, por citar solo los más relevantes. Por ello, se han desarrollado métodos experimentales y semiexperimentales para su determinación, como son el método de Kronenberg, según el cual p_c viene dada a través de tablas y el método de corte ortogonal que da la dependencia de p_c respecto al material y a la posición del plano de deslizamiento.

Sin embargo, se ha podido comprobar que la presión de corte es casi constante para pequeñas variaciones de las condiciones de corte y viene dada, para el caso de los aceros, por:

$$p_c = 5 \cdot R \quad (6)$$

para secciones de viruta no deformada de aproximadamente 1 mm^2 , como corresponde a las operaciones llevadas a cabo en este proceso. R representa el esfuerzo de rotura del acero utilizado y, en este caso, de valor $R = 60$ daN/mm².

Por otra parte, la potencia de corte no debe superar la potencia disponible o potencia efectiva, para, de esta manera, poder absorber pequeñas sobrecargas, evitar vibraciones y obtener una regularidad de marcha en el mecanizado.

Si se llama \dot{W}_m a la potencia del motor que proporciona el movimiento principal de corte y los movimientos de las transmisiones mecánicas de la máquina, hay que tener en cuenta que, de la potencia motor, solo será útil, \dot{W}_u , la que resulta de descontar la que se emplea en los movimientos de las transmisiones mecánicas de la máquina. Esto es:

$$\dot{W}_u = \eta \cdot \dot{W}_m \quad (7)$$

Donde η es el rendimiento de las transmisiones mecánicas de la máquina y suele estar comprendido entre $0,6 < \eta < 0,9$.

Como en este caso $\dot{W}_m = 1,5$ kW, si se toma el rendimiento $\eta = 0,9$, se tendrá una potencia útil de $\dot{W}_u = 1,3$ kW.

Elección de la profundidad de pasada

La profundidad de pasada viene definida, en muchos casos, por las creces de mecanizado y, en otros, por la anchura máxima permisible del filo de la herramienta en contacto con la pieza que se va a mecanizar.

La solución de compromiso que se tiene que adoptar a lo largo de todas las operaciones, lleva a la selección, en desbaste, de avances lo más grandes posibles ($a \cong 0,5$ mm/rev) y profundidades de pasada de, aproximadamente, 4 mm; de manera que la potencia disponible sea menor o igual a 1,3 kW; y, en acabado, a la selección de avances pequeños ($a \leq 0,2$ mm/rev) y profundidades de pasada inferiores a 0,6 mm.

SELECCIÓN Y CÁLCULO DE PARÁMETROS EN OPERACIONES DE TALADRADO

Antes de mecanizar la parte interior de la pieza, hay que realizar un taladro de unos 16 mm de diámetro con el fin de poder introducir la herramienta de cilindrar interiores.

La potencia de corte no debe superar el valor de 1,3 kW por lo que la operación de taladrado se realizará en tres fases, partiendo de una broca de 6 mm de diámetro, y aumentando posteriormente a otras de 12 mm y 16 mm.

Las brocas poseen dos filos, valor que hay que tener en cuenta al evaluar el avance de la herramienta. Este, no obstante, debe ser manual, ya que el torno usado no permite taladrar con avance automático.

La velocidad de corte que se toma inicialmente corresponde a desbaste (30 m/min) y permite elegir la velocidad de rotación del husillo principal de la máquina-herramienta mediante la ecuación (1); teniendo en cuenta que el diámetro de la broca empleada ha de ser tal que no se supere la potencia útil disponible para el corte. La ecuación (8) relaciona la potencia útil con el diámetro de la broca empleado, con la velocidad de giro del husillo y con el avance utilizado.

$$\dot{W}_u = \frac{p_c \cdot \pi \cdot D^2 \cdot N \cdot f}{4} \quad (8)$$

Según esto, se elige la broca inicial de $D = 6$ mm y a partir de ahí se toman las siguientes con diámetros de 12 mm y 16 mm respectivamente.

Cálculo de los tiempos de mecanizado

Para calcular los tiempos de mecanizado correspondientes a una operación dada hay que distinguir entre operaciones de cilindrado y refrentado. Así, en las operaciones de cilindrado se tiene la siguiente expresión:

$$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + d \cdot \cotg \chi_r + l + l_s}{a \cdot N} \quad (9)$$

donde:

- l_e es la longitud de entrada o distancia de seguridad que desplaza el operario la herramienta respecto a la pieza para que no haya penetración. Para evitar que el tiempo de mecanizado aumente excesivamente se le da un valor de 3 mm.
- l_s es la longitud de salida o distancia que deja el operario entre la herramienta y la pieza una vez que se ha terminado de efectuar la operación de cilindrado. Se suele tomar de valor 3 mm siempre que la geometría de la pieza lo permita.
- l es la longitud total que hay que mecanizar,
- χ_r es el ángulo de posición, esto es, el que forma la arista de corte con la dirección de la velocidad de corte. Se toma 12° en el caso de desbaste y 20° en el de acabado.

Para operaciones de refrentado se utiliza la siguiente expresión:

$$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + d \cdot \cotg \chi_r + r_e - r_i + l_s}{a \cdot N} \quad (10)$$

donde l_e , l_s y χ_r tienen el mismo significado que para operaciones de cilindrado, siendo ahora el valor χ_r igual a 25° , y r_e y r_i los radios exterior e interior del refrentado realizado.

Ejemplo: operación 1

Con los datos aportados sobre el material (acero con $R = 60$ daN/mm²) y teniendo en cuenta que las herramientas son de acero rápido, se analiza la Tabla 29.3 para elegir la velocidad de corte recomendada que, para el tipo de proceso que realizar (desbaste), es de 30 m/min.

A partir de ella se puede obtener N aplicando la expresión para el caso de refrentado, teniendo en cuenta que r_i es 0 y r_e se calcula a partir del diámetro indicado:

$$N = \frac{1.000 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{\left(1 + \frac{1}{n} \right)}} \right)^n = \frac{1.000 \cdot 30}{2 \cdot \pi \cdot 85/2} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{1/6} \right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{0}{85/2} \right)}{1 - \left(\frac{0}{85/2} \right)^{\left(1 + \frac{1}{1/6} \right)}} \right)^{1/6} = 155,38 \text{ rpm}$$

De la gama de velocidades del torno (Tabla 29.1) se toma 140 rpm y se calcula la velocidad de corte real a la que se realiza el proceso:

$$N = \frac{1.000 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left(\left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)}{1 - \left(\frac{r_i}{r_e} \right)^{\left(1 + \frac{1}{n} \right)}} \right)^n = \frac{1.000 \cdot V}{2 \cdot \pi \cdot r_e} \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right)^n$$

$$V = \frac{N}{\left(1 + \frac{1}{n} \right)^n} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_e}{1.000} = \frac{140}{\left(1 + \frac{1}{1/6} \right)^{1/6}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 85/2}{1.000} = 27,03 \text{ m/min}$$

Como se ha indicado anteriormente, la potencia del torno es 1,5 kW luego, suponiendo que el rendimiento de la máquina por pérdidas en las transmisiones es del 90% ($\eta = 0,9$), la potencia útil disponible es igual a:

$$\dot{W}_u = \eta \cdot \dot{W}_m = 0,9 \cdot 1,5 = 1,3 \text{ kW}$$

Con la potencia y la velocidad obtenidas, se puede calcular la fuerza de corte:

$$F_c = \frac{\dot{W}}{V} = \frac{1,3 \cdot 1.000}{27,03/60} = 2.944 \text{ N}$$

y con ella la sección de viruta no deformada A , teniendo en cuenta que la presión de corte se puede tomar igual a cinco veces la tensión de rotura del material (ecuación 5):

$$A_1 = \frac{F_c}{p_c} = \frac{2.944}{5 \cdot 60 \cdot 9,81} = 1 \text{ mm}^2$$

y calcular el avance para el proceso, cuya profundidad de corte $d = 4$ mm:

$$a = \frac{A_1}{d} = \frac{1}{4} = 0,250 \text{ mm/rev}$$

que es el avance para la operación de refrentado en desbaste.

Para la pasada de acabado se obtiene el avance, a , a partir de la expresión (3). Al valor obtenido hay que aplicarle una reducción del orden del 15%, para conseguir un mecanizado óptimo (ya que interesa utilizar avances pequeños):

$$a = \sqrt[r_{\varepsilon}]{\frac{R_{ideal}}{0,032}} = \sqrt[0,2]{\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{0,032}} = 0,1 \text{ mm/rev}$$

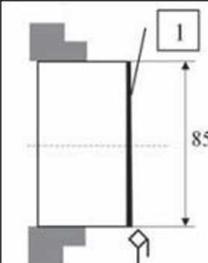
que con la reducción del 15 % da como resultado:

$$a = 0,085 \text{ mm/rev}$$

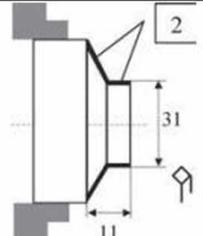
La profundidad de pasada en acabado es $d = 0,5 \text{ mm}$.

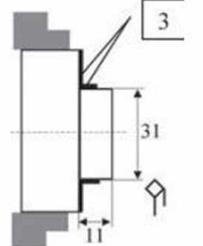
Si se unen los valores del avance para refrentado en desbaste y en acabado que se han calculado, a la tabla de características del torno (Tabla 29.1), y teniendo en cuenta que una vez seleccionada la cinemática del torno lo mejor es no tener que volver a cambiarla para evitar pérdidas de tiempo innecesarias, se ve que se pueden obtener valores similares a los calculados seleccionando el rango 60-60 y tomando para el avance en refrentado de desbaste un valor igual a 0,248 mm/rev y para el refrentado en acabado 0,088 mm/rev.

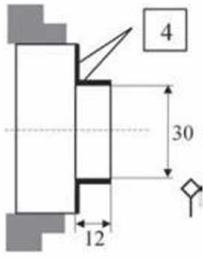
Para el resto de las operaciones se propone seguir la metodología planteada dando, seguidamente, una posible solución a todas ellas.

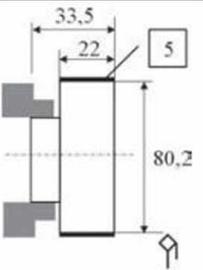
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas. ¹
			N	d (mm)			
1		Refrentar en desbaste 1. En el plato universal se monta la preforma de dimensiones; 85 mm de diámetro y 38 mm de longitud, para limpiar el corte mediante una pasada.	1	4	0,248	27,03	T1
		Refrentar en acabado 1. Con la misma sujeción se da una pasada de acabado.	1	0,5	0,088	36,44	T2

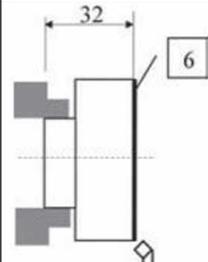
¹ T1 Herramienta de acero rápido para cilindrar recta.
 T2 Herramienta de acero rápido para refrentado exterior en ángulo.
 T3 Herramienta de acero rápido para refrentado interior en ángulo.
 T4-D Broca de puntear de D mm de diámetro.
 T5-D Broca helicoidal de D mm de diámetro.

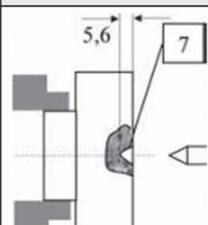
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
2		Cilindrar en desbaste 2. Se mecaniza para pasar de un diámetro de 85 mm a 31 mm, en una longitud de 11 mm. Se hace parte en forma de chaflán para dar salida la herramienta y que en la siguiente operación el desbaste no sea excesivo.	10	2,7	0,216	29,90	T1

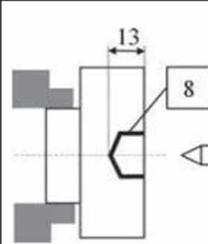
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
3		Refrentar en desbaste 3. Con la misma sujeción que en la operación 2 se mecanizan los chaflanes hasta alcanzar una longitud de 11 mm.	1	1	0,248	29,50	T2

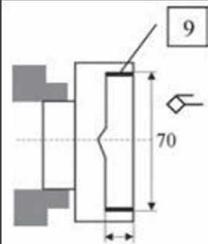
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
4		Cilindrar en acabado 4. Manteniendo el mismo sistema de sujeción se reduce el diámetro 1 mm (de 31 a 30 mm) mediante una operación de cilindrado a lo largo de 12 mm de longitud.	1	0,5	0,088	38,70	T2
		Refrentar en 4. Refrentar desde el diámetro mayor de 85 a 30 mm en una longitud también de 1 mm.	1	1	0,088	35,60	T2

Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
5		Volver la pieza y cilindrar en desbaste 5. Mecanizar de diámetro 85 a 81 mm.	1	2	0,280	29,90	T1
		Cilindrado en acabado 5. Cilindrar de diámetro 81 a 80,2 mm.	1	0,4	0,176	35,50	T1

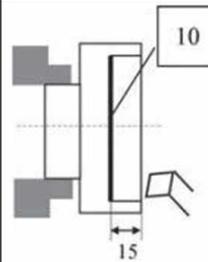
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		<i>a</i> mm/rev	<i>V</i> m/min	Htas.
			<i>N</i>	<i>d</i> (mm)			
6		Refrentar en desbaste 6. Mecanizar de 33,5 a 32,5 mm.	1	1	0,248	27,40	T2
		Refrentar en acabado 6. Mecanizar de 32,5 a 32 mm.	1	0,5	0,088	34,30	T2

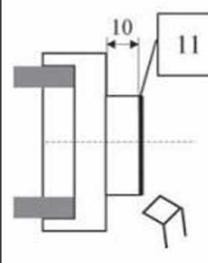
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		<i>a</i> mm/rev	<i>V</i> m/min	Htas.
			<i>N</i>	<i>d</i> (mm)			
7		Puntear 7. Con la misma sujeción que en la operación anterior, se puntea el extremo de la pieza con una broca de puntear de 2,5 mm de diámetro. Será útil para el centrado de las brocas que se usarán en la operación siguiente.	2	2,8	Manual	12,50	T4-2,5

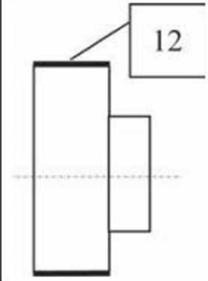
Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		<i>a</i> mm/rev	<i>V</i> m/min	Htas.
			<i>N</i>	<i>d</i> (mm)			
8		Taladrar 8. Se hace un taladro con 13 mm de profundidad y se utilizan las siguientes brocas: 6 mm 12 mm 16 mm	3	4,3	Manual	18,50	T5-6
			3	4,3	Manual	28,70	T5-12
			3	4,3	Manual	28,20	T5-16

Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		<i>a</i> mm/rev	<i>V</i> m/min	Htas.
			<i>N</i>	<i>d</i> (mm)			
9		Cilindrar en desbaste 9. Mecanizar interiormente en una longitud de 13 mm, desde un diámetro de 16 mm hasta uno final de 69,2 mm.	7	3,8	0,196	24,35	T3
		Cilindrar en acabado 9. Mecanizar interiormente desde un diámetro de 69,2 mm a uno de 70 mm.	1	0,4	0,130	39,10	T3

EJERCICIOS

Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
10		Refrentar en desbaste 10. Con la misma sujeción que en la operación 9, mecanizar hasta 14,5 mm.	1	1,5	0,330	27,40	T3
		Refrentar en acabado 10. Mecanizar hasta 15 mm de profundidad.	1	0,5	0,088	34,30	T3

Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
11		Como se ha dejado en esta zona mayor longitud para que la sujeción sea más segura, es necesario volver la pieza para quitar los milímetros que sobran. Hay que usar garras blandas interiores para no dañar el acabado de la superficie interior ya terminada.	1	1,5	Manual	20,50	T2
		Refrentar en desbaste 11. Mecanizar de 12 mm de profundidad a 10,5 mm.	1	0,5	0,088	36,70	T2
		Refrentar en acabado 11. Mecanizar de 10,5 mm a 10 mm de profundidad.					

Op.	Croquis	Descripción	Pasadas		a mm/rev	V m/min	Htas.
			N	d (mm)			
12		Ésta es la última operación, en la que se realizará el acabado superficial de la pieza, para ello se hace un rectificado, se pasa de un diámetro inicial de 80 mm a un diámetro final 80 h 8.					

Bibliografía

- Boothroyd, C.: *Fundamentos del corte de metales y de las Máquinas-Herramienta*, McGraw-Hill Latinoamericana, México, 1978.
- Boothroyd, G. y Knight, W. A.: *Fundamentals of machining and machine tool*, 3rd ed., Boca Raton: Taylor and Francis, New York, 2006.
- Carro, J.; Sánchez, A. M.; Sebastián, M. A.; Torres, F. y Vizán, A.: *Ejercicios de tecnología mecánica*, Servicio de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1979.
- Cembrero, J.; Ferrer, C.; Pascual, M. y Pérez, M. A.: *Ciencia y tecnología de materiales: problemas y cuestiones*, Pearson Educación, Madrid, 2005.
- Gerling, H.: *Alrededor de las máquinas-herramienta*, 3.^a ed., reimp, Reverté, Barcelona, 2006.
- Groover. M. P.: *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*, Prentice-Hall Hispanoamericana, cop., México, 2007.
- Kalpakjian, S. y Schmid, S. R.: *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5.^a ed., Pearson Educación, México, 2008.
- Martín, R.; Rodríguez, P.; Sanz, A. y González, I.: *Sistemas de producción I. Teoría*, Servicio de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2005.
- Martín, R.; Rodríguez, P.; Sanz, A. y González, I.: *Sistemas de producción II. Teoría*, Servicio de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.
- Martín, R.; Rodríguez, P.; Sanz, A. y González, I.: *Sistemas de producción I y II. Prácticas*, Servicio de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2004.
- Micheletti, G. F.: *Tecnología mecánica: Mecanizado por arranque de viruta*, Blume, Barcelona, 1986.
- SAE, ASTM: *Metals and alloys in the unified numbering system*, 10 ed., Warrendale (Pennsylvania), Society of Automotive Engineers (Philadelphia), American Society for Testing and Materials, cop., 2004.
- UNE-EN ISO 1302:2002: Especificación de productos (GPS). Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos, AENOR, Madrid, 2002.
- UNE-EN 20286-1:1993: Sistema ISO de tolerancias y ajustes. Parte 1: Base de tolerancias, desviaciones y ajustes, AENOR, Madrid, 1993.
- UNE-EN 20286-2:1993: Sistema ISO de tolerancias y ajustes. Parte 2: Tablas de los grados de tolerancia normalizados y de las desviaciones límite de los agujeros y de los ejes, AENOR, Madrid, 1993.
- UNE 16101:1982: Plaquetas de metal duro para herramientas de torno, AENOR, Madrid, 1982.
- UNE 16102:1982: Herramientas de torno con plaquetas de metal duro soldadas. Generalidades, AENOR, Madrid, 1982.
- UNE 16113:1975: Código para designación de plaquetas de carburos metálicos, y de cerámica, para herramientas de fijación mecánica, AENOR, Madrid, 1975.
- UNE 16161:1975: Plaquetas de fijación mecánica con agujero cilíndrico. Tipos TN-SN-CN-DN-RN, AENOR, Madrid, 1975.

Anexos

ANEXO 1

Símbolos y unidades

- Ancho de corte, b [mm]
- Ángulo de deslizamiento, φ [° grados]
- Ángulo de desprendimiento, γ [° grados]
- Ángulo de posición, χ_r [° grados]
- Ángulo de rozamiento, ρ [° grados]
- Avance por filo, a_z [mm/rev/filo]
- Avance, a [mm/rev]
- Coeficiente aparente de rozamiento, μ []
- Componente normal de la fuerza de corte, N_c [N]
- Componente normal de la fuerza según la cara de desprendimiento, N_γ [N]
- Componente normal de la fuerza según el plano de deslizamiento, N_s [N]
- Coste por unidad de tiempo de operación de la máquina, \dot{c} [€/día]
- Coste de la herramienta por filo, \dot{C}_{hf} [€]
- Coste del operario, \dot{s} [€/año]
- Coste total por componente, \dot{C} [€]
- Coste total fijo por componente, \dot{C}_f [€]
- Coste total variable por componente, \dot{C}_v [€]
- Densidad de materiales, ρ [g/m³]
- Densidad de corriente, j [A/m²]
- Diámetro, D [mm]
- Energía específica, w [J/m³]
- Espesor de la viruta deformada, h_2 [mm]
- Espesor de la viruta no deformada, h_1 [mm]
- Fuerza de corte, F_c [N]
- Fuerza según la cara de desprendimiento, F_γ [N]
- Fuerza según el plano de deslizamiento, F_s [N]
- Fuerza resultante en el proceso de corte ortogonal, R [N]
- Longitud de la viruta deformada, l_2 [mm]
- Longitud de la viruta no deformada, l_1 [mm]
- Longitudes, l [m] o [mm]
- Metal eliminado, W_e [g/m² · s]
- Números de filos de la herramienta, n_z [ud]

- Par de torsión, T [Nm]
- Periodo de amortización en años, A [año]
- Porcentaje de costes de seguros e impuestos, r_s [%]
- Porcentaje de tasa de interés, r_i [%]
- Porcentaje del salario sobre costes variables, r_{op} [%]
- Potencia, \dot{W} [W]
- Presión de corte, p_c [N/m²] o [Pa]
- Presión específica de corte, p_s [N/m²] o [Pa]
- Profundidad de pasada, d [mm]
- Relación entre longitudes de viruta no deformada y deformada (l_1/l_2), ξ []
- Rendimiento de las transmisiones mecánicas de la máquina, η [% × 100]
- Revoluciones del husillo, N [rpm]
- Sección de la viruta no deformada, A_1 [mm²]
- Tensión dinámica de deslizamiento, τ_s [Pa]
- Tiempo, t [min] o [s]
- Tiempo de corte por componente, t_c [s]
- Tiempo de mecanizado por componente, t_m [s]
- Tiempo de reposición de filo, t_{rf} [s]
- Tiempo no productivo por componente, t_{np} [s]
- Tiempo total por componente, t_t [s]
- Tiempo de vida de la herramienta para un mínimo coste, T_{mc} [min]
- Tiempo de vida de la herramienta para una máxima producción, T_{mp} [min]
- Valor de la máquina al inicio del año, C_a [€]
- Valor inicial de la máquina instalada, C_o [€]
- Velocidad de avance, f [mm/min]
- Velocidad de corte, V [m/min]
- Velocidad de giro, ω [rad/s]
- Vida de la herramienta T [min]
- Volumen de material eliminado por unidad de tiempo o caudal, \dot{z} [mm³/min]
- Volumen de material eliminado por abrasivos por unidad de tiempo, \dot{z}_a [mm³/min]
- Volumen de material eliminado por electrolito por unidad de tiempo, \dot{z}_{el} [mm³/min]

ANEXO 2

Figuras y formulario

FIGURAS A2

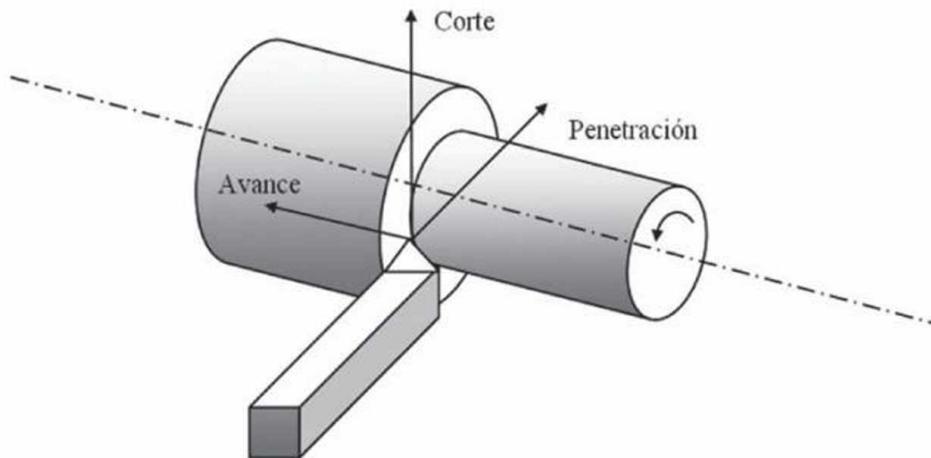


Figura A2.1. Movimientos relativos entre pieza y herramienta en el proceso de torneado.

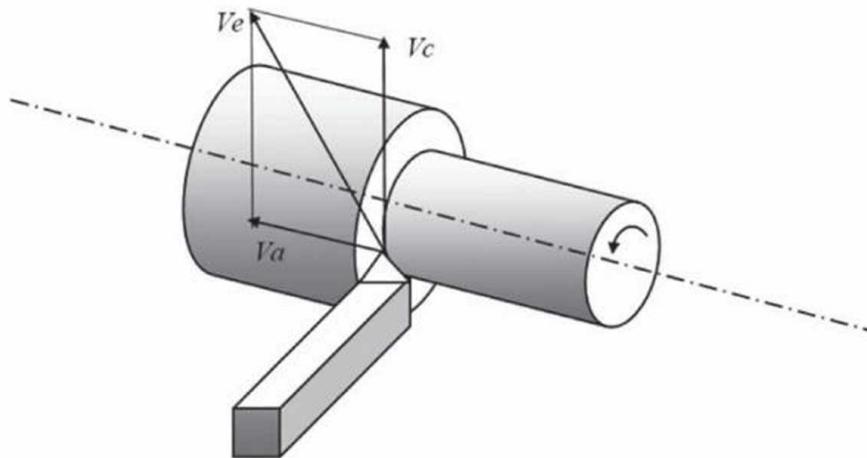


Figura A2.2. Velocidades de los movimientos relativos entre pieza y herramienta en el proceso de torneado.

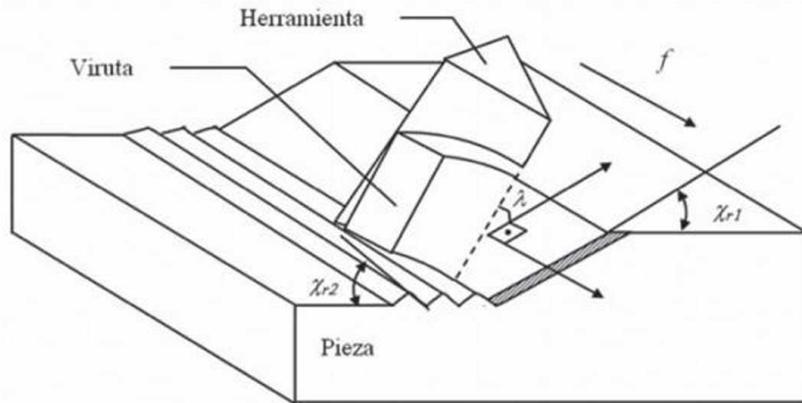


Figura A2.3. Posicionamiento relativo pieza-herramienta en el proceso de corte con herramienta monofil.

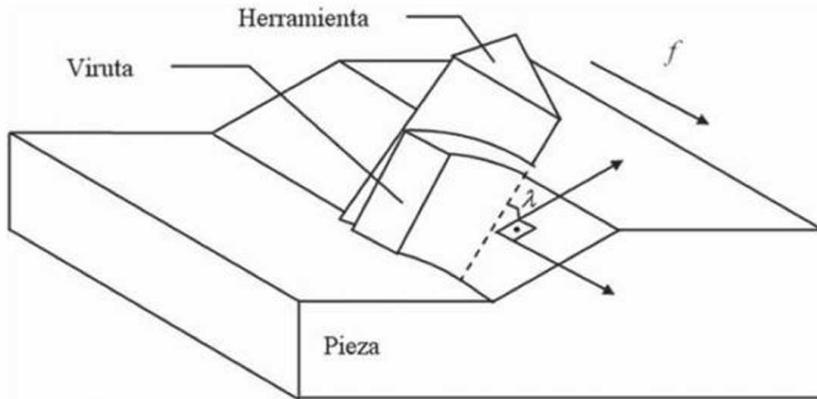


Figura A2.4. Representación simplificada del proceso de corte con herramienta monofil.

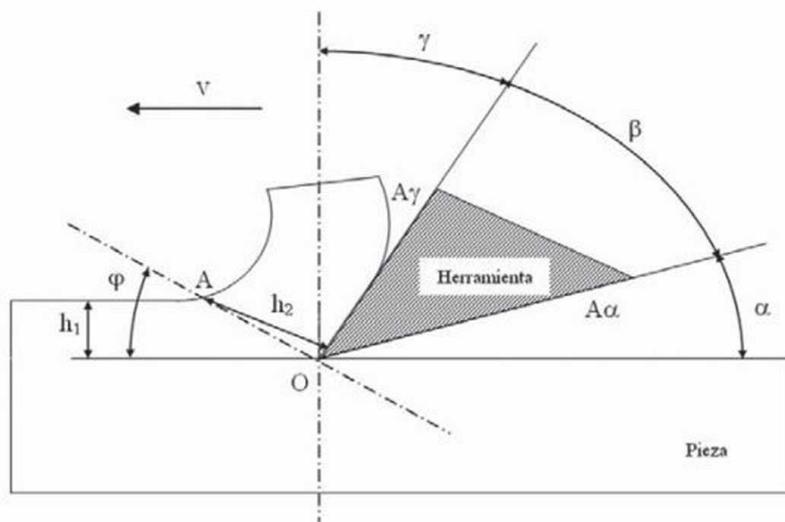


Figura A2.5. Modelo esquemático del plano de deslizamiento.

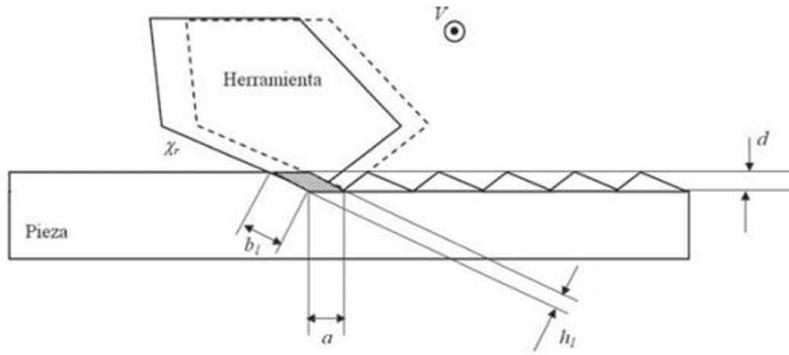


Figura A2.6. Sección normal a la velocidad de corte.

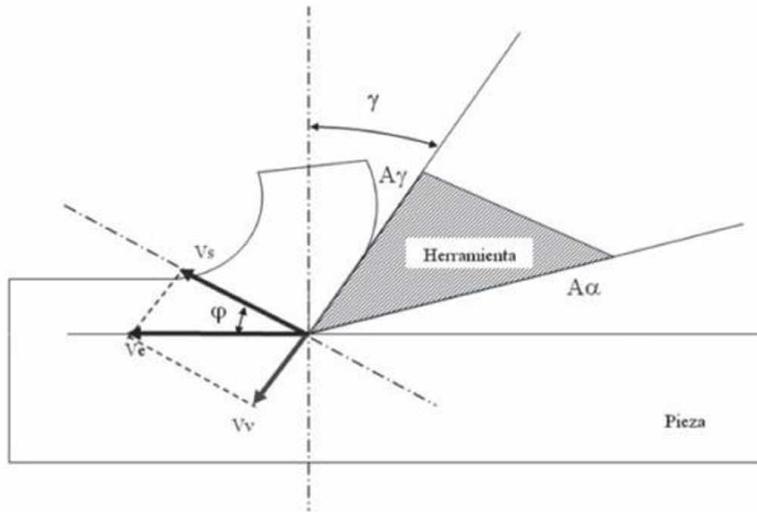


Figura A2.7. Velocidades en las proximidades del filo de la herramienta.

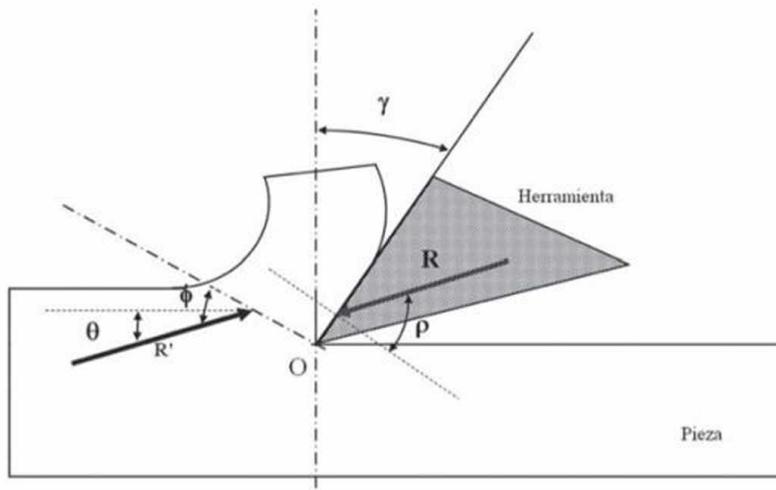


Figura A2.8. Equilibrio de fuerzas sobre la viruta en el corte ortogonal.

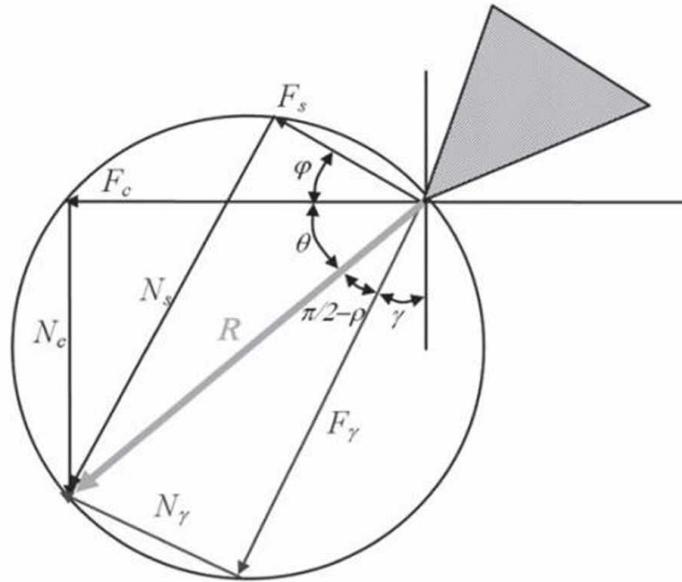


Figura A2.9. Descomposición de la fuerza resultante de corte, R , según las direcciones del corte, del plano de deslizamiento y del plano de desprendimiento.

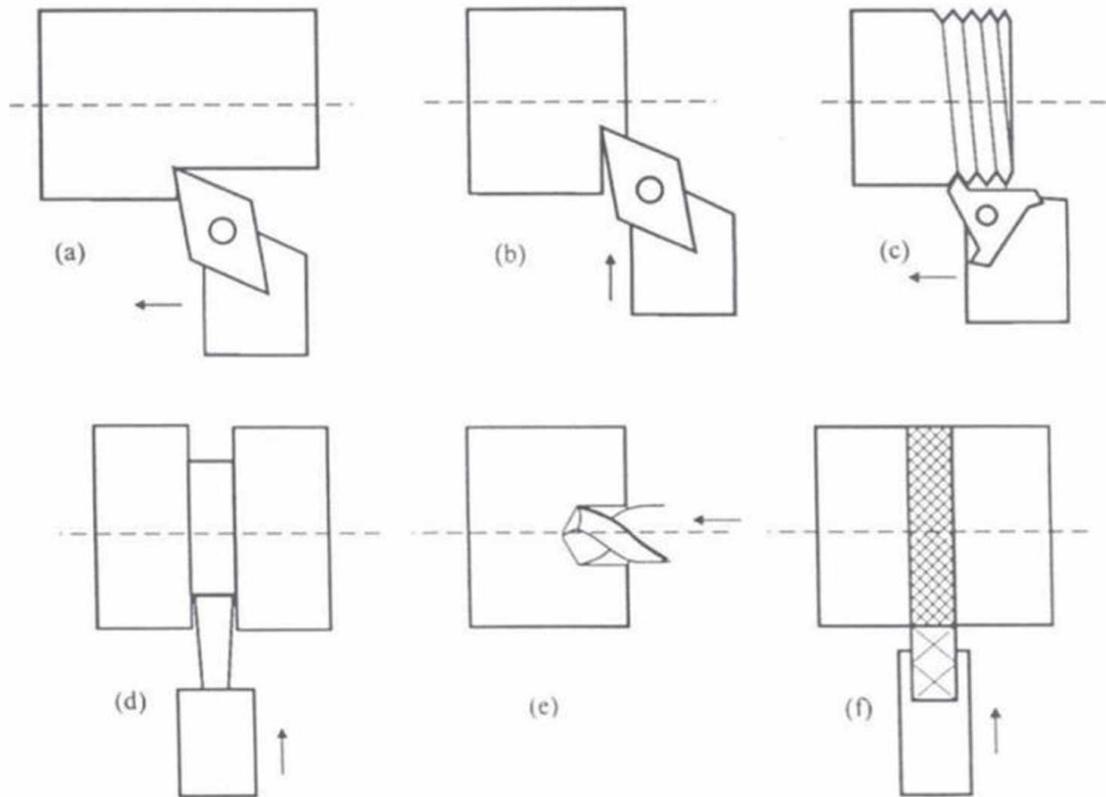


Figura A2.10. Principales operaciones que se pueden realizar en un torno: a) cilindrado; b) refrentado; c) roscado; d) ranurado; e) taladrado y f) moleteado.

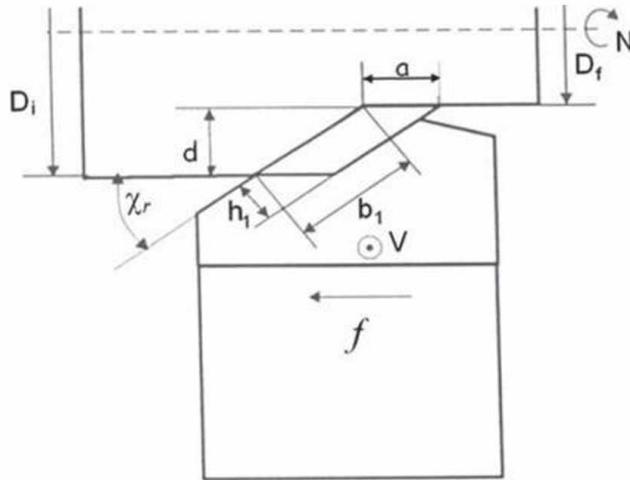


Figura A2.11. Sección normal a la velocidad de corte, V , en una operación de cilindrado exterior.

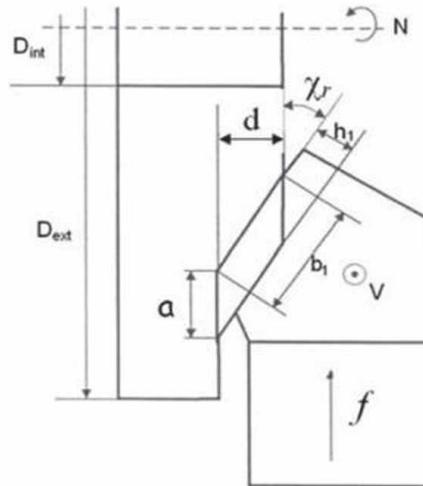


Figura A2.12. Sección normal a la velocidad de corte, V , en una operación de refrentado.

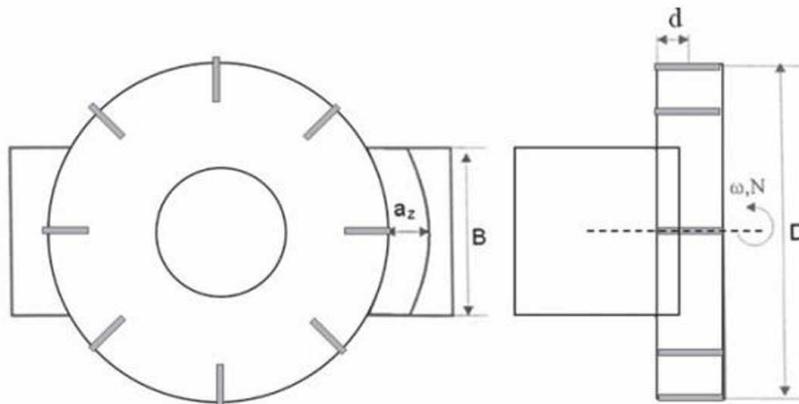


Figura A2.13. Fresado frontal.

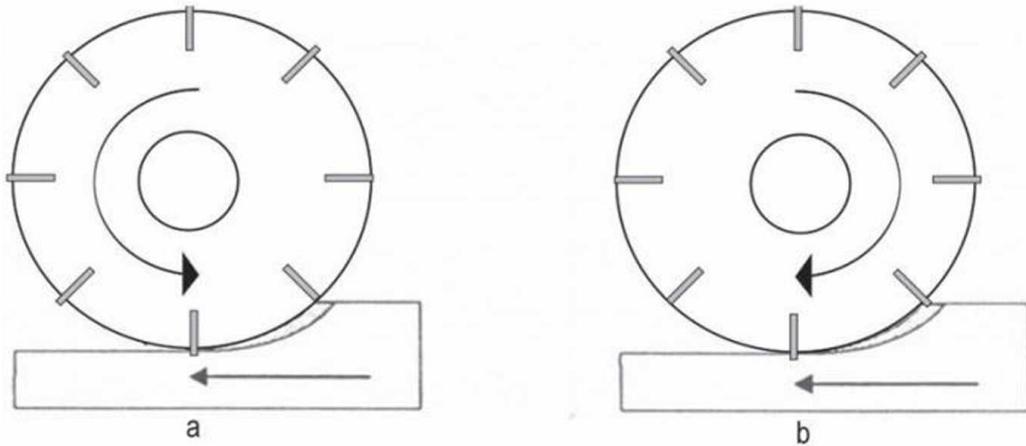


Figura A2.14. Fresado cilíndrico o periférico: a) en oposición; b) en concordancia.

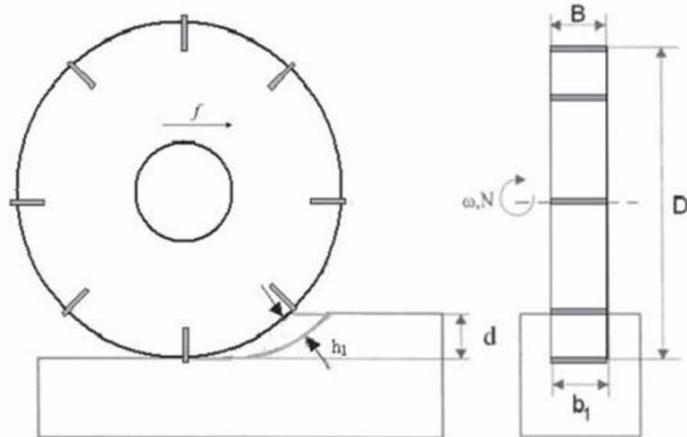


Figura A2.15. Fresado periférico en oposición.

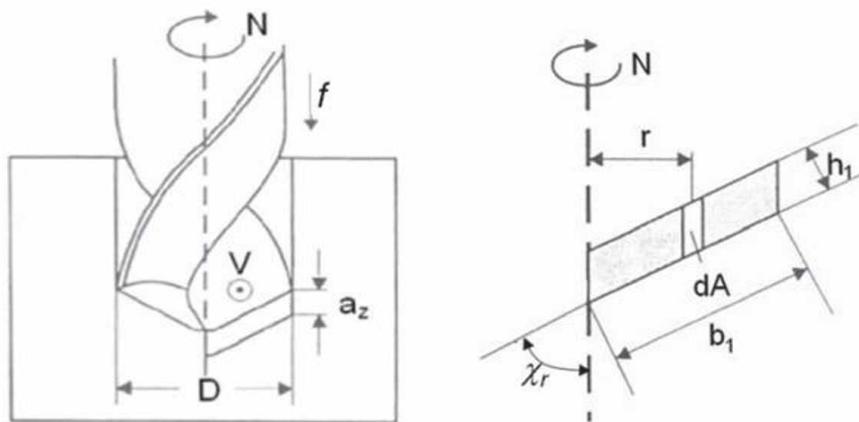


Figura A2.16. Esquema del proceso de taladrado.

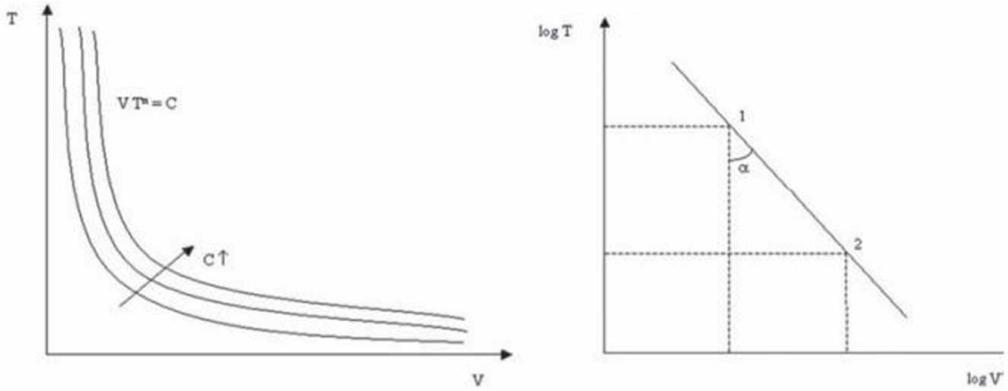


Figura A2.17. Gráficas de la ecuación de Taylor.

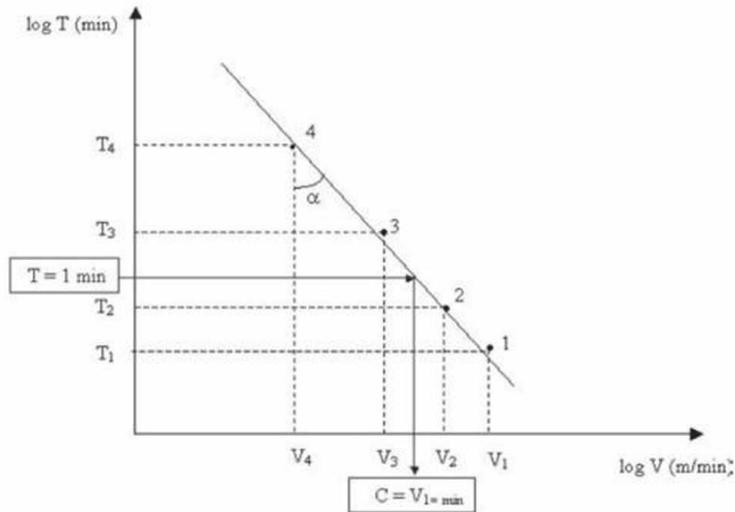


Figura A2.18. Cálculo de n por medio de gráficos en escala logarítmica.

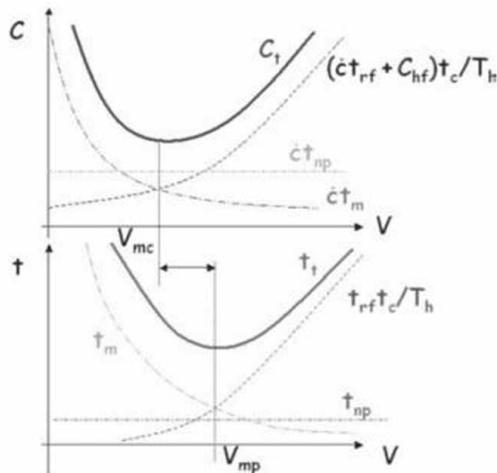


Figura A2.19. Coste y tiempo por componente frente a velocidad.

FORMULARIO

RELACIONES GEOMÉTRICAS EN LOS PROCESOS DE CORTE	
$\vec{V}_e = \vec{V}_v + \vec{V}_s$	Velocidad efectiva en el corte ortogonal (Figura A2.7).
$l_1 \cdot h_1 = l_2 \cdot h_2 \Rightarrow \xi = \frac{h_2}{h_1} = \frac{l_1}{l_2}$	Factor de recalado.
$A_1 = d \cdot a = b \cdot h_1$	Área de la sección de la viruta no deformada (Figura A2.6).
$z = A_1 V$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
$tg\varphi = \frac{\cos\gamma}{\xi - \text{sen}\gamma}$	Relación del ángulo de deslizamiento, el factor de recalado y el ángulo de desprendimiento.
$\tau_s = \frac{F_s}{b \cdot h_1} \cdot \text{sen}\varphi$	Tensión dinámica de deslizamiento.
$tg(\rho - \gamma) = \frac{N_c}{F_c}$	Relación geométrica existente entre los ángulos de desprendimiento y rozamiento con las fuerzas en el proceso de mecanizado (Figura A2.9).
$\rho = \text{arctg}\mu$	Ángulo de rozamiento.

CÁLCULO DE FUERZAS	
$\tau_s = \frac{F_s}{b \cdot h_1} \cdot \text{sen}\varphi$	Tensión dinámica de deslizamiento.
$tg(\rho - \gamma) = \frac{N_c}{F_c}$	Relación geométrica existente entre los ángulos de desprendimiento y rozamiento con las fuerzas en el proceso de mecanizado (Figura A2.9).
$\rho = \text{arctg}\mu$	Ángulo de rozamiento.
$F_s = R \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)$	Fuerza en el plano de deslizamiento en función de la resultante (Figura A2.9).
$N_s = R \cdot \text{sen}(\varphi + \rho - \gamma)$	Fuerza normal en el plano de deslizamiento en función de la resultante (Figura A2.9).
$F_c = R \cdot \cos(\rho - \gamma)$	Fuerza de corte en función de la resultante (Figura A2.9).
$N_c = R \cdot \text{sen}(\rho - \gamma)$	Fuerza normal al corte en función de la resultante (Figura A2.9).
$F_\gamma = R \cdot \text{sen}\rho$	Fuerza según la cara de desprendimiento en función de la resultante (Figura A2.9).
$N_\gamma = R \cdot \cos\rho$	Fuerza normal a la cara de desprendimiento en función de la resultante (Figura A2.9).
$R = \sqrt{N_c^2 + F_c^2}$	Resultante de las fuerzas en función de la fuerza de corte y su normal (Figura A2.9).

CÁLCULO DE LA POTENCIA DE CORTE	
$\dot{W} = F_c \cdot V$	Potencia del proceso en función de la fuerza de corte y la velocidad de corte.
$\frac{F_c}{F_s} = \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)}$	Fuerza de corte en función de la de deslizamiento (Figura A2.9).
$\tau_s = \frac{F_s}{A_s}$	Tensión dinámica de deslizamiento.
$A_s = A_1 \cdot \frac{1}{\text{sen}\varphi}$	Proyección del área de la sección de viruta no deformada en el plano de deslizamiento (Figura A2.6).
$A_1 = d \cdot a = b \cdot h_1$	Área de la sección de viruta no deformada (Figura A2.6).
$F_c = \tau_s A_1 \frac{1}{\text{sen}\varphi} \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma_{ne})}{\cos(\varphi + \rho - \gamma_{ne})}$	Fuerza de corte en función de la tensión dinámica de deslizamiento.
$\dot{W} = \dot{z} \cdot \tau_s \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\text{sen}\varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)}$	Potencia en función de la tensión dinámica de deslizamiento.
$p_c = \tau_s \frac{1}{\text{sen}\varphi} \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)}$	Presión de corte.
$\dot{W} = p_c \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función del caudal.
$F_c = p_s (A_1)^{1-f}$	Fuerza de corte, expresión experimental, en función de la presión específica de corte.

PROCESOS DE TORNEADO	
$A_1 = b \cdot h_1 = a \cdot d$	Área de la sección de la viruta no deformada (Figura A2.11).
$\dot{z} = \pi \cdot D_m \cdot d \cdot a \cdot N$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
$D_m = \frac{D_i + D_f}{2}$	Diámetro medio.
$d = \frac{D_i - D_f}{2}$	Profundidad de pasada (Figura A2.11).
$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000}$	Velocidad de corte.
$f = a \cdot N$	Velocidad de avance.

PROCESOS DE TORNEADO (CONT)	
$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función del caudal.
$\dot{W} = F_c \cdot V$	Potencia del proceso en función de la fuerza de corte y la velocidad de corte.
$\dot{W} = T \cdot \omega$	Potencia del proceso en función del par torsor.
$\omega = 2 \cdot \pi \cdot N$	Velocidad de rotación.
$\dot{W}_u = \eta \cdot \dot{W}_m$	Potencia útil en función de la potencia del motor.
$t = \frac{l}{f}$	Tiempo empleado en el proceso de torneado.
$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + l + a \cdot \cotg\chi_r + l_s}{a \cdot N}$	Tiempo de mecanizado en procesos de cilindrado.
$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + \left(\frac{D_i - D_f}{2}\right) + a \cdot \cotg\chi_r + l_s}{a \cdot N}$	Tiempo de mecanizado en procesos de refrentado.
$F_c = \frac{\dot{W}}{V}$	Fuerza de corte empleada en el proceso.

PROCESOS DE FRESADO	
$a_z = \frac{a}{n_z}$	Avance por filo (Figura A2.13).
$h_{1 \text{ máx.}} \cong a_z \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{p}{D}}$	Aproximación del espesor máximo de viruta no deformada.
$A_1 = b \cdot h_1$	Área de la sección de la viruta no deformada en procesos de fresado periférico (no constante).
$A_1 = d \cdot h_1$	Área de la sección de la viruta no deformada en procesos de fresado frontal.
$\dot{z} = b \cdot d \cdot f = b \cdot d \cdot a \cdot N$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
$f = a_z \cdot N \cdot n_z$	Velocidad de avance.
$V = \frac{\pi \cdot N \cdot D}{1.000}$	Velocidad de corte.
$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función del caudal.

PROCESOS DE FRESADO (CONT)	
$\dot{W} = T \cdot \omega$	Potencia del proceso en función del par torsor.
$T = F_c \cdot \frac{D}{2}$	Par torsor en función de la fuerza de corte.
$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + l + \sqrt{d \cdot (D - d)} + l_s}{a \cdot N}$	Tiempo de mecanizado en procesos de fresado periférico.
$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + \frac{D}{2} + l + \frac{D}{2} + l_s}{a \cdot N}$	Tiempo de mecanizado en procesos de fresado frontal.
$\dot{W}_u = \eta \cdot \dot{W}_m$	Potencia útil en función de la potencia del motor.

PROCESOS DE TALADRADO	
$A_1 = b \cdot h_1 \cdot n_z = a_z \cdot \frac{D}{2} \cdot n_z = a \cdot \frac{D}{2}$	Área de la sección de la viruta no deformada (Figura A2.16).
$\dot{z} = \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot a \cdot N$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función del caudal.
$T = \frac{\dot{W}}{\omega}$	Par torsor.
$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000}$	Velocidad de corte.
$f = a_z \cdot n_z \cdot N$	Velocidad de avance.
$t_m = \frac{l_m}{f} = \frac{l_e + l + \frac{D}{2} \cot g \chi_r + l_s}{a \cdot N}$	Tiempo de mecanizado.

PROCESOS DE RECTIFICADO	
$\dot{W} = w \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función del caudal.
$\dot{z} = d \cdot b \cdot f$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo.
$\dot{W} = T \cdot \omega$	Potencia en función del par torsor.
$T = F_c \cdot \frac{D}{2}$	Par torsor en función de la fuerza de corte.

PROCESOS DE RECTIFICADO (CONT.)	
$l = \sqrt{D \cdot d}$	Longitud de la viruta no deformada.
$h = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot f}{V \cdot C \cdot r}\right) \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}}$	Espesor de la viruta.

PROCESOS CON MOVIMIENTO PRINCIPAL RECTILÍNEO	
$t_{dc} = \frac{l_c}{V} + \frac{l_c}{V_r} + 2 \cdot t_l$	Tiempo empleado en una doble carrera.
$N_{dc} = \frac{b}{a}$	Número de dobles carreras para realizar en el proceso.
$t_m = N_{dc} \cdot t_{dc}$	Tiempo total de mecanizado.
$\dot{W} = p_c \cdot \dot{z}$	Potencia del proceso en función de la presión del corte y caudal.

OTROS PROCESOS DE MECANIZADO	
$\dot{z} = \frac{We}{\rho \cdot j}$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo en procesos de mecanizado electroquímico.
$f = \dot{z} \cdot j$	Velocidad de avance de la herramienta en procesos de mecanizado electroquímico.
$\dot{z} = \dot{z}_a + \dot{z}_{el}$	Caudal o volumen de material eliminado por unidad de tiempo en procesos de rectificado electrolítico.

VIDA DE LA HERRAMIENTA	
$V \cdot T^n = K$	Ecuación de Taylor.
$T = \frac{K_1}{V^n \cdot a^{n_1} \cdot d^{n_2}}$	Primera generalización de la ecuación de Taylor.
$V \cdot T^n = \frac{K_2 \cdot (VB)^m}{a^x \cdot d^y \cdot (\text{sen} \chi_r)^{x-y}}$	Segunda generalización de la ecuación de Taylor.
$V = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1.000}$	Velocidad de corte.

TIEMPOS Y COSTES EN PROCESOS DE MECANIZADO	
$t_t = t_{np} + t_m + t_m \cdot \frac{t_c}{T_h}$	Tiempo total del proceso.
$C_t = \dot{c} \cdot t_t + C_{hf} \cdot \frac{t_c}{T_h}$ $C_t = \dot{c} \cdot (t_{np} + t_m) + (\dot{c} \cdot t_{rf} + c_{hf}) \cdot \frac{t_c}{T_h}$	Coste total por componente (Figura A2.16).
$C_a = C_o \cdot \left(1 - \frac{a-1}{A}\right)$	Valor de la máquina al inicio del año.
$\dot{C} = \dot{C}_f + \dot{C}_v$	Costes totales anuales.
$\dot{C}_f = C_o \cdot \left[\frac{1}{A} + r_s^* + r_i^*\right]$	Costes fijos anuales.
$\dot{C}_s = \dot{s} \cdot (1 + r_{op})$	Costes variables anuales.
$T_{mc} = \left(\frac{1}{n} - 1\right) \cdot \left(t_{rf} + \frac{C_{hf}}{\dot{c}}\right) = \frac{K}{V^{\frac{1}{n}} \cdot a^{\frac{1}{n}}}$	Vida de la herramienta para un mínimo coste.
$T_{mp} = \left(\frac{1}{n} - 1\right) \cdot t_{rf} = \frac{K}{V^{\frac{1}{n}} \cdot a^{\frac{1}{n}}}$	Vida de la herramienta para una máxima producción.

ANEXO 3

Tablas de materiales

MATERIALES

Tabla A3.1. Intervalo aproximado del valor de la energía específica requerida por el motor de la máquina-herramienta en función del tipo de material que hay que mecanizar.	
Material	Energía específica (GJ/m ³)
Aceros	2-9
Aceros inoxidables	2-5
Hierro fundido	1,1-5,4
Aleaciones de aluminio	0,4-1
Aleaciones de cobre	1,4-3,2
Aleaciones de magnesio	0,3-0,6
Aleaciones de titanio	2-5

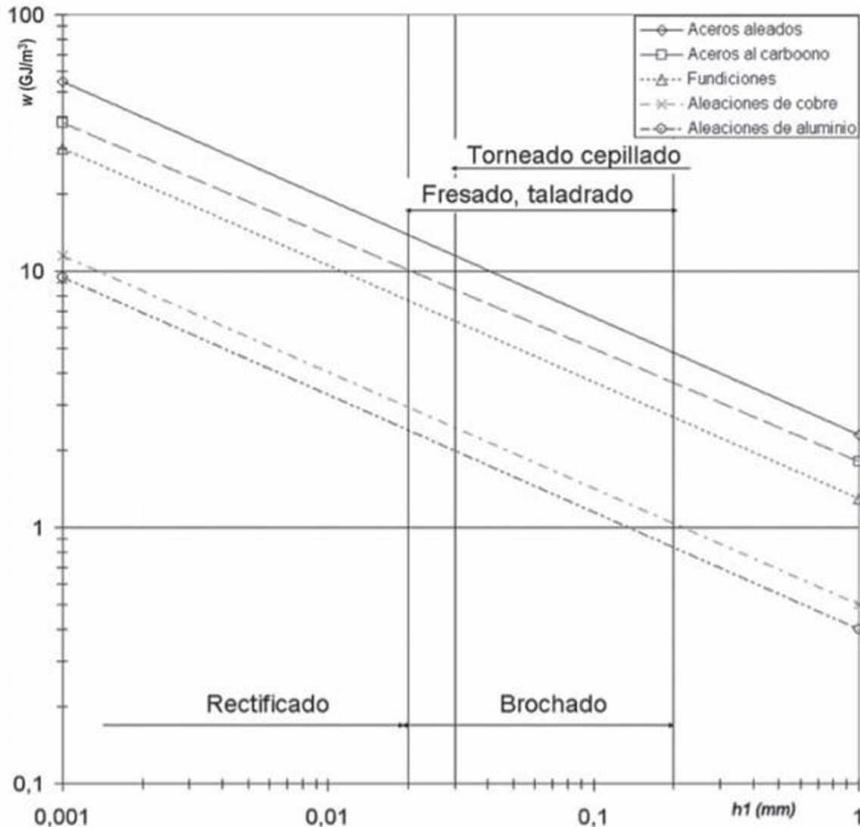


Figura A3.1. Energía específica frente al espesor de viruta no deformada.

Tabla A3.2. Propiedades mecánicas de los materiales².

Material	ISO	AISI	UNS	Condición	Resistencia máxima a la tracción (MPa)	Resistencia máxima a la fluencia (MPa)
Aceros al carbono y aleados		1020	G10200	Laminado Normalizado Recocido	448 441 393	346 330 294
		1080	G10800	Laminado Normalizado Recocido	1010 965 615	586 524 375
		3140	G31400	Normalizado Recocido	891 689	599 422
		4340	G43400	Normalizado Recocido	1279 744	861 472
		8620	G86200	Normalizado Recocido	632 536	385 357
	Aceros inoxidables		303	S30300	Recocido	550-620
		304	S30400	Recocido	5-620	240-290
		316	S31600	Recocido	50-590	210-290
		410	S41000	Recocido	480-520	240-310
		416	S41600	Recocido	480-520	275
Aleaciones de aluminio	1100		A91100	Temple O Temple H14	90 125	35 120
	2024		A92024	Temple O Temple T4	190 470	75 325
	3003		A93003	Temple O Temple H14	110 150	40 145
	5052		A95052	Temple O Temple H34	190 260	90 215
	6061		A96061	Temple O Temple T6	125 310	55 275
	7075		A97075	Temple O Temple T6	230 570	105 500

Aleaciones de magnesio	AZ31B		M11311	F H24	260 290	200 220
	AZ80A		M11800	T5	380	275
Aleaciones de cobre			C11000		220-450	70-365
			C46400- C46700		380-610	170-455

² Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., Manufactura, ingeniería y tecnología, 5.ª ed. Pearson Educación, México, 2008.

Tabla A3.3. Propiedades generales de los materiales para herramientas³

Propiedad	Aceros de alta velocidad	Aleaciones de cobalto fundido	Carburos		Cerámicos	Nitruro de boro cúbico	Diamante monocristalino
			WC	TiC			
Dureza	83-86 HRA	82-84 HRA	90-95 HRA	91-93 HRA	91-95 HRA	4.000-5.000 HK	7.000-8.000 HK
Resistencia a la compresión (MPa)	4.100-4.500	1.500-2.300	4.100-5.850	3.100-3.850	2.750-4.500	6.900	6.900
Resistencia a la ruptura transversal (MPa)	2.400-4.800	1.380-2.050	1.050-2.600	1.380-1.900	345-950	700	1.350
Resistencia al impacto (J)	1,35-8	0,34-1,25	0,34-1,35	0,79-1,24	<0,1	<0,5	<0,2
Módulo de elasticidad (GPa)	200	—	520-690	310-450	310-410	850	820-1.050
Densidad	8.600	8.000-8.700	10.000-15.000	5.500-5.800	400-4.500	3.500	3.500
Volumen de la fase dura, %	7-15	10-20	70-90	—	100	95	95
Temperatura de fusión o descomposición (C°)	1.300	—	1.400	1.400	2.000	1.300	700
Conductividad térmica W/mK	30-50	—	42-125	17	29	13	500-2.000
Coefficiente de expansión térmica (× 10 ⁻⁶ /C°)	12	—	4-6,5	7,5-9	6-8,5	4,8	1,5-4,8

³ Kalpakjian, S. y Schmid, S. R., Manufactura, ingeniería y tecnología, 5.ª ed., Pearson Educación, México, 2008.



Comprende ejercicios y problemas resueltos de mecanizado en los que se abordan aspectos tales como el estudio de la geometría y la cinemática de este tipo de procesos, el cálculo de la fuerza, la potencia y las condiciones de corte y el análisis de otros aspectos tales como la vida de la herramienta, la economía del mecanizado y la planificación de procesos.

Además incluye una serie de anexos con materiales complementarios que facilitan la comprensión de los fundamentos teóricos y la interpretación de parámetros y variables a emplear en la resolución de los distintos ejercicios y problemas.

El libro, de nivel universitario y diseñado dentro del ámbito metodológico del nuevo Espacio Europeo de Educación Superior (EEES), se adapta plenamente a la enseñanza universitaria de las nuevas titulaciones de Grado y Máster en Ingeniería, permite completar la formación práctica dada en los manuales clásicos de Ingeniería y Tecnología de Fabricación, así como favorecer el aprendizaje autónomo al contar con explicaciones de las soluciones propuestas a los ejercicios y problemas planteados.

Otro libro de interés

**Manufactura, ingeniería
y tecnología**

Serope Kalpakjian

Steven R. Schmid

PEARSON PRENTICE HALL

ISBN 978-97-0261-026-7



Prentice Hall
es un sello editorial de



www.pearsoneducacion.com



ISBN 978-94-0322-765-7



9 788483 227657