

CAPÍTULO 5: CONFORMACION POR ARRANQUE DE VIRUTA

INDICE DEL CAPÍTULO

- 1. Tecnología de mecanizado**
 - 1.1 Introducción
 - 1.2 Fundamentos del arranque de viruta.
- 2. Corte ortogonal**
 - 2.1 Magnitudes en el corte ortogonal
- 3. Rozamiento y temperatura en el corte.**
 - 3.1 Rozamiento en el corte
 - 3.2 Temperatura en el corte
- 4. Herramientas para mecanizado**
 - 4.1. Materiales para herramientas
 - 4.2 Duración de las herramientas
- 5. Economía del mecanizado**
 - 5.1 Tiempos de mecanizado y potencia de corte
 - 5.2 Costes de mecanizado
- 6. Aspectos medioambientales del mecanizado**
 - 6.1 Introducción
 - 6.2 Gestión de virutas
 - 6.3 Gestión de los fluidos de corte
- 7. Mecanizado con filos geoméricamente determinados**
- 8. Proceso de torneado**
 - 8.1 El torno paralelo. componentes
 - 8.2 Clases de tornos
 - 8.3 Trabajos en el torno
 - 8.4 Tipos de herramientas
 - 8.5 Determinación de los parámetros de corte
- 9. Proceso de fresado**
 - 9.1 Introducción
 - 9.2 Tipos de fresadoras
 - 9.3 Características de una fresadora
 - 9.4 Sujeción de piezas en la fresadora
 - 9.5 Operaciones de fresado
- 10. Herramientas para fresar**
 - 10.1 Fresas enterizas
 - 10.2 Fresas de filos soldados o intercambiables
 - 10.3 Fresas especiales



10.4 Sistemas de sujeción de herramientas

11. Parámetros tecnológicos en el fresado

11.1 Generalidades

11.2 Fuerza y potencia de corte

11.3 Tiempos de mecanizado

12. Taladrado

12.1 Introducción

12.2 Maquinas taladradoras

12.3 Herramientas para taladrar

12.4 Sistemas de sujeción de herramientas y piezas.

12.5 Selección de parámetros de corte en el taladrado

12.6 Fuerzas y potencia en el taladrado

12.7 Calculo de tiempos en el taladrado

13. Procesos complementarios

13.1 Avellanado

13.2 Escariado

14. Roscado con macho

15. Rectificado

15.1 Tipos de rectificado.

15.2 Muelas abrasivas

15.3 Tipos de rectificadoras.

15.4 Trabajos de rectificado

15.5 Factores de corte en el rectificado

15.6 Tiempos de rectificado.

15.7 Potencia necesaria en el rectificado

16. Procesos especiales de acabado

16.1 Bruñido.

16.2 Superacabado.

16.3 Lapeado.

16.4 Pulido.

1. TECNOLOGIA DE MECANIZADO

1.1 INTRODUCCION

En la fabricación por mecanizado o arranque de virutas se obtienen las dimensiones y la naturaleza superficial deseada en las piezas, separando partes del material (virutas) por medios mecánicos y con herramientas de filo.

Es el filo de la herramienta el que realiza el arranque de viruta, y según sea éste, los procesos de fabricación por arranque de viruta se clasifican en:

- Procesos de arranque con filos geoméricamente determinados, en los que las herramientas arrancan las virutas con filos que tienen formas geométricas determinadas. Es el caso del cepillado y el fresado, representados en la fig.1.1.

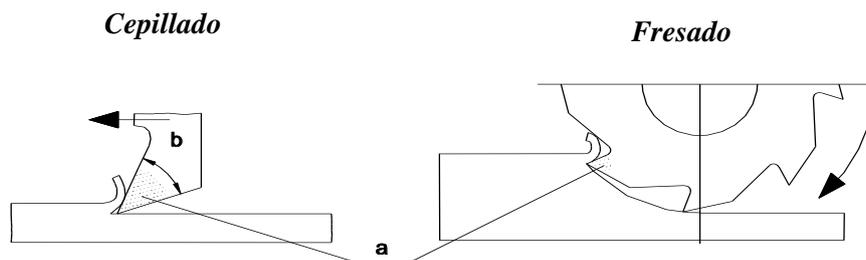


Fig. 1.1. Arranque de viruta con filos determinados geoméricamente. Elaboración propia

- Procesos de arranque con filos no determinados, en los que se arrancan finas virutas con granos abrasivos que no tienen una forma geométrica determinada. Como ejemplo, podemos citar el rectificado (ver figura 1.2).

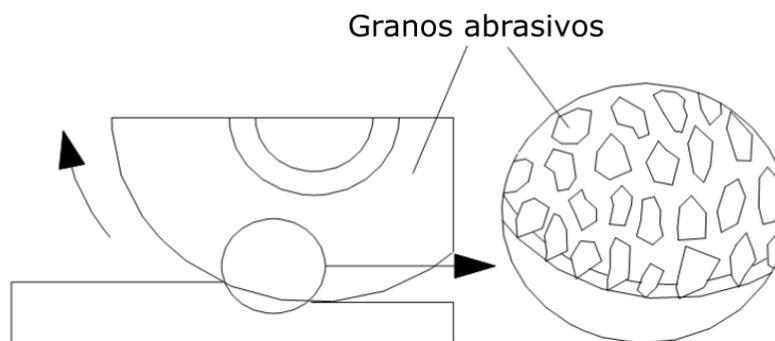


Fig. 1.2 Arranque de viruta con filo de forma geométrica indeterminada. Elaboración propia

Para comprender el proceso del arranque de material, se analizará el caso más simplificado, el de corte ortogonal, en el que el filo de la herramienta es perpendicular al desplazamiento relativo herramienta-pieza.

Posteriormente se analizan diferentes aspectos prácticos del mecanizado:

- fluidos de corte
- materiales para herramientas
- desgaste de herramientas
- economía del mecanizado

1.2 FUNDAMENTOS DEL ARRANQUE DE VIRUTA.

1.2.1 Elementos que intervienen en el arranque de viruta

El mecanizado o arranque de viruta puede realizarse mediante trabajo manual (en la figura 1.3 se muestra un buril, herramienta elemental) o mediante el uso de máquinas.

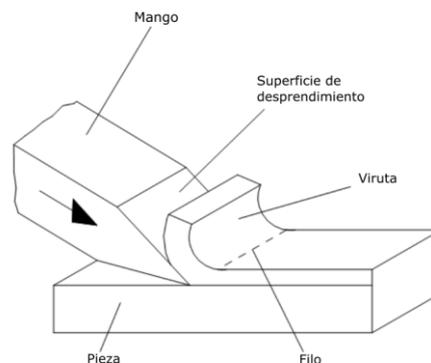


Fig. 1.3 Herramienta manual de corte: buril. Elaboración propia

En la industria se hace siempre utilizando máquinas, que se denominan, de forma genérica, máquinas-herramientas. En este caso, tres son los elementos que intervienen en el proceso: Máquinas-herramientas, herramientas de corte y elementos de sujeción.

Máquinas-herramientas:

En ellas se colocan y sujetan las herramientas y las piezas a mecanizar. Realizan los movimientos gracias a los cuales se consigue arrancar el material sobrante en forma de virutas. De forma genérica (se estudiarán de forma detallada en cada

proceso, la máquina específica) los elementos comunes a toda máquina-herramienta son:

- bancada: estructura portante sobre la que se disponen el resto de elementos constructivos;
- guías, que permiten el desplazamiento de los elementos móviles de la máquina (aquellos que mueven las piezas y/o herramientas);
- accionamientos (generalmente motores eléctricos) y transmisiones o mecanismos, que sirven para transmitir el movimiento de accionamiento a los elementos móviles;
- elementos de maniobra (volantes, palancas, etc.);
- instalaciones de refrigeración y lubricación.

Herramientas de corte:

Son las encargadas de cortar el material en forma de viruta. Deben, además, realizar otras funciones, tales como:

- producir una viruta que no entorpezca el trabajo y sea de fácil evacuación;
- evacuar el calor producido por el corte;
- soportar las fuerzas producidas en el corte;
- tener dureza y resistencia al desgaste;
- mantenerse rígidas en su posición de trabajo.

Para cumplir debidamente estas funciones, la herramienta debe tener unos materiales, formas y dimensiones adecuadas que se estudiarán posteriormente.

Elementos de sujeción:

Permiten la unión sólida entre la pieza y la máquina, y entre la herramienta y la máquina. Su estudio detallado se realizará en los capítulos relativos a cada proceso de mecanizado.

1.2.2 Movimientos en el arranque de viruta

Para que se produzca el arranque de viruta, deben realizarse movimientos relativos entre la herramienta y la pieza, de forma que se produzca una interacción entre ambas. Este movimiento relativo se consigue:

- manteniendo la pieza quieta y moviendo la herramienta,
- manteniendo la herramienta quieta y moviendo la pieza,

- moviendo las dos: pieza y herramienta.

Los distintos tipos de movimientos que aparecen en un proceso de arranque de viruta son (ver figuras 1.5.a, 1.5.b, 1.5.c y 1.5.d):

- 1) El movimiento de corte. Es aquel que sin movimiento de avance, sólo arranca viruta durante una revolución (si el movimiento es circular, como es el caso del torneado o fresado) o durante una carrera (si el movimiento es rectilíneo, como en el caso del cepillado).
- 2) El movimiento de avance, que, combinado con el de corte, hace posible el arranque continuo de virutas.
- 3) El movimiento de penetración, que determina la profundidad del corte y, por tanto, el espesor de la viruta que se arranca.
- 4) El movimiento de aproximación. Este no es un movimiento de mecanizado, ya que con él no se arranca material. Engloba a todos los movimientos que realiza la herramienta antes de entrar en contacto con la pieza y empezar a mecanizar.

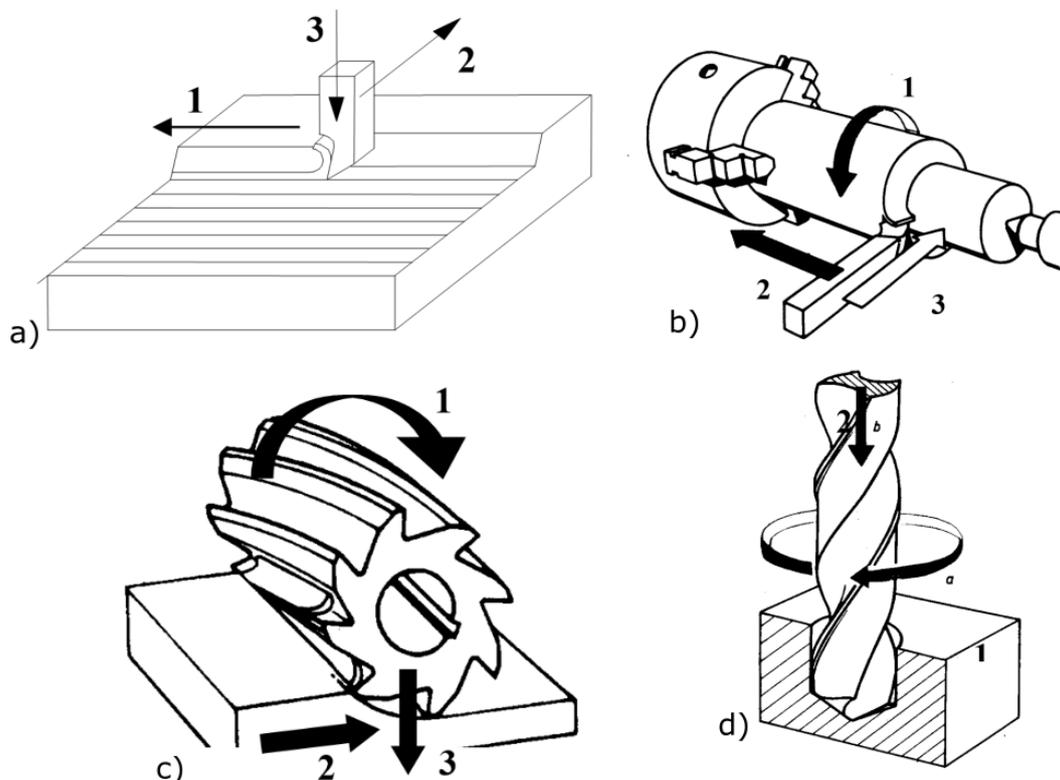


Fig. 1.5. a) Movimientos en el cepillado. b) Mov. en el cilindrado (torneado). c) Movimientos en el fresado. d) Movimientos en el taladrado. Elaboración propia.

1.2.3 Magnitudes de corte y de las virutas producidas

Se denominan magnitudes de corte o parámetros tecnológicos de corte a los valores que hay que ajustar en el proceso de arranque de viruta para que éste se realice de forma óptima.

1.2.3.1 Velocidad de corte (V_c)

Es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte. Se mide normalmente en metros por minuto (m/min).

Obviamente, no se puede trabajar a cualquier velocidad. Si es excesivamente baja, la productividad es muy pequeña; si, por el contrario, se trabaja a demasiada velocidad, la herramienta se desgastará rápidamente.

La velocidad de corte óptima es un dato experimental. Los catálogos de los fabricantes de herramientas indican valores orientativos adecuados para cada material. Depende de múltiples factores:

- material de la pieza,
- material de la herramienta,
- sección de viruta,
- refrigeración,
- tipo de construcción de la máquina, etc.

A partir de este dato (V_c) se calculan las revoluciones por minuto (n en r.p.m.) a las que debe girar la pieza o la herramienta, según sea el proceso, en la máquina.

En la figura 1.6.a y 1.6.b se muestra la relación entre V_c y n para los procesos de torneado y fresado. En ambos casos:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$$

siendo:

V_c = velocidad de corte en m/min.

d = diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado) en mm.

n = revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado) en un minuto (r.p.m.)

1.2.3.2 Avance

El avance (a) es el camino recorrido por la herramienta en cada revolución o carrera. Se expresa en milímetros (mm).

Conocidos la velocidad de giro (n en r.p.m.) y el avance (a en mm) se calcula la velocidad de avance (V_a), que se suele expresar en milímetros por minuto (mm/min). Su cálculo se realiza mediante la expresión:

$$v_a = a n$$

1.2.3.3 Profundidad de corte

La profundidad de corte o profundidad de pasada (p) es la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Se expresa siempre en milímetros.

A partir de la profundidad de corte (p) y del avance (a) se calcula otra magnitud de corte: la sección de viruta (S), que se expresa en milímetros cuadrados (mm²),

$$S = a p$$

La figura 1.7 muestra los conceptos de avance, profundidad de pasada y sección de viruta en el proceso de cepillado.

1.2.3.4 Las magnitudes de viruta

Las magnitudes de viruta se derivan de las de corte. Se distinguen dos tipos de magnitudes de viruta:

- Las magnitudes de viruta que se arranca: ancho (b) y espesor (h). El producto obtenido de ambas nos da de nuevo la sección de viruta:
- Las magnitudes de viruta obtenida: ancho (b') y espesor (h'), debido a la deformación producida en el corte. Su producto da como resultado la sección de viruta obtenida (S').

1.2.4 Tipos de viruta y proceso de formación

A continuación se va a analizar de forma intuitiva el proceso de formación de la viruta.

La viruta no se separa del material de una manera simple, sino por la combinación de los siguientes procesos:

- Cortadura o recalcado. El material es desplazado por el filo que va penetrando en él.
- Corte. Llega un momento en el que el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia al corte del material, por lo que resulta cortada una parte de viruta.
- Fluencia o salida de viruta. Dependiendo de como sea el material se produce, bien el desprendimiento de la viruta, bien la unión de unas con otras, formando una viruta continua.

Los tipos de viruta que se presentan son:

A. *Viruta discontinua o arrancada*. Es típica de materiales frágiles, duros y quebradizos, como la fundición y el bronce. Según se va produciendo, se va desprendiendo, con lo que su evacuación se realiza muy fácilmente. Aparecen también con velocidades de corte bajas.

B. *Viruta continua o plástica*. Aparece en materiales dúctiles. La viruta se comprime fuertemente al aproximarse al filo de la cuchilla y se produce una viruta continua cuya cara de contacto con la cuchilla es lisa y brillante.

Es un tipo de viruta que forma espirales y molesta en el proceso de mecanizado, por lo que se intentará siempre evitar. Aparece también con pequeños avances y gran velocidad de corte.

C. *Viruta semicontinua o cortada*, que se suele dar con materiales tenaces y reducidas velocidades de corte.

Es un caso intermedio de los dos anteriores, y el paso de la molesta viruta continua a la semicontinua puede conseguirse gracias al uso del rompevirutas.

El rompevirutas tiene la misión, como su nombre indica, de dividir la viruta continua en pequeños trozos. Con ello se consigue, por un lado, que la viruta no moleste e incluso sea peligrosa y, por otro, se facilita su manipulación y evacuación.

El funcionamiento del rompevirutas es muy sencillo (fig. 1.6): obliga a la viruta a salir con un radio más pequeño que con el que sale normalmente, provocando su ruptura las tensiones que ello genera.

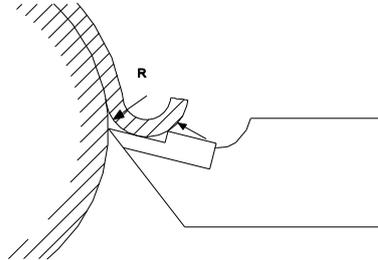


Fig. 1.6 Funcionamiento del rompevirutas. Elaboración propia

Inicialmente, los rompevirutas eran postizos, independientes de la herramienta a la cual se sujetaban por medio de un tornillo o amarre similar. Actualmente, se incorporan a la geometría del filo de la herramienta.

También está relacionado con el proceso de formación de la viruta el llamado filo recrecido. Se trata de un fenómeno que aparece, normalmente, con materiales dúctiles y bajas velocidades, generando altas presiones en la zona de contacto entre la viruta y la herramienta que producen una soldadura de partículas de viruta con la cuchilla.

Una vez formado, el filo recrecido puede desprenderse y, bien se adhiere a la superficie mecanizada, bien provoca una rotura o desgaste pronunciado de la herramienta. Como consecuencia, se obtienen zonas duras en la pieza, un acabado de mala calidad, vibraciones y golpes de herramienta, etc.

Cuando aparece, se puede adoptar diferentes soluciones para evitarlo, entre ellas:

- aumentar la velocidad de corte,
- lubricar adecuadamente, pues se disminuye la temperatura y el rozamiento, factores que provocan la soldadura,
- utilizar materiales de herramientas adecuados: metales duros, cerámicas
- modificar la geometría de la herramienta empleada, aumentando el ángulo de desprendimiento .

1.2.4.1 Los factores que influyen en el tipo de viruta

Los factores de que dependen el tipo de viruta que se genera son, fundamentalmente:

- el material de la pieza,
- el material de la herramienta,
- la geometría del filo de la herramienta,
- la lubricación y refrigeración empleadas,
- las condiciones de corte (velocidad, avance, ...).

El estudio de la influencia de estos factores ha sido realizado por la mayoría de fabricantes de herramientas, plasmándose en una gran variedad de geometrías y materiales para herramientas y en un conjunto de tablas, ábacos, gráficos e, incluso, programas de ordenador que aconsejan sobre la utilización de un tipo u otro de herramienta y las condiciones de corte para un trabajo determinado.

2. CORTE ORTOGONAL

En el estudio teórico del proceso de arranque de material con herramientas de filo se consideran dos casos (ver figura 1.3):

- corte ortogonal, en el que el filo es perpendicular a la velocidad relativa herramienta-pieza. El flujo de viruta se da en el mismo plano que dicha velocidad.
- corte oblicuo, con un ángulo de inclinación de arista (θ_s).

En los casos reales de corte siempre suele existir un ángulo θ_s , pero, dado que su valor no es muy alto (inferior a 15 grados en la mayoría de los casos), el estudio del caso de corte ortogonal ($\theta_s = 0$) es una buena aproximación.

2.1 Magnitudes en el corte ortogonal

2.1.1 Ángulos

Los elementos importantes de una herramienta en el corte ortogonal son:

- El filo, o arista cortante.
- La superficie de ataque o de desprendimiento, que es la cara de la herramienta sobre la que desliza el material desprendido.
- La superficie de incidencia: cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.

Los ángulos que definen la posición de las superficies anteriores son (ver fig. 2.1):

- Angulo de incidencia (α_n), formado por la superficie de incidencia y el plano que contiene al filo y a la velocidad de corte.
- Angulo de filo o herramienta (β_n), formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.
- Angulo de desprendimiento (γ_n), formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene al filo.

Los subíndices n hacen alusión a que se trata de corte ortogonal.

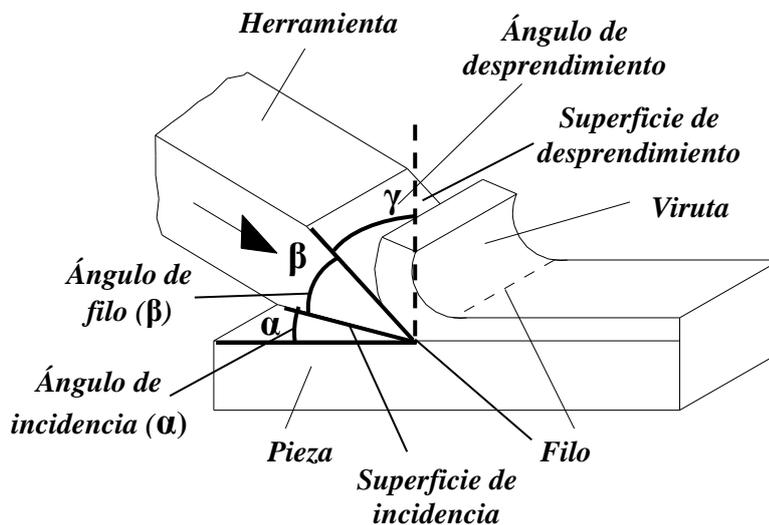


Fig. 2.1 Ángulos en el corte ortogonal. Elaboración propia

2.1.1.1 Angulo de incidencia:

Si el ángulo de incidencia es muy pequeño, el contacto con la pieza aumenta, produciéndose un roce excesivo, un aumento de temperatura y, en consecuencia, un desgaste más rápido de la herramienta.

Por el contrario, si es demasiado grande, se evitan los problemas anteriores, pero se debilita el filo.

La elección del ángulo de incidencia correcto se hace en función:

- del material de la pieza,
- del material de la herramienta.

Si ambos son duros, las fuerzas de corte generadas son elevadas y habrá que dar ángulos menores para que la herramienta las resista. Con materiales dúctiles y herramientas de acero rápido, se utilizan ángulos de incidencia mayores.

2.1.1.2 Ángulo de desprendimiento:

Un ángulo de desprendimiento grande hace que la herramienta penetre y corte bien, dando un mejor acabado superficial, pero queda muy debilitado el filo.

Un ángulo de desprendimiento pequeño favorece la resistencia de la herramienta, pero la energía consumida y el calentamiento de la herramienta aumentan.

En general, el ángulo de desprendimiento más adecuado será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse. Su elección vendrá condicionada de nuevo por:

- la resistencia del material de la herramienta
- el material a mecanizar
- el avance.

Como se verá más adelante (apartado c) las fuerzas de reacción del material que se mecaniza no actúan en el mismo filo, sino en una zona que se aleja según disminuye el ángulo de desprendimiento. Además, cuanto más alejada del filo esté esta zona, mayor será la sección de herramienta que soporta las fuerzas de corte.

Como consecuencia, si el material de la herramienta es poco resistente, se emplearán ángulos de desprendimiento pequeños (ver figura 2.2).

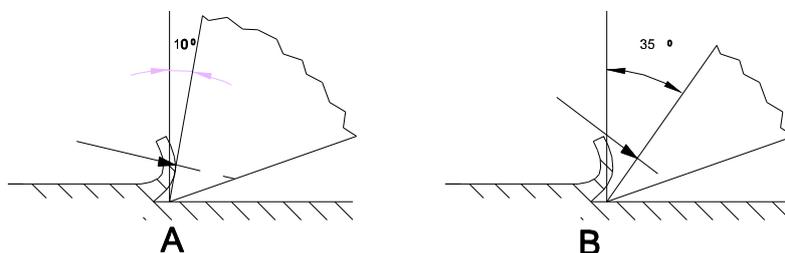


Fig. 2.2 Influencia del ángulo de desprendimiento en la reacción de las fuerzas de corte. Elaboración propia

En lo que al material a mecanizar se refiere, cuanto más duro sea éste, mayores serán las fuerzas de corte y se necesitará mayor sección de herramienta para resistirlas, por lo que será necesario disminuir el ángulo de desprendimiento.

En función del valor del ángulo de desprendimiento las herramientas de corte se clasifican en:

- Herramientas con geometría positiva: aquellas con ángulo de desprendimiento mayor que cero (geometría propia de herramientas de acero rápido, herramientas de metal duro con mucho voladizo (mandrinado,...), etc.).
- Herramientas con geometría negativa: aquellas con ángulo de desprendimiento menor que cero (geometría más robusta propia de herramientas de metal duro).

La tabla de la figura 2.3 resume los conceptos analizados orientando sobre los valores de los diferentes ángulos (α_n , β_n y γ_n) en función del material de la herramienta y del material de la pieza a mecanizar.

Las recomendaciones que se indican en esta y otras tablas, deberán siempre tenerse en cuenta como orientaciones. Cuando se utilice un avance elevado, α_n y γ_n deben reducirse para obtener un filo de corte más robusto. Ello es debido a que cuando aumenta el avance, el espesor de la viruta cortada es mayor y las fuerzas de reacción también.

MATERIAL	HERRAMIENTA					
	Acero rápido (HSS)			Metal duro (HM)		
	α_n	β_n	γ_n	α_n	β_n	γ_n
Acero HB<175	8	67	15	6	74	10
Acero 175<HB<250	8	74	8	5	77	8
Acero HB>250	6	84	0	5	79	6
Acro inoxidable	8	67	15	5	82	3
Fundición HB<250	8	74	8	6	74	10
Fundición HB>250	6	84	0	5	82	3
Latón	10	70	10	6	78	6
Bronce	8	72	10	7	77	6
Cobre	10	50	30	8	67	15
Aluminio	10	45	35	9	66	15

Fig. 2.3 Valores recomendados para los ángulos de herramienta (α_n , β_n y γ_n). Elaboración propia

2.1.2 Velocidades en el corte ortogonal

Ya se ha definido el concepto de velocidad de corte como el desplazamiento relativo de la herramienta, respecto de la pieza. Además de la velocidad de corte (V_c), en el proceso de arranque de viruta intervienen otras dos velocidades (ver figura 2.4):

- La velocidad de deformación o velocidad de cizallamiento (V_s), velocidad con la que se rompe la viruta.
- La velocidad de salida de viruta (V_v).

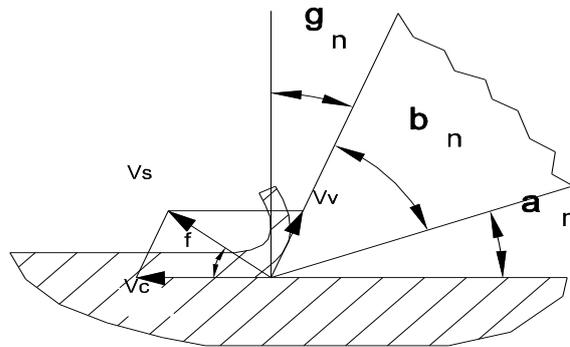


Fig. 2.4 Velocidades en el corte ortogonal. Elaboración propia

2.1.2.1 Ángulo de cizallado (ψ):

Es el ángulo según el cual se corta el material para formar la viruta (ver figura 2.5).

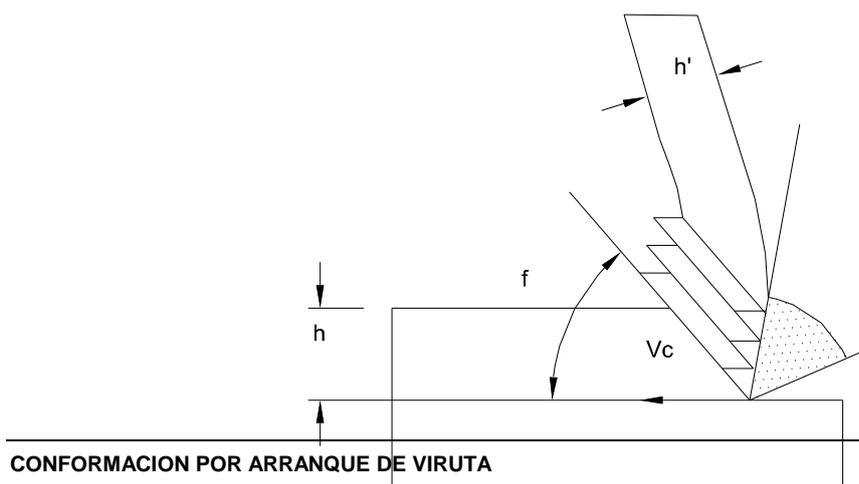


Fig. 2.5 Angulo de cizallamiento. Elaboración propia

La relación entre el factor de recalado (C_r) y el ángulo de cizallado (ψ) se determina, observando la figura 2.6.a , a partir de las siguientes expresiones:

$$h = MN \cdot \text{sen} \psi$$

$$h' = MN \cdot \cos(\psi - \gamma)$$

luego:

$$C_r = \frac{h'}{h} = \frac{MN \cdot \cos(\psi - \gamma)}{MN \cdot \text{sen} \psi} = \frac{\cos(\psi - \gamma)}{\text{sen} \psi}$$

en donde:

$$C_r \cdot \text{sen} \psi = \cos(\psi - \gamma)$$

desarrollando el segundo miembro de la igualdad:

$$\cos(\psi - \gamma) = \cos \psi \cdot \cos \gamma + \text{sen} \psi \cdot \text{sen} \gamma$$

y dividiendo ambos miembros por $\text{sen} \psi$, resulta:

$$C_r = \frac{\cos \psi}{\text{sen} \psi} \cdot \cos \gamma + \text{sen} \gamma$$

de donde:

$$\text{tg} \psi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \text{sen} \gamma}$$

Esta expresión relaciona el ángulo de cizallado (ψ) con C_r y γ , datos que son conocidos.

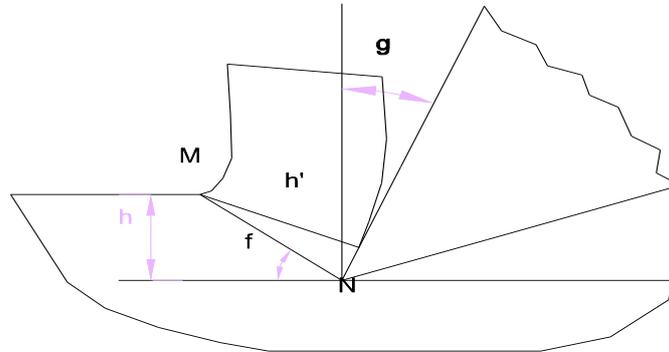


Fig. 2.6.a Relación entre ψ y C_r . Elaboración propia

Calculando ψ , el valor de las velocidades de cizallamiento o deformación (V_s) y de salida de viruta (V_v) es, aplicando el teorema del seno (ver figura 2.6.b):

$$V_v = V_c \cdot \frac{\text{sen } \psi}{\text{sen}(\gamma + \frac{\pi}{2} - \psi)}$$

$$V_s = V_c \cdot \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{2} - \gamma)}{\text{sen}(\gamma + \frac{\pi}{2} - \gamma)}$$

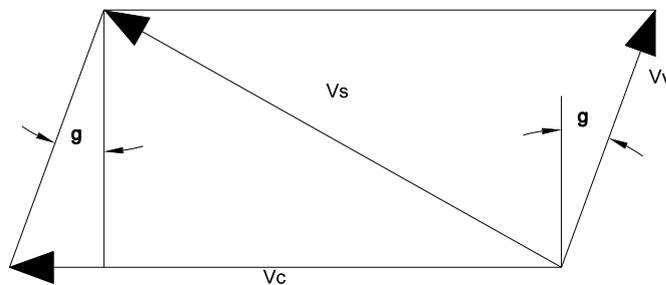


Fig. 2.6.b Cálculo de V_s y V_v . Elaboración propia

2.1.2.2 Fuerzas

Las fuerzas de reacción (R) del material que se mecaniza no actúan en el mismo filo, sino en una zona tanto más alejada de él cuanto más pequeño sea el ángulo de desprendimiento (ver figura 2.2).

El ángulo de esta fuerza resultante, al que denominamos ρ_n , es, en principio, desconocido, pero se puede proyectar la resultante sobre unas direcciones que nos serán muy útiles (ver figura 2.7).

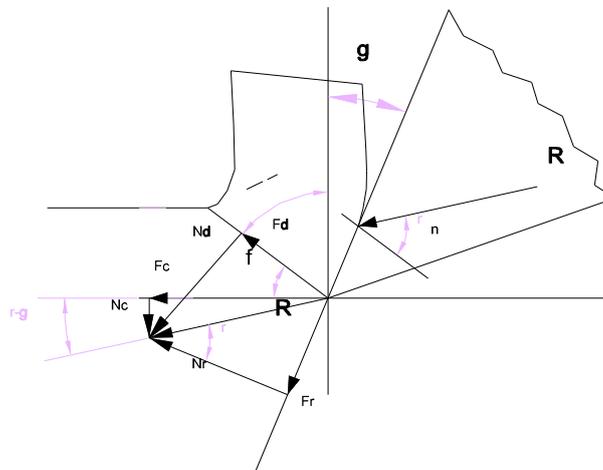


Fig. 2.7 Fuerzas en el corte ortogonal. Elaboración propia

Así, vectorialmente,

$$R = F_c + N_c = F_r + N_r = F_s + N_s$$

en donde:

F_c =es la fuerza de corte, que nos permitirá conocer la potencia necesaria.

F_s =es la fuerza de deslizamiento, que nos permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.

F_r = es la fuerza de rozamiento entre la viruta y la herramienta.

De la figura se obtiene:

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

$$N_c = R \cdot \text{sen}(\rho - \gamma)$$

$$F_d = R \cdot \cos(\psi + \rho - \gamma)$$

$$N_d = R \cdot \cos(\psi + \rho - \gamma)$$

$$F_r = R \cdot \text{sen}\rho$$

$$N_r = R \cdot \cos\rho$$

De estas dos últimas expresiones se obtiene el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} = \frac{\text{sen}\rho}{\cos\rho} = \text{tg}\rho$$

Por otro lado, la fuerza de deslizamiento es el producto de la tensión de deslizamiento (τ_s) por el área de deslizamiento (A_s):

$$F_s = \tau_s \cdot A_s = \tau_s \cdot \frac{A_o}{\text{sen}\psi} = \tau_s \cdot \frac{h \cdot b}{\text{sen}\psi} = \tau_s \cdot \frac{a \cdot p}{\text{sen}\psi}$$

e igualando esta expresión con:

$$F_s = R \cdot \cos(\psi + \rho - \gamma)$$

resulta:

$$R = \tau_s \cdot \frac{A_o}{\operatorname{sen} \psi} \cdot \frac{l}{\cos(\psi + \rho - \gamma)}$$

Por último, sustituyendo en la expresión de la fuerza de corte, resulta:

$$F_c = \tau_s \cdot \frac{A_o}{\operatorname{sen} \psi} \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\psi + \rho - \gamma)}$$

expresión en la que todo es conocido, a excepción de ρ , pues:

τ_s = se obtiene de las tablas de características del material

A_o = $a \cdot p$; avance y profundidad de corte

γ = ángulo de desprendimiento

ψ = ángulo de cizallamiento que se calcula a partir de γ y C_r

3. ROZAMIENTO Y TEMPERATURA EN EL CORTE.

Como se ha analizado en los apartados anteriores, el arranque de viruta se produce por deformación, que llega a crear temperaturas en la herramienta de 600 a 1000 grados centígrados. A su vez, la presión de la viruta sobre la herramienta es enorme, de hasta 1400 Kg/cm².

El calor generado es causado por la deformación del metal (75% aproximadamente) y por la fricción entre la viruta y la herramienta (25%), y este calor es el mayor enemigo de la duración de la herramienta.

La generación de calor depende del espesor de la viruta generada. Para reducirlo, se puede modificar el ángulo de cizallamiento, para disminuir la fricción entre la viruta y la herramienta, utilizando un fluido de corte.

3.1 Rozamiento en el corte

La fricción en la herramienta surge como consecuencia de las puntas de rugosidad de la viruta que están en contacto con las puntas de rugosidad de la superficie de la herramienta. La presión superficial y la temperatura son muy altas en estos puntos, y hacen que puntas que están en contacto se suelden parcialmente entre sí, y que tengan que ser continuamente cortadas. Ya solo este corte puede consumir un cuarto de la energía de corte.

Cuando se cortan estas soldaduras, se arrancan partículas de material de la superficie de la herramienta, que se eliminan junto con la viruta. Esto produce una cavidad en la superficie de la herramienta (desgaste por cráter), que generalmente comienza por encima del filo de corte.

Si se forma un número suficiente de estos puntos de soldadura cerca del filo de corte, ya no pueden ser totalmente cortados de la superficie de la herramienta, y se forma en la cara de la herramienta lo que se conoce por recrecimiento en el filo.

Partes de este recrecimiento en el filo se separan ocasionalmente, y son arrastradas con la viruta. Sin embargo, muchas de estas partículas metálicas también se deslizan por debajo del filo de corte de la herramienta, y permanecen adheridas a la pieza. La consecuencia es un pobre acabado superficial.

Este tipo de rozamiento, que se conoce como *rozamiento por adherencia* y se produce con grandes esfuerzos normales, es distinto al rozamiento de Coulomb, en

el cual la fuerza de rozamiento F es proporcional a la fuerza normal N según la conocida expresión $F = \mu \cdot N$.

En este caso, en cambio, la fuerza de rozamiento será proporcional a la tensión de fluencia del material k , según la ley $F = k \cdot A$

donde A es, en principio, el área real de rozamiento, que no necesariamente coincidirá con el área aparente de contacto.

3.2 Temperatura en el corte

El arranque de la viruta y el trabajo empleado en su deformación se transforman en calor, que provocan elevadas temperaturas en la zona de corte. Estas elevadas temperaturas afectan al rendimiento de la herramienta y a la calidad de la pieza. Habitualmente se observa que las mayores temperaturas se alcanzan en la superficie de desprendimiento de la herramienta, en zonas cercanas al filo.

Parte del calor generado en el mecanizado se disipa a través del ambiente y fluido de corte en caso de utilizarse. El resto se evacua:

- Por la viruta, al desprenderse elimina la mayor parte del calor (80% aprox.).
- Por la herramienta, interesa que sea conductora, para disminuir la temperatura y por tanto el desgaste (15% aproximadamente).
- Por la pieza, que al tener, en general, gran cantidad de masa, evacua bien el calor (5% aproximadamente).

Este reparto depende de la velocidad de corte, como se representa en la fig. 3.4.

Al aumentar la velocidad de corte, aumenta el calor generado y por tanto la temperatura en la zona de corte. Por otra parte, tal y como se observa en la figura, al aumentar la velocidad de corte, disminuye el porcentaje de calor disipado por la pieza y por la herramienta y aumenta el porcentaje disipado por la viruta. Es deseable que se disipe la mayor parte de calor posible por la viruta, ya que este calor no afecta ni a la herramienta, ni a la calidad de la pieza mecanizada.

Los medios para disminuir las altas temperaturas que se producen en la herramienta pueden ser:

- Aumentar la sección de la herramienta, para facilitar la evacuación del calor.
- Refrigerar adecuadamente.

3.2.1 Fluidos de corte

Con una eficaz lubricación y refrigeración puede:

- Aumentarse la velocidad de corte, aumentando la productividad.
- Alargarse la vida de la herramienta, al reducir su desgaste.
- Un mejor acabado y control dimensional de la superficie mecanizada.

El agua es el mejor de los refrigerantes, pero no es buen lubricante y, además, oxida las máquinas.

Cuando lo primordial es refrigerar, se emplea el agua con aceites solubles (emulsiones o taladrinas) y, cuando lo más importante es la lubricación, para disminuir los rozamientos, se utilizan los aceites de corte.



Fig. 3.1 Utilización de fluido de corte en operaciones de mecanizado. Elaboración propia.

Es importante que el líquido sea abundante y continuo y que vaya dirigido al punto de contacto entre la herramienta, la pieza y la viruta.

Si el fluido de corte se ha de mezclar con agua es importante controlar la concentración y reponer el agua o fluido que se pierda por evaporación, salpicaduras, etc.

3.2.1.1 Funciones del fluido de corte:

Las funciones del fluido de corte son:

1. Lubricación: reducir la fricción entre la herramienta y la superficie viruta/pieza.

2. Refrigerar la herramienta y la pieza.
3. Eliminar la viruta.
4. Proteger la pieza y la máquina-herramienta del óxido.

Además de estas funciones básicas, el fluido debe tener otras características, tales como ser una emulsión estable y tener un buen control bacteriológico.

3.2.1.2 Selección del fluido de corte:

La selección de un fluido de corte depende de muchos y complejos factores:

1. El tipo de operación (torneado, taladrado, rectificando, ...)
2. Las condiciones de la operación: máquina-herramienta, herramienta, parámetros.
3. El material a mecanizar. Para la mayoría de los metales férricos no son necesarias precauciones, pero sí para las aleaciones de aluminio, cobre y titanio, por ejemplo.
4. La calidad del agua (si el producto es miscible en agua), según sea dura o blanda.
5. La salubridad y las restricciones ambientales. Hay una larga lista de materiales prohibidos (nitritos, fenoles, clorados, etc.) por motivos de salud y ecológicos.

Para elegir el fluido de corte más adecuado hay que probarlos uno a uno y determinar cuál es el idóneo para las condiciones prácticas de trabajo.

3.2.1.3 Tipos de fluidos de corte:

La clasificación de los fluidos de corte está regulada por normas, entre ellas, la DIN 51385 y la ASTM D 2881. Ambas son clasificaciones complejas que tienen en cuenta tanto el aspecto físico de la mezcla como aspectos químicos.

De forma sencilla podemos clasificar los fluidos de corte en cuatro tipos, de los cuales los tres últimos (aceites diluidos en agua) se denominan vulgarmente taladrinas (ver esquema en la figura 3.2):

- **Aceites de corte:** Están constituidos básicamente por aceites minerales, es decir, por fracciones pesadas de petróleo que destilan a temperaturas superiores a los 300°C. Los aceites de corte incorporan una serie de aditivos

que les aportan ciertas propiedades como los EP (de extrema presión). Estos fluidos de corte son lubricantes no acuosos (no se diluyen para su utilización), con poco poder de refrigeración, pero muy efectivos en relación con la reducción de la fricción y del desgaste abrasivo. Se utilizan fundamentalmente en operaciones de mecanizado severas en las que se generan grandes caudales de viruta. La vida media de los aceites de corte suele ser de dos a tres años, pudiendo llegar en condiciones óptimas a ser de entre ocho y nueve años.

- **Taladrinas de aceites solubles (emulsiones):** Una emulsión es una mezcla de dos líquidos no miscibles. En el caso de este tipo de fluido de corte se trata de una mezcla de agua, aceites minerales o vegetales (proporciones de aceite de entre un 3 y un 10%) y aditivos como agentes emulsionantes, anticorrosivos, biocidas o aditivos EP (de extrema presión). La presencia de agua aumenta su poder de refrigeración. Este tipo de fluido de corte presenta un aspecto lechoso, es el más empleado y es especialmente adecuado para operaciones de mecanizado medio y ligero. Al igual que el resto de las taladrinas, su vida media suele ser de dos a tres meses, pudiendo llegar en condiciones óptimas de control a ser de dos a tres años.
- **Taladrinas semisintéticas:** Se diluyen con concentraciones de entre un 2 y 6% en agua. Están formadas por una emulsión en agua de aceite mineral o sintético, agentes humidificadores, inhibidores de oxidación, bactericidas, etc. Son traslúcidas, volviéndose con el tiempo opacas. Su vida media suele ser de dos a tres meses, pudiendo llegar a ser de dos a tres años.
- **Taladrinas sintéticas:** Se diluyen con concentraciones de entre un 2 y 5% en agua. Son similares a las semisintéticas, pero no incluyen aceite. Su composición consiste en agua (entre un 40 y 60%) y aditivos (fundamentalmente anticorrosivos). Forman disoluciones traslúcidas. Sus funciones principales son la refrigeración y el control de corrosión. Su vida media suele ser de dos a tres meses, pudiendo llegar a ser de dos a tres años.

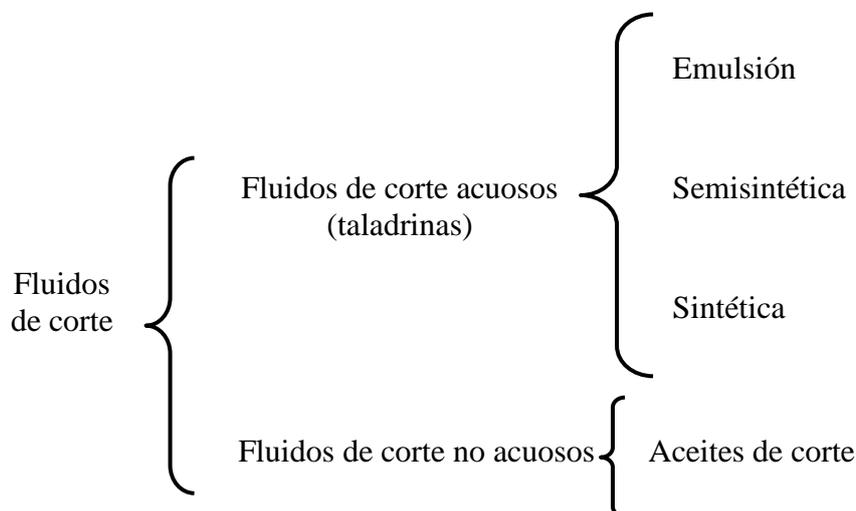


Fig. 3.2 Clasificación de los fluidos de corte en operaciones de mecanizado. Elaboración propia

4. HERRAMIENTAS PARA MECANIZADO

4.1 Materiales para herramientas

4.1.1 Requisitos y características

Las características que deben tener los materiales para herramientas son las siguientes:

- ♦ Dureza en frío
- ♦ Dureza en caliente. A las altas temperaturas que aparecen en el proceso de corte, la herramienta ha de ser más dura que la pieza.
- ♦ Tenacidad, para resistir choques alternativos.
- ♦ Evacuación rápida del calor, es decir, un buen coeficiente de conductividad.
- ♦ Superficie con bajo rozamiento.
- ♦ Buenas características mecánicas que eviten deformaciones.
- ♦ Precio acorde con su duración y/o tipo de trabajo en que se emplea.

4.1.2 Clasificación

Los materiales empleados para la fabricación de herramientas son, de menor a mayor dureza:

- ♦ Aceros, fundamentalmente aceros rápidos (HSS).
- ♦ Estelitas, aleaciones fundidas, muy poco usadas.
- ♦ Carburos o metales duros.
- ♦ Oxidos o cerámicas.
- ♦ Nitruros.
- ♦ Diamante.

Al enumerar las características requeridas a los materiales para herramientas, se mencionaban dos que son opuestas entre sí: *dureza y tenacidad*.

- La *dureza* se relaciona con la velocidad de corte: a mayor dureza en la herramienta, mayor velocidad de corte se puede emplear.
- La *tenacidad* se relaciona con la sección de corte (profundidad de pasada y avance): a mayor tenacidad en la herramienta, mayores avances y profundidades pueden emplearse.

4.1.2.1 Aceros de herramientas

* *Aceros al carbono*

En un principio se utilizaron aceros al carbono templados (F-51XX), pero su dureza cae brutalmente con la temperatura.

Los aceros aleados para herramientas (F-52XX) tampoco son aptos para trabajar a grandes velocidades por ser poco resistentes a las temperaturas elevadas. Se utilizan para fabricar brocas, fresas y machos de roscas utilizados con materiales blandos.

* *Aceros rápidos*

Los aceros más utilizados son los aceros *rápidos*, aceros muy aleados que conservan su dureza hasta los 600 grados centígrados o más, por lo que pueden trabajar a mayores velocidades de corte que los aceros al carbono. Se conocen también con las siglas HSS (High Speed Steel).

Cuando se trata de herramientas pequeñas (brocas, machos de roscas, fresas,...) son enterizas, es decir, toda la herramienta es de acero rápido. En el resto de herramientas, los filos son postizos.

Entre los distintos tipos de elementos de aleación empleados destacan:

- ◆ aceros al Molibdeno, los más tenaces,
- ◆ aceros al Wolframio,
- ◆ aceros al Cobalto, los más frágiles, y más duros en caliente,
- ◆ aceros al Vanadio.

En condiciones de corte variables, con corte intermitente, las herramientas de acero rápido son las más usadas, dada su gran tenacidad.

* *Aceros recubiertos*

Una variedad de los aceros rápidos son los aceros rápidos *recubiertos*, que reúnen las características de tenacidad del acero rápido y la dureza del recubrimiento.

Material de los recubrimientos

Los recubrimientos más empleados son:

- ◆ El Nitruro de Titanio (NTi) que le da un color amarillo a la herramienta.
- ◆ El Carbo-Nitruro (o Cianuro) de Titanio (CNTi), con un color rosa.

Métodos para realizar el recubrimiento

Los recubrimientos son del orden de unas 5 micras. Se realizan mediante dos procedimientos:

- Procedimiento químico (CVD, Chemical Vapour Deposition), que requiere una reacción química a unos 1000 grados centígrados, que afecta a la estructura del núcleo de la herramienta, reduciendo su tenacidad.
- Procedimiento físico (PVD, Physical Vapour Deposition) que se realiza a 500 grados centígrados y no afecta a dicha estructura.

Ventajas de los recubrimientos

- La dureza superficial se duplica en el caso de NTi y se triplica en el CNTi.
- Disminución de la fuerza de corte y de la potencia de corte entre el 20 y el 30%.
- Menor recrecimiento del filo.
- Menor absorción de calor por parte de la herramienta debido al recubrimiento.

Como consecuencia de todo ello, se puede aumentar la velocidad de corte y el avance, con la consiguiente reducción del tiempo de mecanizado.

El único problema es que con el desgaste se pierda la capa de recubrimiento y no se puede afilar. Hay que tirar, entonces, la herramienta una vez usada, aunque esta práctica es cada vez más común con el empleo de plaquitas intercambiables, tal y como se analizará en los capítulos de torneado y fresado.

Este tipo de recubrimientos también se utiliza en piezas sometidas a fuertes desgastes, como es el caso de engranajes y rodillos de laminación.

4.1.2.2 Metales duros

Los metales duros o carburos, son aleaciones obtenidas por sinterización de los Carburos de Cromo (Cr), Molibdeno (Mo), Tántalo (Ta), Titanio (Ti), Vanadio (V) y Wolframio o Tungsteno (W).

Presentan una gran dureza en frío de 70 a 80 HRC, son muy homogéneos y altamente resistentes al desgaste. La mayor ventaja que tienen, con respecto a los aceros rápidos, es que a una temperatura de 1000 grados centígrados sólo pierden, aproximadamente, un 15% de su dureza, por lo que permiten trabajar con ellos a grandes velocidades de corte.

Se trata de herramientas muy duras, pero poco tenaces. Por ello, y también por su alto precio, se emplean en forma de plaquitas intercambiables que se fijan a su mango por medios mecánicos. También se utilizan placas soldadas al mango.

Clasificación ISO de los materiales de corte duros:

La norma ISO 513:2004(E) de los materiales de corte duros proporciona un código relacionado con el tipo de material de pieza para el que la herramienta es adecuada y con la dureza y tenacidad de la misma. Es aplicable a todos los materiales de corte para herramientas con geometría definida excepto a los aceros rápidos (metales duros, cerámicas, nitruro de boro y diamante). Esta clasificación consta de seis grupos identificados con las siguientes letras y colores:

- Grupo P (azul), para mecanizado de aceros y aceros fundidos.
- Grupo M (amarillo), para mecanizado de aceros inoxidables.
- Grupo K (rojo), para mecanizado de fundición.
- Grupo N (verde), para mecanizado de metales no férreos (aluminio, cobre, latón y bronce).
- Grupo S (marrón), para mecanizado de materiales termorresistentes (superaleaciones termorresistentes y aleaciones de aluminio).
- Grupo H (gris), para mecanizado de materiales templados (aceros templados y otros).

Cada grupo principal se subdivide a su vez en subgrupos según sea su tenacidad y dureza. En el capítulo correspondiente a herramientas de torneado se estudiarán estos grupos más detalladamente. Dependiendo del material a mecanizar y del tipo de proceso, se elegirá la calidad más adecuada, analizando cuál es la relación tenacidad/dureza (o lo que es igual avance/velocidad de corte) idónea.

Respecto a composición química y estructural, los metales duros se clasifican en:

- *Carburos metálicos*, de Tungsteno, Titanio, Tántalo, ... en los que uno de ellos predomina sobre los demás.
- *Carburos mejorados*, para evitar problemas de fatiga.
 - ♦ *micrométricos*, de grano de polvo muy fino (1 micra) que mejora la tenacidad
 - ♦ *fundidos*, en los que se unen los carburos con un ligante de naturaleza refractaria para resistir altas temperaturas.
- Carburos recubiertos.

Los procedimientos para los recubrimiento son los citados en los HSS (PVD y CVD).

Mediante CVD (1000 grados centígrados) se obtienen recubrimientos monocapa o multicapa de carburos (TiC, TiCN, TiN, CW) y cerámicas (Al_2O_3) con un espesor total entre 3 y 12 micras. La desventaja del método vuelve a ser la reducción de tenacidad del sustrato.

Por el procedimiento PVD (500 grados centígrados) se realizan recubrimientos de TiN y TiCN que no reducen la tenacidad de la herramienta. El espesor total del recubrimiento suele ser de 3 micras.

Los carburos o metales duros son los materiales más empleados para la fabricación de herramientas, llegando a suponer un 70-80% del total.

4.1.2.3 Cerámicas

Tienen un campo de aplicación más reducido que los metales duros, pues las grandes velocidades de corte que necesitan para trabajar requieren para su empleo máquinas muy robustas y con altos rangos de velocidades.

* Clasificación

- CERMET, mezcla de Oxido de Aluminio, Carburo de Vanadio y otros carburos. Trabajan a altas velocidades pero no admiten avances elevados. Los CERMET también suelen considerarse un tipo de metal duro.
- Cerámicas con base de Oxido de Aluminio (alúmina Al_2O_3) con adición de óxidos o carburos de otros metales (ZrO_2 , TiC, TiCN) que mejoran tenacidad y propiedades térmicas.

- Cerámicas con base de Nitruro de Silicio (Si_3N_4) cuyas propiedades térmicas y de tenacidad son superiores a las anteriores.

Su fabricación se realiza por sinterización de polvos, que han de ser bien compactados para evitar porosidades.

Las cerámicas trabajan en seco, pues el fluido de corte fragiliza la herramienta. La refrigeración se hace soplando aire.

Suelen aplicarse en el mecanizado de fundición y materiales aeroespaciales.

4.1.2.4 Nitruros

El más utilizado es el Nitruro de Boro Cúbico (CBN) que comparado con las cerámicas ofrece una mayor dureza y resistencia a la fractura. Puede utilizarse para mecanizar materiales templados y aceros rápidos.

El rendimiento de las herramientas CBN, en términos de duración de herramienta, puede ser hasta 100 veces mejor que el de las herramientas de metal duro o de cerámica, aunque su coste sea entre 10 y 20 veces superior.

4.1.2.5 Diamante

Se utilizan diamantes naturales (negros) y, fundamentalmente, artificiales: diamante policristalino (PCD).

Su aplicación fundamental es en procesos de rectificado, aunque también se utiliza en forma de pastillas sinterizadas en procesos de torneado, taladrado y fresado, para mecanizar aleaciones ligeras a muy altas velocidades (hasta 2000 m/min) y materiales compuestos de fibra de carbono, en aplicaciones aeroespaciales.

Su rendimiento es mucho mayor que en el caso del CBN, llegándose a una duración hasta 150 veces mayor que el metal duro. Su precio, obviamente, es también mayor que el de los CBN.

4.2 Duración de las herramientas

El desgaste de las herramientas es la pérdida de sus cualidades para cortar el material en forma de virutas. En las herramientas de corte con geometría definida, el desgaste básicamente está relacionado con modificaciones geométricas en la zona de corte (filo y superficies de desprendimiento e incidencia). Estos cambios son debidos a la pérdida de material de la herramienta, a la adhesión de material de

la pieza sobre la herramienta o a la deformación o rotura de la misma. Finalmente, el desgaste de la herramienta reduce su rendimiento a límites inaceptables que obligan a cambiarla o afilarla.

Es necesario, vigilar el desgaste de la herramienta para modificar las condiciones de trabajo si resulta excesivo, y para sustituir la herramienta cuando sea inadmisibile.

4.2.1 Desgaste de las herramientas

4.2.1.1 Mecanismos de desgaste

Los mecanismos que producen el desgaste de la herramienta son:

- *Desgaste por abrasión*, fundamentalmente se da en la superficie de incidencia debido a las interferencias de rugosidades y a partículas libres que se clavan y arañan la herramienta.
- *Desgaste por adhesión*, debido a las elevadas presiones y temperaturas en la zona de corte, en algunas condiciones se suelda el material de la viruta a las superficies de desprendimiento e incidencia de la herramienta. Ese material superpuesto cambia la geometría de corte y puede hacer que la herramienta deba sustituirse (provoca peor acabado superficial, aumenta las fuerzas de mecanizado y el riesgo de rotura de la herramienta, etc.). Esa capa puede desprenderse arrancando pequeños trozos de la herramienta o rompiéndola completamente.
- *Desgaste por fatiga*, generalmente consiste en una combinación termomecánica (fluctuación de la temperatura y de las fuerzas de mecanizado). Generan agrietamiento y rotura del filo.
- *Desgaste por difusión*, en la difusión tiene lugar un intercambio de átomos doble en sentidos opuestos (herramienta-pieza y viceversa). Este fenómeno es más importante cuanto mayor sea la temperatura y también depende de las propiedades químicas del material de corte y de sus recubrimientos así como de su afinidad con el material de la pieza.
- *Desgaste por oxidación*, formación de óxidos del material de la herramienta debido a las altas temperaturas y a la presencia de aire. Es un fenómeno poco común en el mecanizado actual.
- *Choques*, debidos a casos en los que se realiza corte discontinuo o a errores en el movimiento de la herramienta.

Todos estos fenómenos se dan conjuntamente, aunque dependiendo de las condiciones de trabajo y materiales de pieza y herramienta, predomina uno o varios sobre los demás.

4.2.1.2 Consecuencias del desgaste

Los efectos más comunes que se producen en las herramientas son:

- *Desgaste de flanco de incidencia.* Este tipo de desgaste se produce en la superficie de incidencia, formándose un chafán, debido principalmente a fenómenos de desgaste por abrasión. Las causas principales son una excesiva velocidad de corte, excesivo rozamiento o material de la herramienta con insuficiente resistencia al desgaste.
- *Desgaste de Cráter.* Se produce en la superficie de desprendimiento, cerca del filo (en la zona donde la temperatura de la herramienta es máxima). En general es debido a fenómenos de desgaste por abrasión y por difusión. El desgaste de cráter debilita el filo incrementando el riesgo de rotura (en algunos casos puede ser un criterio de sustitución de herramienta). Las principales causas de este desgaste son temperaturas excesivas o afinidad entre el material de la herramienta y de la pieza.
- *Formación de filo recrecido.* Consiste en la adhesión de material de la pieza mecanizada sobre la superficie de desprendimiento en la zona cercana al filo. El principal mecanismo de desgaste es el de adhesión. Se modifica la geometría de la herramienta empeorando el proceso de corte. Aumentan las fuerzas de corte y la formación de viruta es inestable originándose vibraciones que perjudican el acabado superficial.
- *Deformación plástica del filo,* por una excesiva temperatura de corte y esfuerzos de mecanizado.
- *Pequeñas fracturas del filo de corte,* fundamentalmente aparecen al emplear herramientas poco tenaces.
- *Rotura del filo.*

4.2.1.3 Tiempo de vida del filo de una herramienta

Se define como el tiempo de corte durante el cual el filo mecaniza piezas aceptables dentro de unos parámetros establecidos para las mismas, manteniéndose, en general, un riesgo pequeño de rotura de la herramienta.

Los conceptos “piezas aceptables” y “riesgo pequeño de rotura de herramienta” son distintos dependiendo del tipo de mecanizado, calidad superficial y dimensional requerida, tipo de herramienta, etc. Por ello, para una operación de mecanizado concreta se establecen uno o varios *criterios de duración de herramienta*, consistentes en un valor límite preestablecido para la medida de desgaste de herramienta o en la aparición de determinado fenómeno o circunstancia que marca el fin de vida de la herramienta. De esta forma, la vida del filo será el tiempo de corte necesario para alcanzar el criterio de duración de la herramienta (por ejemplo, que la rugosidad de la pieza mecanizada o el desgaste de cráter de la herramienta alcance un cierto valor).

La duración de las herramientas se establece normalmente dando un tiempo de vida para una velocidad de corte determinada. Así si, por ejemplo, para una velocidad de corte de 150 m/min, la herramienta dura 60 minutos, se expresa:

$$T_{150} = 60 \text{ minutos}$$

o bien: $V_{(60)} = 150 \text{ m/min}$

En otras ocasiones lo que se evalúa es el número de piezas que se pueden mecanizar o la longitud de corte trabajada (muy usual en taladrado).

Magnitudes que pueden emplearse para fijar el fin de vida de herramienta:

- Acabado superficial y/o precisión dimensional de la pieza mecanizada insuficientes. Estas magnitudes se emplean para definir el fin de vida de herramienta fundamentalmente en operaciones de acabado.
- Patrón de desgaste con riesgo de rotura de filo inminente. Puede controlarse la evolución del grado de desgaste de la herramienta en relación al tiempo de corte. Para ello es necesario realizar medidas de desgaste de la herramienta cada cierto tiempo.
- Pérdida de la capacidad de la herramienta para controlar el flujo de la viruta.
- Rotura de la herramienta. No es un criterio de fin de vida de herramienta adecuado debido a que al llegarse a la rotura del filo se producen daños en la pieza e incluso en la máquina. Cuanto mayor es el nivel de desgaste, mayor es el riesgo de rotura (especialmente a partir de un cierto nivel en el que se

acelera el proceso de desgaste). El riesgo de rotura no puede evitarse al 100% pero debe mantenerse controlado (especialmente en máquinas de mecanizado automáticas sin supervisión).

- Medida de otras magnitudes relacionadas con el grado de desgaste de la herramienta y con la calidad del mecanizado realizado, por ejemplo:
 - Medida de las componentes de la fuerza de mecanizado.
 - Medida de vibraciones y ruidos en la máquina.
 - Medida de la temperatura en la zona de corte.
- Utilización de un valor predeterminado de vida de filo prevista. Esta vida de filo prevista puede obtenerse de información suministrada por el fabricante de herramientas (orientativa) o basarse en la experiencia de mecanizados iguales o parecidos realizados previamente. Este sistema se utiliza frecuentemente en el mecanizado realizado en sistemas automatizados sin supervisión. Presenta la desventaja de desaprovechar parte de la vida útil del filo debido a que debe establecerse un cierto margen de seguridad para evitar la rotura de la herramienta o mecanizados de insuficiente calidad.

4.2.1.4 Medida del grado de desgaste de una herramienta

Medida del desgaste: dimensión que debe determinarse y que cuantifica el desgaste de la herramienta.

Según el mecanismo de desgaste predominante en un determinado mecanizado, se emplearán distintas magnitudes como medida de desgaste. Ejemplos:

- Desgaste de flanco: medida empleando un microscopio óptico de la franja de desgaste en la superficie de incidencia (V_B).
- Desgaste de cráter: medida de la profundidad del cráter (K_B).

La realización de medidas de desgaste y de ensayos de desgaste se describe en detalle en la siguiente normativa:

- “Ensayos de duración de herramientas de torno de corte único” (UNE 16-148-85).
- “Tool-life testing with single-point turning tools” (ISO 3685:1993).
- “Tool life testing in milling - Part 1: Face milling” (ISO 8688-1:1989).
- “Tool life testing in milling - Part 2: End milling” (ISO 8688-2:1989).

4.2.2 Determinación analítica de la vida de la herramienta

Los factores que influyen en la vida de herramienta son muy variados: velocidad de corte, avance, profundidad, geométrica de corte, etc.

Existen multitud de fórmulas empíricas que relacionan el tiempo de vida de herramienta T con las variables antes mencionadas. Se analizan a continuación las dos más conocidas: la fórmula de Taylor y la fórmula de Taylor generalizada. En la práctica, la vida útil de herramienta se da en forma de tablas y no según una fórmula.

4.2.2.1 Fórmula de Taylor

La fórmula de Taylor sólo considera como variable la velocidad de corte. Como primera aproximación es válida, pero no debe utilizarse cuando se trate de velocidades de corte y avances extremos (altas y bajas) y para grandes arranques de viruta:

$$T = \left(\frac{C}{V}\right)^{\frac{1}{n}} = \frac{K}{V^{\frac{1}{n}}}$$

Siendo: $T =$ tiempo de vida en minutos

$V =$ velocidad de corte en m/min

Los valores de K , C y n son constantes que dependen del material de la pieza, el material de la herramienta, etc. Estos valores se determinan mediante ensayos.

Como valores orientativos de la constante n podemos citar:

$1/n = 5$ a 7 para metal duro

$1/n = 2$ para cerámicas

$1/n > 7$ para HSS

Generalmente el desgaste de la herramienta evoluciona con el tiempo de corte de manera ascendente. Al acercarse la rotura de la herramienta el desgaste crece muy rápidamente, por lo que normalmente se define el criterio de fin de vida de herramienta de forma que no se llegue a esa zona. Por otra parte, como ya se ha indicado, el desgaste es más rápido cuanto mayor sea la velocidad de corte.

Si aplicamos logaritmos a la fórmula de Taylor:

$$\log T = \log K - \frac{1}{n} \log V$$

La representación gráfica de esta ecuación es la de la figura 4.1:

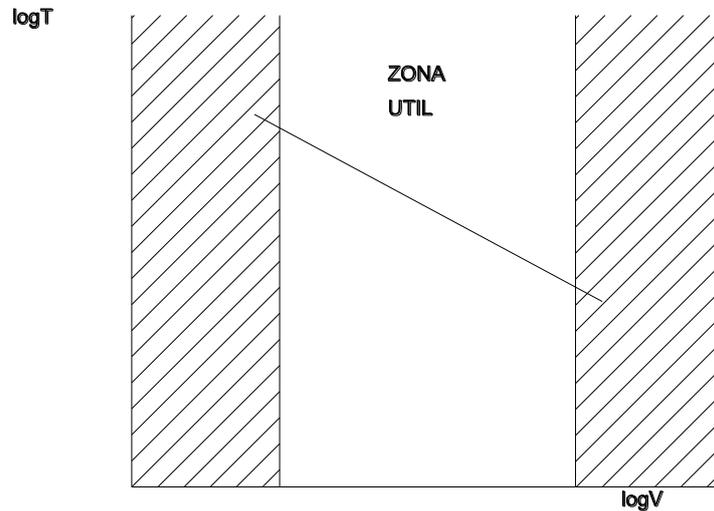


Figura 4.1. Representación de la fórmula de Taylor. Elaboración propia.

4.2.2.2 Fórmula de Taylor generalizada

En este caso se tienen en cuenta la velocidad de corte V , el avance a y la profundidad p , resultando una expresión del tipo:

$$T = \frac{K}{V^{n_1} a^{n_2} p^{n_3}}$$

en donde n_1 , n_2 y n_3 son constantes para cada condición de operación.

Valores orientativos para herramientas de metal duro son:

$$1/n_1 = 5 \text{ a } 7$$

$$1/n_2 = 2 \text{ a } 3$$

$$1/n_3 \cong 1$$

La velocidad de corte y el avance son los factores que más influyen en la vida de la herramienta. El efecto de la profundidad de corte es el menos notable.

4.2.3 Determinación experimental de duración de herramientas

Los ensayos de duración de herramientas tienen como finalidad determinar las constantes C , K y n_i de las ecuaciones de Taylor.

4.2.3.1 Ensayos convencionales

Están normalizados (por ejemplo, UNE 16148) para asegurar su repetibilidad. Son ensayos de larga duración que requieren de una gran cantidad de ensayos para determinar los valores de las constantes.

4.2.3.2 Ensayos rápidos

Son ensayos que se realizan únicamente en torneado, utilizando solamente 1 ó 2 herramientas por ensayo. Consisten en la realización de varias pasadas con diferentes velocidades.

5. ECONOMÍA DEL MECANIZADO

5.1 Tiempos de mecanizado y potencia de corte

El tiempo total de un proceso de mecanizado recordemos que se descomponía en:

$$T = T_p + T_m + T_c$$

en donde: T = tiempo total del proceso

T_p = tiempo de preparación: tiempo empleado en preparar el proceso productivo (operaciones previas a la fabricación).

T_m = tiempo de maniobra: tiempo de operaciones no productivas (no se transforma el material) realizadas durante la fabricación.

T_c = tiempo de corte (tiempo de transformación)

5.1.1 Tiempos de corte

Como cada operación tiene su peculiaridad, se estudiarán los tiempos de mecanizado con cada operación correspondiente. Como ejemplo se analizarán los tiempos de cilindrado en torno.

$$t_c = \frac{l}{V_a} = \frac{l}{a \cdot \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}} = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{1000 \cdot a \cdot V_c} = \frac{S}{1000 \cdot a \cdot V_c}$$

en donde:

- l = longitud a mecanizar (mm)
- V_a = velocidad de avance en mm/min
- a = avance (mm/rev)
- D = diámetro de la pieza (mm)
- S = superficie lateral de cilindrado (mm²)
- V_c = velocidad de corte (m/min)

5.1.1.1 Tiempo total de mecanizado

Para saber el tiempo total, habrá que añadir al tiempo de corte los de preparación t_p y maniobra t_m (tiempos no productivos ya descritos en capítulos anteriores). Estos tiempos pueden estimarse, emplear valores recogidos en "Manuales de tiempos" o emplearse valores obtenidos cronometrando procesos reales.

5.1.2 Potencia de mecanizado

La potencia es el *trabajo producido en la unidad de tiempo* y se calcula como el producto de la fuerza por la velocidad. En las operaciones de mecanizado la potencia principal es la correspondiente al movimiento de corte (potencia de corte):

$$P_c = F_c V_c$$

en donde:

F_c = fuerza de corte

V_c = velocidad de corte

5.1.2.1 Fuerza de corte

5.1.2.2 Fuerza específica de corte, p_s

Se define como la energía absorbida en el proceso de corte por unidad de volumen de material a mecanizar. Considerando que la mayor parte del trabajo de mecanizado corresponde a la componente F_c de la fuerza total, se cumple:

$$F_c = S p_s = a p p_s$$

S = sección de viruta en mm^2

p_s = fuerza específica de corte en kg/mm^2

a = avance en mm

p = profundidad en mm

Los valores de p_s se obtienen por experimentación y se encuentran recopilados en tablas o gráficos. Los factores que influyen en p_s son:

- La sección de viruta: p_s disminuye al aumentar la sección.
- El ángulo de desprendimiento: p_s disminuye si aumenta γ .

Estos factores, según Kronenberg, influyen a través de la siguiente expresión:

$$p_s = \frac{C_{ps}}{A^{1/E_{ps}}} = M \cdot C_{ps}$$

donde: p_s = fuerza específica de corte

A = sección de viruta

C_{ps} y M_{ps} = coeficientes que dependen del material cortado y γ .

Las tablas de las figuras 5.1. y 5.2. muestran los valores de M_{ps} y C_{ps} para algunos materiales.

γ	ACERO			
	50 kg/mm ²	60 kg/mm ²	70 kg/mm ²	80 kg/mm ²
5	263	301	340	380
10	254	291	329	367
15	245	280	317	354
20	235	270	304	340
25	225	258	291	325
30	215	246	278	310

Figura 5.1. Valores de C_{ps} en Kg/mm². Elaboración propia

Sección viruta	2	3	4	5	10	15	20
M	0.87	0.8	0.77	0.72	0.64	0.59	0.56

Figura 5.2. Valores de M para el acero. Elaboración propia.

Para ángulos de desprendimiento distintos de 12°, se emplea la siguiente fórmula de corrección:

$$p_s(\gamma) = p_s(12) [1 + \Delta\gamma 0,015]$$

5.1.3 Caudal de viruta

El caudal de viruta es el volumen arrancado en la unidad de tiempo:

$$Q = A V$$

en donde:

Q = caudal de viruta en cm³/min

A = sección de viruta en mm²

V = velocidad de corte en m/min

5.1.3.1 Caudal específico de viruta

Se define como el volumen de viruta arrancado en la unidad de tiempo y potencia:

$$Q_e = \frac{Q}{P_{motor}}$$

donde: Q_e = caudal específico de viruta

P_{motor} = potencia del motor

5.2 Costes de mecanizado

El coste total (C_T) de un determinado producto se calcula según:

$$C_T = C_f + C_g$$

C_f : Costes directos o costes de fabricación (conceptos implicados directamente en la fabricación del producto).

C_g : Costes indirectos o generales (costes que se aplican por igual a todos los productos que se fabricación).

5.2.1 Costes de fabricación

El coste de fabricación (C_f) resulta de la suma de los siguientes conceptos:

$$C_f = C_m + C_{mo} + C_a + C_u + C_h$$

C_m : Coste de materia prima

C_{mo} : Coste de mano de obra directa

C_a : Coste de amortización de máquinas y equipos empleados

C_u : Coste de útiles especiales

C_h : Coste de herramientas

Estos apartados ya se han estudiado en anteriores capítulos. En este caso, se particularizará para el caso de mecanizado:

5.2.1.1 Coste operativo de mecanizado

Los costes de mano de obra directa y amortización de máquinas y equipos empleados vienen dados por las expresiones:

$$C_{mo} = S \cdot t_T$$

$$C_a = A \cdot t_T$$

t_T : tiempo total de fabricación

S : Coste de la hora de trabajo del operario/s implicado/s en el proceso

A : Coste horario de amortización de los equipos

Ambos términos son proporcionales al tiempo de uso del puesto de trabajo. Su combinación es el *coste operativo de mecanizado* (C_{op}):

$$C_{op} = (S+A) \cdot t_T = H \cdot t_T$$

en donde: $H =$ coste horario del puesto de trabajo

Tiempo total de fabricación:

El tiempo total de un proceso t_T se descompone en:

$$t_T = t_p + t_m + t_t$$

en donde: $t_p =$ tiempo de preparación (no productivo)

$t_m =$ tiempo de maniobra (no productivo)

$t_t =$ tiempo de transformación

En el caso de los procesos de mecanizado:

- El tiempo de transformación t_t se denomina *tiempo de corte* t_c
- El tiempo total del proceso t_T se denomina *tiempo de mecanizado* t_{mec}

5.2.1.2 Coste de herramienta

El *coste de herramienta* C_h para una operación de mecanizado es:

$$C_h = n_f \cdot C_{filo} + C_{ch}$$

en donde: $n_f =$ número de fillos utilizados

$C_{filo} =$ coste del filo

$C_{ch} =$ coste del cambio de herramienta

- El coste de *cambio de herramienta* corresponde al coste de ocupación del puesto de trabajo debido al tiempo empleado en los cambios de herramienta:

$$C_{ch} = t_{ch} \cdot n_{cf} \cdot H$$

en donde: $t_{ch} =$ tiempo de cambio de filo

$n_{cf} = n_f =$ número de cambios de filo (igual al número de fillos empleados, n_f)

En general el coste de cambio de herramienta se considera como parte de los costes operativos de mecanizado que ya han sido incluidos anteriormente. En dichas condiciones el tiempo de cambio de herramienta se encuentra dentro de los tiempos de maniobra (t_m).

Sin embargo, para los análisis posteriores se considerará el tiempo de cambio de herramienta de forma independiente y que los restantes tiempos de preparación y maniobra son de un orden de magnitud inferior al tiempo de corte, resultando:

$$t_T \approx t_c$$

con lo que:

$$C_f = C_m + t_c \cdot H + n_f \cdot C_{filo} + C_{ch}$$

$$C_f = C_{fijos} + t_c \cdot H + n_f \cdot C_{filo} + t_{ch} \cdot n_f \cdot H$$

- El *número de fillos empleados* se calcula con:

$$n_f = \frac{t_c}{T}$$

en donde: $t_c =$ tiempo de corte

$T =$ vida de la herramienta

- El cálculo del *coste de cada filo* de una herramienta depende del tipo de herramienta. A modo de ejemplo se muestra la expresión del coste de filo para el mecanizado en torno con herramientas de plaquita intercambiable:

$$C_{filo} = \frac{C_{sop}}{n_{ps} \cdot n_{fp}} + \frac{C_{pla}}{n_{fp}}$$

en donde: C_{sop} = coste de soporte
 n_{ps} = número de plaquitas que dura el soporte
 n_{fp} = número de fillos por plaquita
 C_{pla} = coste de la plaquita

5.2.2 Análisis del coste de fabricación en una operación de cilindrado

Como se ha visto en apartados anteriores la expresión del coste de fabricación en operaciones de mecanizado es:

$$C_f = C_{fijos} + t_c \cdot H + n_f \cdot C_{filo} + t_{ch} \cdot n_f \cdot H$$

Sustituyendo t_c por su expresión para las operaciones de cilindrado en torno (ver apartado 5.1.1.1):

$$C_{op} = t_c \cdot H = \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} \cdot H$$

S : superficie lateral de cilindrado
 a : avance
 v_c : velocidad de corte

Como se indicó anteriormente el *número de fillos empleados* se calcula con:

$$n_f = \frac{t_c}{T}$$

Para estimar este valor se puede utilizar el tiempo de vida T dado por la fórmula de Taylor. El valor de t_c se calcula por la expresión ya conocida para el cilindrado:

$$n_f = \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} \cdot \frac{v_c^{\frac{1}{n_1}} \cdot a^{\frac{1}{n_2}} \cdot p^{\frac{1}{n_3}}}{K}$$

Reemplazando las expresiones anteriores:

$$C_f = C_{fijos} + H \cdot \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} + (t_{ch} \cdot H + C_{filo}) \cdot \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} \cdot \frac{v_c^{\frac{1}{n_1}} \cdot a^{\frac{1}{n_2}} \cdot p^{\frac{1}{n_3}}}{K}$$

En la práctica, la profundidad no influye demasiado en el tiempo de vida de herramienta. Se define entonces como constante **A**:

$$A = \frac{K}{\frac{1}{p^{n_3}}}$$

con lo que el coste de fabricación queda:

$$C_f = C_{fijos} + H \cdot \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} + (t_{ch} \cdot H + C_{filo}) \cdot \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} \cdot \frac{v_c^{\frac{1}{n_1}} \cdot a^{\frac{1}{n_2}}}{A}$$

Su representación es la que se muestra en la figura 5.3.

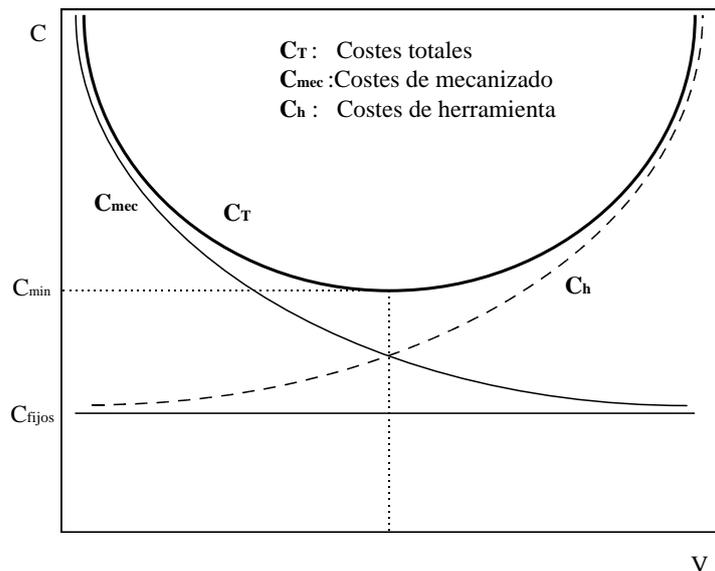


Figura 5.3. Costes de fabricación en el mecanizado. Elaboración propia

5.2.2.1 Regímenes de corte óptimos

La definición de los parámetros de corte más adecuados para un proceso de mecanizado (especialmente v_c y a , pues p está muy determinado por la geometría a obtener), puede realizarse según los siguientes criterios (o criterios mixtos):

- Condiciones de mínimo coste de fabricación.

- Condiciones de máxima producción (tiempo de fabricación mínimo).
- Condiciones de máximo beneficio

Tasa de beneficio:

La tasa de *beneficio* se obtiene a partir de la diferencia entre los *ingresos totales* I_t generados por el componente que se está fabricando y los *costes totales* C_t en el *tiempo de fabricación* t_{mec} :

$$B = \frac{I_t - C_t}{t_{mec}}$$

$$B = \frac{I_t - H t_{mec} - C_{filo} \frac{t_c}{T}}{t_{mec}} = \frac{I_t - C_{filo} \frac{t_c}{T}}{t_p + t_c + t_{ch} \frac{t_c}{T}} - H$$

Para una operación de cilindrado queda:

$$B = \frac{I_t - C_{filo} \frac{S}{1000 \cdot A} v_c^{\frac{1}{n_1}-1} a^{\frac{1}{n_2}-1}}{t_p + \frac{S}{1000 \cdot a \cdot v_c} \left(1 + t_{ch} \frac{v_c^{\frac{1}{n_1}} a^{\frac{1}{n_2}}}{A} \right)} - H$$

5.2.2.2 Restricciones sobre los parámetros de mecanizado

Los valores óptimos para los parámetros de corte, obtenidos según alguno de los criterios anteriormente citados, están sometidos a las siguientes restricciones:

* *Restricciones impuestas por la gama de avances y velocidades de la máquina.*

La máquina utilizada tendrá una gama de avances y velocidades con unos máximos y unos mínimos, lo que limita el campo de trabajo. Por otro lado, si la máquina tiene unos avances y revoluciones discretos, el campo de trabajo se limita a una retícula de puntos de funcionamiento que no coincidirán, normalmente, con la curva de mínimo coste o máxima producción.

* *Restricciones impuestas por la herramienta.*

La herramienta, a su vez, limita la zona de trabajo también mediante una velocidad máxima y mínima y un avance máximo y mínimo.

* *Restricciones por potencia.*

La potencia máxima de la máquina limita también el campo de trabajo. La expresión de la potencia de corte es:

$$P_c = F_c \cdot V_c = p_s \cdot a \cdot p \cdot V_c$$

La fuerza específica de corte (p_s) varía con la sección de la viruta, por lo que también puede emplearse la siguiente expresión:

$$P_c = K \cdot a^x \cdot p^y \cdot V_c$$

en donde el exponente y es aproximadamente 1.

Una máquina-herramienta concreta tendrá una determinada potencia de corte máxima ($P_{m\acute{a}x}$), por lo que los parámetros V_c y a deben verificar:

$$K \cdot a^x \cdot p^y \cdot V_c \leq P_{m\acute{a}x}$$

Representando esta expresión gráficamente se ve que queda una zona prohibida, inalcanzable, porque la máquina no tiene potencia suficiente.

* *Restricción de acabado superficial.*

El acabado superficial establece una condición de avance máximo, definida por:

$$R_t = \frac{a^2}{8r} 1000$$

donde: R_t = rugosidad en micras
 a = avance
 r = radio de punta de la herramienta

6. ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DEL MECANIZADO

6.1 Introducción

Como se explicó en la introducción de la asignatura, el conocimiento de la legislación medioambiental y de los dispositivos y tecnologías orientados a reducir el impacto ambiental de los procesos productivos presenta cada vez una mayor importancia.

En este capítulo se van a estudiar los distintos residuos que aparecen en un proceso de mecanizado y su problemática medioambiental. En la figura 6.1 se muestran las diferentes entradas (elementos a la izquierda) y salidas correspondientes a una máquina herramienta. Dentro de las salidas se han colocado las emisiones en la parte superior y las restantes salidas a la derecha. Lógicamente, la pieza mecanizada no se considerará como residuo, sino como producto obtenido, aunque también puede tener un cierto impacto ambiental.

Además de los residuos indicados en la figura existen otros elementos que pueden generar una problemática medioambiental. Por ejemplo el aceite de lubricación de la máquina herramienta, o la propia máquina, que se convierte en un residuo al acabar su ciclo de vida.



Figura 6.1 Entradas y salidas en un proceso de mecanizado. Modificada de A. Pernía, Prácticas de mecanizado en torno y fresadora, 2018

Dentro de los residuos indicados en la figura, los más importantes son los fluidos de corte por su peligrosidad y las virutas por su elevado volumen.

Dentro de los fluidos de corte deben incluirse las salpicaduras y los fluidos arrastrados. Estos elementos no son en sí mismo residuos, sino que adoptan la consideración de residuos cuando finaliza su vida útil.

6.2 Gestión de virutas

Se denomina viruta al material excedente obtenido durante el mecanizado de las piezas. En el caso de los procesos de mecanizado que emplean herramientas de geometría no definida (por ejemplo, rectificado) se suele denominar a este material lodo de mecanizado (mezcla de pequeñas partículas arrancadas a la pieza, fluido de corte y material abrasivo). Tanto las virutas como los lodos de mecanizado arrastran una cierta cantidad de fluido de corte, lo cual supone un aumento del consumo de fluido de corte y la necesidad de una adecuada gestión.

A diferencia de los fluidos de corte agotados, las virutas (siempre que la proporción de fluido de corte arrastrado no alcance el 3%) no se consideran un residuo peligroso. Por ello, es necesario hacer una separación exhaustiva de las virutas y el fluido de corte arrastrado. Entre los distintos sistemas que permiten realizar esa separación puede destacarse:

- Drenaje por gravedad: se suele realizar en las cintas que transportan las virutas hacia los contenedores, en los propios contenedores o en depósitos de decantación.
- Centrifugado: consiste en hacer girar la mezcla de virutas y fluido de corte para lograr la separación del fluido por fuerza centrífuga.
- Separación magnética: consiste en separar las virutas mediante potentes imanes. Únicamente es válido para virutas de materiales ferromagnéticos.

En general, los principales problemas originados por las virutas son de tipo económico debido al elevado volumen que ocupan y medioambientales debido al fluido de corte arrastrado.

Asimismo deben considerarse los riesgos laborales que pueden originar las virutas según su procedencia y forma. En algunos casos pueden propiciar silicosis, cáncer de pulmón (por ejemplo debido a la aspiración de virutas en el mecanizado de fibra de carbono), inclusiones en la córnea, cortes y heridas. Es necesario por tanto del

uso de gafas protectoras y mascarillas por parte de los operarios, así como el uso de guantes si la retirada de virutas de la maquinaria se realiza de forma manual.

Entre los beneficios de una gestión eficaz de las virutas se pueden incluir:

- Reducción del tiempo de mecanizado.
- Reducción de los costes de eliminación de residuos y de energía.
- Máximo precio de mercado obtenido por la venta de las virutas.
- Menor capacidad de almacenamiento requerida.
- Reducción del tiempo de manipulación de las virutas

Se observa que es importante una buena gestión de las virutas, no tanto por cuestiones medioambientales, como por aspectos económicos: una buena gestión implicará un menor despilfarro y un mayor reembolso al vender las virutas como subproducto.

6.2.1 Minimización de virutas

Los principales métodos para la minimización de la producción de virutas son:

- Partir de materiales con el tamaño y forma más parecida posible a la de la pieza final. A esta técnica se la denomina “near net shape” (cerca de la forma final).
- Emplear procesos de fabricación como la pulvimetalurgia que no requieren operaciones de mecanizado posteriores.

6.2.2 Incremento del valor de las virutas

Para obtener el máximo beneficio de las virutas producidas deben considerarse los siguientes aspectos:

Cantidad:

Las virutas deben almacenarse (en depósitos adecuados y separadas por clases) hasta reunir la cantidad adecuada para que su transporte resulte más económico.

Pureza:

Se debe evitar mezclar virutas de distintos metales para aumentar los beneficios obtenidos por su venta. Para ello deberán emplearse contenedores diferenciados y limpiar la maquinaria entre fases de producción con diferentes metales.

Recuperación de los fluidos de corte:

Para poder reincorporar fácilmente al sistema el fluido recuperado de las virutas es aconsejable emplear un único tipo de fluido de corte, o la menor variedad posible, en todos los mecanizados de la empresa.

Triturado de las virutas rizadas:

Esta operación permite el secado de las virutas mediante centrifugado y un almacenamiento más compacto que reduce los costes de transporte.

6.3 Gestión de fluidos de corte

6.3.1 Agotamiento de los fluidos de corte

Para que los fluidos de corte pasen a ser residuos y por lo tanto un problema medioambiental, han de pasar por un proceso de agotamiento. Un fluido de corte se considera agotado cuando:

- El resultado del mecanizado no es óptimo (calidad superficial de piezas, precisión, corrosión de herramientas, etc.).
- La composición inicial ha sufrido alteraciones importantes (por ejemplo, disminución de concentración de aditivos) que dificultan una redosificación.
- Se inicia el proceso de descomposición microbiológica, con los consiguientes olores.
- La concentración de sustancias contaminantes como nitritos, nitrosaminas, gérmenes, metales pesados... es elevada y puede causar problemas de salud laboral.

Debido a su toxicidad y su escasa biodegradabilidad, la normativa española clasifica a los fluidos de corte agotados como peligrosos, por lo que requieren de una gestión medioambientalmente adecuada que realizan empresas especializadas. Nunca deben verterse a cauces ni realizarse incineraciones no gestionadas.

El proceso de agotamiento se produce principalmente por las siguientes causas:

- Por el estrés mecánico y térmico de las taladrinas debido al mecanizado.
- Por acumulación de sustancias contaminantes:

1. Contaminación con aceites parásitos (también llamados “tramp oils”): Los aceites parásitos son aceites distintos a los de la composición del fluido de corte que se mezclan con los mismos. Pueden ser fluidos hidráulicos de la máquina-herramienta perdidos a través de fugas, restos de taladrina o aceite de corte que se ha mezclado con otro fluido de corte al pasar de máquina en máquina, etc. Estos contaminantes disminuyen el poder refrigerante, favorecen el crecimiento microbiano y producen nieblas y humos en la atmósfera de trabajo.
2. Crecimiento microbiano: La presencia de bacterias en los fluidos de corte degrada sus propiedades y genera gases ácidos y malos olores.
3. Presencia de virutas en el fluido de corte: Estos contaminantes producen una reducción en la estabilidad del fluido de corte, un mayor desgaste de la maquinaria y herramientas y peores acabados de las piezas mecanizadas.

6.3.1.1 Control de los fluidos de corte:

Las empresas de mecanizado deben realizar, periódicamente, controles a los fluidos de corte para comprobar que no hayan perdido sus propiedades. La periodicidad de estos controles depende del tamaño de la empresa, volumen de mecanizado..., pudiendo ser trimestral, mensual e incluso semanal o diario. Habitualmente el control de los fluidos de corte lo realiza la propia empresa suministradora de estos productos, que es la que mejor los conoce.

Es fundamental controlar proceso de agotamiento de los fluidos de corte, ya que es posible intervenir sobre él para retrasarlo. De esta forma se minimizan los fluidos de corte agotados que deben gestionarse y su correspondiente impacto medioambiental. Como se indicó en capítulos anteriores, la vida media de los aceites de corte suele ser de entre 2 y 3 años y la de las taladrinas de entre 2 y 3 meses. Con un control óptimo puede llegarse a vidas medias de 8 a 9 años para los aceites de corte y de 2 a 3 años para las taladrinas.

6.3.1.2 Empleo de cuba única o tanque centralizado:

Esta tecnología consiste en centralizar todo el fluido en un único tanque desde el que se distribuye a las máquinas y en el que se hacen todos los controles, reposiciones y medidas correctivas. Es adecuada para empresas que utilicen

grandes volúmenes del mismo fluido de corte (o de pocas variedades) y permite minimizar de forma muy importante los residuos producidos.

Entre las ventajas que tiene sobre los tanques individuales, se encuentran:

- Labores de mantenimiento y control simplificados.
- Unificación del tipo de fluido de corte en uso.
- Toda la masa de fluido se encuentra constantemente en movimiento y homogeneización.
- Condiciones de compra más ventajosas por cantidad.

6.3.2 Otras pérdidas de fluidos de corte

En relación con los fluidos de corte, además de su agotamiento, también debe considerarse el impacto ambiental producido por los siguientes factores:

Fugas:

Las fugas en los sistemas de suministro de fluido de corte suelen deberse a fallos en el cumplimiento del plan de mantenimiento del sistema. Pueden producirse a lo largo de toda la extensión del circuito de flujo del fluido de corte. En general la solución más efectiva es implantar un buen sistema de mantenimiento y hacer su correcto seguimiento.

Salpicaduras:

Las altas velocidades de mecanizado y la ausencia de carenados facilitan las proyecciones de fluido de corte. Este fenómeno supone un ensuciamiento del entorno inmediato del área de mecanizado y todo lo que allí se encuentra. Las salpicaduras son más comunes en máquinas sencillas en las que no se dispone de carenados, mientras que la mayoría de las máquinas modernas van equipadas con elementos de retención: carenados, cortinas, etc... Esta puede ser una de las causas de pérdidas más cuantiosa, sobre todo para las taladrinas por su baja untuosidad.

Posibles acciones para minimizar estas pérdidas son:

- Utilización de carenado o pantallas en las máquinas.
- Optimización de las condiciones de aplicación del fluido de corte en cuanto a presión, dirección y caudal.

Arrastres en piezas y virutas:

Se considera arrastres al fluido que se evacua tanto con las piezas mecanizadas como con las virutas. Los arrastres están favorecidos por las geometrías cada vez más complejas de piezas y virutas y por el propio posicionamiento de la pieza durante el mecanizado. Cobran mayor protagonismo cuanto mayor es la untuosidad del fluido por lo que este fenómeno, al contrario que las salpicaduras, es más importante para los aceites de corte que para las taladrinas. El destino del fluido de corte arrastrado es muy variado si bien entre los más habituales se encuentran:

- Se acumulan en los baños de desengrase tras el paso de las piezas por los mismos, reduciendo severamente su eficiencia y duración.
- Lixivian en los parques de almacenamiento de piezas y virutas. Este fenómeno es más importante en condiciones de intemperie donde la lluvia potencia su efecto.
- Manchan las zonas de manipulación y/o trasiego de piezas y virutas generando un importante riesgo higiénico y ambiental al requerir el manguedo de agua u otras medidas de limpieza para su retirada.
- En todos los casos, el destino final del fluido supone una dispersión en el entorno de trabajo, como paso previo a un posible impacto en el medioambiente adyacente.

Para minimizar estas pérdidas de fluido de corte pueden emplearse las siguientes técnicas:

- Posicionar de la pieza durante el mecanizado de forma que la retención del fluido de corte en su interior sea mínima.
- Rediseñar la pieza de forma que su geometría ofrezca las posibilidades de arrastre mínimas.
- Recuperar parte del fluido de corte arrastrado por las virutas mediante las tecnologías explicadas en el apartado de gestión de virutas (drenaje por gravedad en las cintas transportadoras, centrifugadoras, etc.).
- Emplear sopladores o drenaje por gravedad para recuperar parte de los fluidos arrastrados por la pieza haciéndolos retornar al circuito.

Nieblas y otras emisiones ambientales:

Las comúnmente conocidas como “nieblas de aceite” son una de las problemáticas ambientales con mayor impacto en la salud laboral debido a la ingestión por vía respiratoria de compuestos que representan riesgos para la salud.

Las altas velocidades de corte y la presión de suministro del fluido de corte, propician la formación de gotas microscópicas del fluido que se dispersan en el ambiente. Por otra parte, los compuestos volátiles presentes en los fluidos de corte pueden pasar a la atmósfera debido a las elevadas temperaturas en el mecanizado.

Las medidas más efectivas para reducir este tipo de pérdidas son:

- Selección de fluidos de corte con poca o nula tendencia a formar nieblas
- Adecuación de las condiciones de aporte del fluido de corte, reduciendo la presión de suministro hasta el menor valor posible.
- Utilización de equipos auxiliares de extracción, que pueden retornar el fluido condensado o adsorberlo en un material adecuado.

Todos los tipos de pérdidas de fluido de corte anteriormente expuestos, además de la problemática medioambiental directa que conllevan, suponen un despilfarro de fluido de corte y por tanto un problema económico y medioambiental añadido. En las figuras 6.2 y 6.3 se muestran de forma aproximada las proporciones de taladrina y de aceite de corte que se pierden por cada uno conceptos explicados anteriormente.

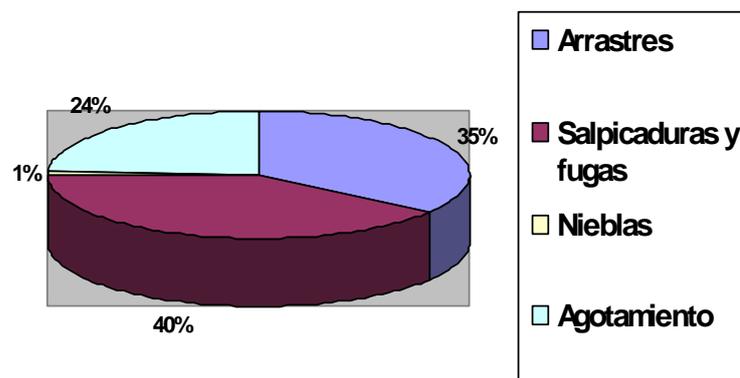


Figura 6.2 Proporción aproximada de las pérdidas de taladrina en procesos de mecanizado. Elaboración propia

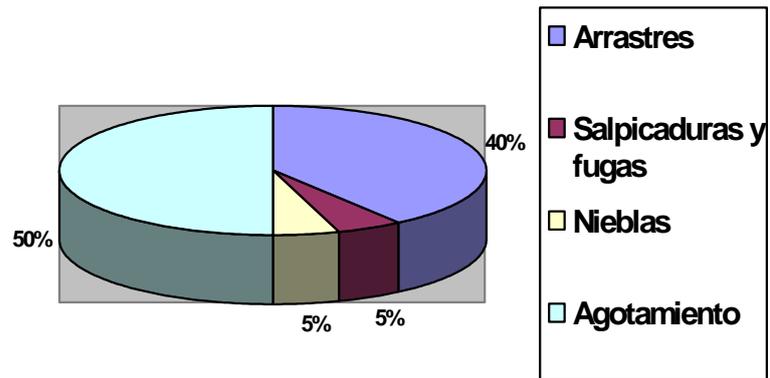


Figura 6.3 Proporción aproximada de las pérdidas de aceites de corte en procesos de mecanizado. Elaboración propia

7. MECANIZADO CON FILOS GEOMÉTRICAMENTE DETERMINADOS

Las diferentes clases de superficies de las piezas exigen distintos procedimientos de fabricación que utilizan máquinas-herramientas específicas, aunque se da también el caso de que una misma superficie se puede obtener por diferentes procedimientos y en distintas máquinas.

Los procesos de mecanizado con filos determinados más utilizados son:

- Aserrado. En el que se corta el material de partida según las dimensiones necesarias, utilizando una sierra.
- Torneado. Para obtención de piezas de revolución. La pieza gira y, desplazando la herramienta de corte se obtiene la forma deseada (ver figura 7.1)

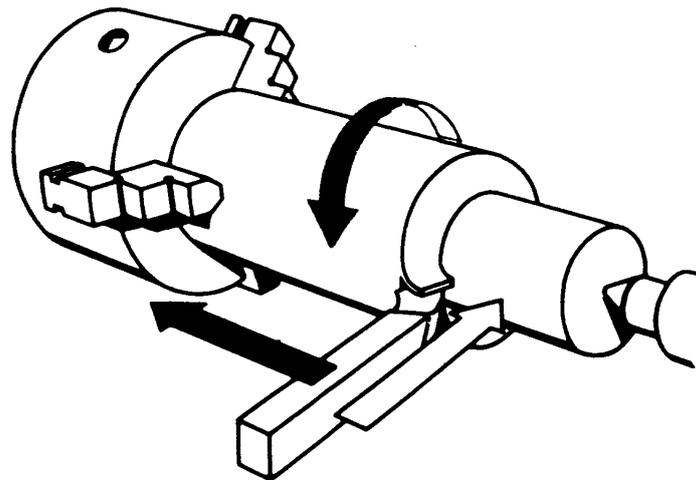


Fig. 7.1 Proceso de torneado. Elaboración propia

- Fresado. Se utiliza una herramienta con múltiples filos de corte que, girando, arranca material de la pieza (ver figura 7.2). Se obtienen así superficies planas, curvas, entalladuras, ranuras, etc.

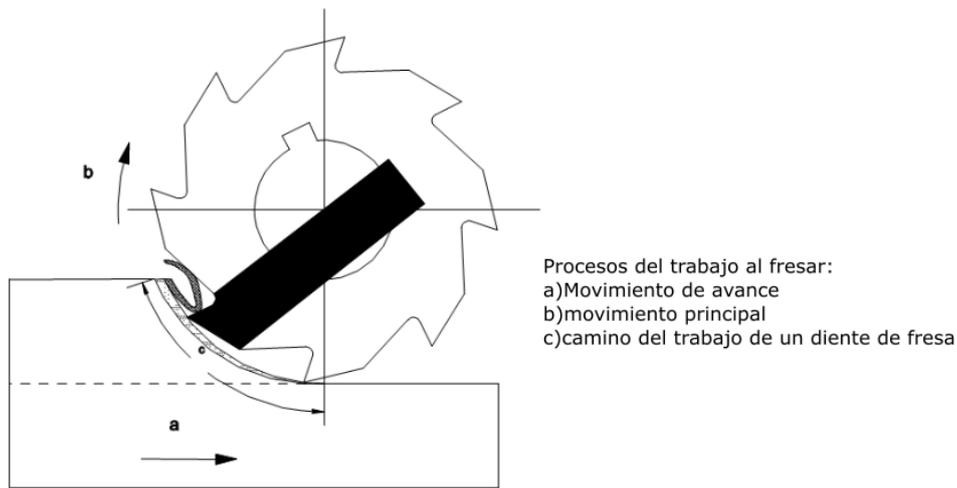


Fig. 7.2 Proceso de fresado. Elaboración propia

- Taladrado. Para realizar agujeros en las piezas con una herramienta denominada broca (ver figura 7.3). Muy similares al taladrado son el avellanado, roscado y escariado, en los que se realizan operaciones posteriores a un taladro.

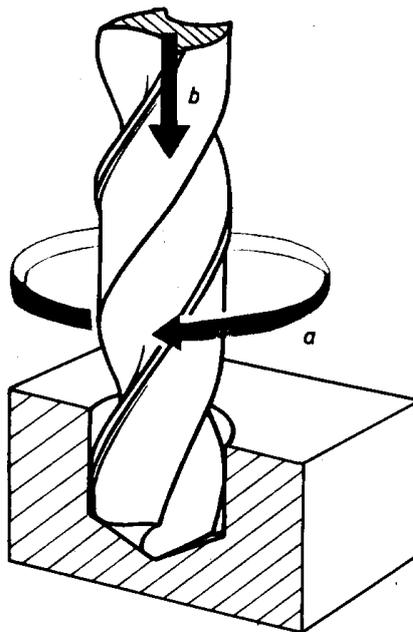


Fig. 7.3 Proceso de taladrado. Elaboración propia

- Cepillado. Proceso de arranque de virutas en forma de tiras con un útil de un solo filo que se mueve horizontalmente.
- Mortajado. Similar al cepillado, pero con movimiento vertical.
- Brochado. Para dar formas interiores complejas a una pieza taladrada previamente.

- Mandrinado. Proceso mediante el cual se realizan taladros de precisión, normalmente horizontales, en una máquina especialmente diseñada para ello, que se denomina mandrinadora.
- Punteado. Proceso mediante el cual se realizan taladros de precisión verticales en una máquina especialmente diseñada para ello que se denomina punteadora.

8. PROCESO DE TORNEADO

Mediante el proceso de torneado se mecanizan superficies de revolución, arrancando virutas con una herramienta de filo geoméricamente determinado que incide constantemente sobre la pieza que se trabaja.

La máquina-herramienta utilizada en este proceso se denomina torno, máquina diseñada para poder realizar de forma adecuada los movimientos antes descritos.

Existe una gran variedad de formas constructivas de tornos, para poder realizar todos los tipos de piezas que aparecen en los diferentes tipos de industrias.

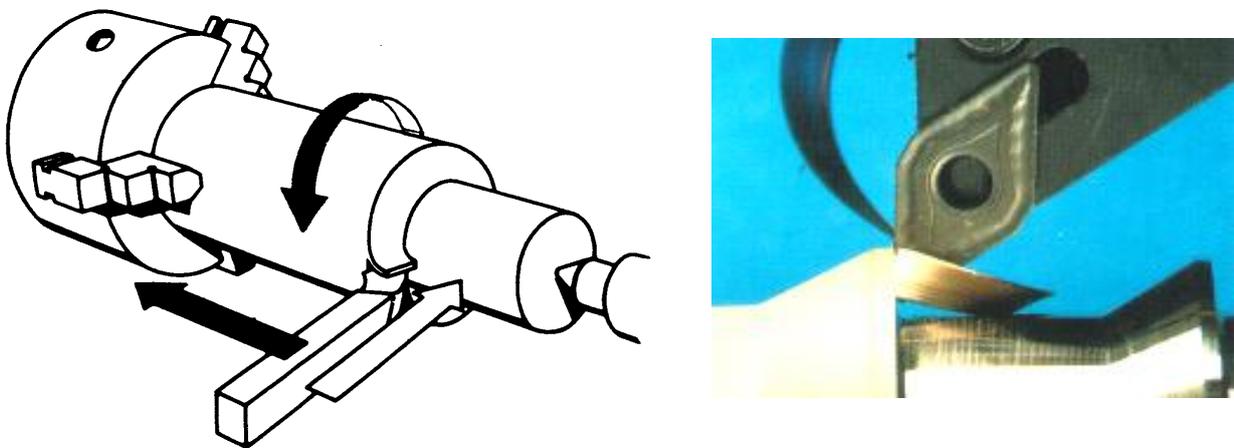


Fig. 8.1. Operaciones de torneado. Elaboración propia

8.1 El torno paralelo. componentes

El torno paralelo es el que se utiliza para el mecanizado de piezas de revolución en general, tanto grandes como pequeñas, y con un tamaño de serie que oscila entre la pieza unitaria y un número limitado.

El operario interviene manualmente en todas las operaciones que se realizan, accionando las distintas manivelas y palancas dispuestas para tal efecto.

Una construcción típica del torno paralelo (también conocido como torno universal, torno horizontal o torno de puntos).

El torno paralelo está formado por una gran cantidad de piezas, que podemos agrupar en las siguientes partes principales:

- Bancada
- Cabezal fijo
- Carro portaherramientas
- Contrapunto o cabezal móvil
- Sistemas auxiliares

A continuación, se describen cada una de estas partes o subsistemas.

8.1.1 Bancada

La bancada es, como en todas las máquinas-herramienta, la pieza que sirve de apoyo para el resto de componentes del torno.

Se fabrican generalmente de fundición, y siempre que el tamaño el torno lo permita, de una sola pieza. Debe ser una estructura rígida, capaz de absorber las vibraciones y esfuerzos producidos en el proceso de mecanizado.

En su parte superior están las guías sobre las que deslizan el contrapunto o cabezal móvil y el carro portaherramientas. Estas guías deben permitir el perfecto asiento de ambos y su deslizamiento de forma suave y sin juego.

Para evitar el desgaste de las guías es conveniente darles un tratamiento de temple superficial y, a continuación un rectificado, con el cual se obtiene de forma precisa la geometría de las mismas.

En algunos tornos, la bancada tiene un escote o entalladura, justo delante del cabezal fijo, para permitir el torneado de piezas cortas de gran diámetro. En los trabajos normales, se cubre este escote con un puente que tiene el mismo perfil de guías que el resto de la bancada, procurando que ajuste perfectamente para no dificultar el deslizamiento del carro. Este tipo de bancadas nunca son tan precisas como las enterizas, por lo que se intentará huir de ellas, buscando otras alternativas (el torno al aire, por ejemplo).

Para terminar, recalcar que la bancada es una de las piezas fundamentales del torno. De su robustez y de la precisión con que estén mecanizadas sus guías dependen, en gran parte, la precisión y el rendimiento de la máquina.

Por este motivo, es común ver a la puerta de los fabricantes de tornos y demás máquinas-herramientas, bancadas que han sido fundidas y que se exponen a la intemperie más de un año para estabilizar el material antes de mecanizarlas.

8.1.2 Cabezal fijo

En el cabezal fijo se encuentra el husillo principal o de trabajo que comunica a la pieza su movimiento de rotación. Pero no es el único componente del cabezal fijo, compuesto, generalmente, de:

- Caja: El husillo se apoya a través de una serie de rodamientos directamente en la bancada o en la caja, armazón rígido, también de fundición, unido a la bancada mediante tornillos. Una operación importantísima en el montaje de la caja es la perfecta alineación entre los alojamientos del husillo y las guías de la bancada.

- Husillo o eje principal: Se trata del componente del torno sometido a más esfuerzos, tanto axiales como de torsión, durante el trabajo. El material con que se fabrica es un acero tratado, al Cromo-Níquel normalmente, de alta resistencia.

El husillo es, generalmente, hueco, para permitir el paso de la barra que se vaya a mecanizar en el caso de utilizar alimentador automático de barra. En su extremo delantero (cabeza del husillo) lleva un cono Morse interior para adaptar el punto utilizado en el torneado entre puntos. En el exterior de ese extremo, y concéntrico con el cono Morse, se encuentra el sistema de sujección del plato. La forma de realizar esta sujección es muy distinta según los fabricantes, siendo los sistemas más empleados: roscado, acoplamiento cónico, tornillos o guías radiales y/o axiales, o una combinación de varios de ellos.

- Rodamientos: Aunque antiguamente se utilizaban también cojinetes de bronce, en la actualidad los rodamientos son los elementos mecánicos empleados para conseguir que el husillo gire sin juego alguno y con el mínimo rozamiento. Su misión es mantener el eje en posición exacta durante el trabajo, evitando vibraciones que se reflejan en la superficie de la pieza trabajada en forma de malos acabados superficiales y errores dimensionales y geométricos.

Los rodamientos empleados son de rodillos cónicos y de rodillos cilíndricos con doble hilera de rodillos. En ambos casos se trata de rodamientos de gran precisión, que permiten, además, regular los juegos existentes, tanto en dirección axial como radial.

Sistema de accionamiento: El sistema de accionamiento es el encargado de dar el movimiento de giro al husillo, que, a su vez, lo comunicará a la pieza que se mecaniza.

Se distinguen en él dos partes bien diferenciadas: la caja de velocidades y el motor.

La **caja de velocidades** se encuentra alojada dentro del armazón antes descrito. En su exterior, se encuentran las palancas y demás accionamientos que permiten seleccionar las distintas velocidades a las que puede girar el husillo.

El tipo de mecanismo empleado para conseguir las distintas velocidades puede ser muy variado. Distinguiamos tres soluciones principales:

- * Sistema conopolea: En desuso; formado por un cono de poleas y un tren de engranajes. Resulta engorroso el cambiar la correa de una polea a otra y, además, presenta el problema del deslizamiento de las correas.

- * Caja de trenes de engranajes: Es el sistema más empleado. Mediante el accionamiento de palancas se consigue el desplazamiento de los distintos engranajes para conseguir las distintas velocidades de trabajo. Se puede llegar a tener hasta 36 velocidades distintas.

- * Variadores de velocidad mecánicos: Con los que se consigue una variación de velocidad progresiva, sin escalonamientos. Tienen además la ventaja de poder ser actuados mientras la máquina está en funcionamiento (en los sistemas anteriores hay que parar para cambiar de velocidad).

El **motor** es la fuente de energía de la máquina. Suele utilizarse un motor eléctrico de una potencia determinada, acorde con la máquina y el tipo de trabajo que se va a realizar en ella.

Pueden utilizarse motores eléctricos de los siguientes tipos:

- * Motores de corriente alterna sin regulación, que giran a un número fijo de revoluciones.

- * Motores de corriente alterna con variador de frecuencia.

- * Motores de corriente continua.

En estos dos últimos casos, se puede variar de forma electrónica la velocidad de giro del propio motor, no siendo necesaria la caja de velocidades.

La transmisión de potencia del motor al husillo o caja de velocidades, si la hay, se realiza, bien mediante correas, bien por acoplamiento directo, según el tamaño del motor.

8.1.3 Carro portaherramientas

El carro portaherramientas es el que sujeta la herramienta y le proporciona los movimientos de avance y penetración.

En el torno paralelo, se trata de un sistema de carro cruzado, compuesto por:

- El carro principal, o de bancada, que se desliza sobre las guías de ésta.
- El carro transversal, o de refrentar, que se desplaza sobre el anterior, según la dirección normal al eje de rotación del torno.
- El carro orientable o torreta portaherramientas, apoyado sobre el carro transversal en una plataforma giratoria. Suele estar provisto de un eje sobre el que gira una torreta cuadrada que permite fijar cuatro herramientas a la vez, que se seleccionan con un mecanismo de accionamiento rápido.

Los carros deben moverse sobre sus respectivas guías sin juego alguno. Tanto el principal como el transversal pueden moverse de forma manual o automática (mediante los husillos de cilindros o roscas que acciona el husillo principal). El carro orientable, sin embargo, es siempre de accionamiento manual.

En la parte delantera del carro principal se encuentran los dispositivos (manivelas y palancas) que se utilizan para obtener los movimientos de avance y penetración automáticos y manuales de la herramienta.

El avance manual se realiza mediante los volantes que disponen de un tambor graduado que permite conocer con precisión las distancias recorridas.

El avance automático consigue su movimiento del husillo de cilindros o del husillo de roscas a través de un tornillo sinfín. Dichos husillos, a su vez, obtienen su movimiento del husillo principal, a través de:

- Unos engranajes de transmisión, que forman la llamada lira o guitarra, y que hacen de puente entre el husillo principal y la caja de cambios para avances.
- La caja de cambios para avances, que regula el avance mediante una transmisión por engranajes que se manipula con palancas.

- Un mecanismo inversor que permite invertir el sentido del avance de cilindros o de roscas, mediante un sistema de engranajes desplazables, basculantes o mediante ruedas cónicas.

8.1.4 Contrapunto o cabezal móvil

El contrapunto es un elemento de sujeción que se utiliza para mecanizar piezas largas. Se incluye, sin embargo, entre los componentes principales del torno por ser un accesorio siempre presente que, además, se utiliza en las operaciones de taladrado, roscado y escariado, situando en él la herramienta correspondiente.

Consta de dos piezas de fundición, una de las cuales se desliza sobre las guías de la bancada y la otra puede moverse transversalmente sobre la primera.

En el interior de la segunda pieza se aloja la caña y el contrapunto, que constituye el segundo apoyo de la pieza mecanizada.

Dispone también de un husillo, accionado por un volante, que permite el desplazamiento del contrapunto en sentido longitudinal.

La posición del cabezal móvil sobre la bancada y la de la caña con respecto al cabezal móvil se mantienen fijas, una vez seleccionadas, mediante sus respectivos mecanismos de fijación.

8.1.5 Sistemas auxiliares

Dentro del apartado de sistemas auxiliares que forman parte del torno se consideran los siguientes:

- Sistema de refrigeración: Compuesto por un depósito de fluido de corte, la bomba y las conducciones necesarias para dirigir el fluido a la zona de contacto entre la pieza y la herramienta. El fluido, mezclado con virutas se recoge en una bandeja y, después de ser filtrado, vuelve al depósito.
- Sistema de engrase: Necesario para lubricar los mecanismos y articulaciones de la máquina, de forma que ésta funcione correctamente.
- Elementos de seguridad: Tales como carenados y pantallas protectoras que eviten la proyección de virutas sobre el operario.
- Sistema eléctrico: Necesario para el accionamiento de la máquina.

8.1.6 Útiles de sujeción en el torno

La sujeción de las piezas en el torno debe cumplir dos objetivos:

- Amarrar la pieza para que no se mueva mientras se mecaniza.
- Transmitirle el movimiento giratorio de corte, desde la máquina.

Según sea la forma de la pieza que se va a torneear y la operación que se va a realizar se utilizará uno u otro tipo de sujeción.

El funcionamiento de la mayoría de estos aparatos de sujeción se basa en la fuerza de rozamiento que se produce al apretar contra la pieza las superficies de sujeción. Esta fuerza de rozamiento es la que evita que la fuerza de corte mueva la pieza durante el mecanizado.

Los útiles de sujeción más utilizados son los siguientes:

- Platos centradores de garras.
- Montaje entre puntos con platos y perros de arrastre.
- Montaje entre puntos con arrastradores frontales.
- Lunetas fijas y móviles.
- Pinzas o boquillas expansibles.
- Platos planos con útiles especiales.

8.1.6.1 Platos de garras

Para sujetar piezas cortas se emplean normalmente platos centradores con dos, tres o cuatro garras, que se encuentran unidos al husillo principal, generalmente por roscado. Este sistema de sujeción permite realizar mecanizados exteriores (salvando la zona de amarre de las garras si el avance es exterior) e interiores.

El más utilizado es el plato de tres garras o plato universal, en el que las garras se aprietan simultáneamente, de tal manera que centran la pieza automáticamente.

El sistema de accionamiento del cierre y apertura de las garras puede ser:

- Mecánico, mediante una rosca plana o por cremalleras cuneiformes.
- Neumático o hidráulico, que facilita el cambio de piezas en series grandes y trabajos de poca duración.

En el plato de cuatro garras, éstas son de accionamiento independiente, de tal manera que permite la sujección de piezas que no sean de revolución, pero con el inconveniente de que hay que centrar la pieza debidamente antes de mecanizar.

En cualquiera de los dos tipos de platos descritos, es necesario intercalar un material blando entre las garras y la pieza cuando ésta se sujeta por superficies ya mecanizadas, con el objeto de no dañarlas.

8.1.6.2 Montaje entre puntos

Este sistema de sujección se utiliza para mecanizar piezas relativamente largas que sólo requieren operaciones exteriores (como es el caso del mecanizado de ejes).

La pieza se monta apoyándola entre el punto del husillo y el contrapunto del cabezal móvil, que deben estar perfectamente alineados.

Previamente, habrá que realizar a ambos extremos de la pieza los "huecos" en los que se alojan ambos puntos. Dicha operación se realiza con una herramienta especial denominada broca de centrar o broca de puntear.

La pieza cogida entre puntos dejará de girar en cuanto la herramienta incida sobre ella; habrá que comunicar, por tanto, el movimiento de rotación del husillo mediante algún mecanismo complementario. Los más utilizados son:

- platos y perros de arrastre,
- arrastradores frontales.

Los platos y perros de arrastre obligan a la pieza a girar con la velocidad determinada para el trabajo que se va a realizar.

Los arrastradores frontales están provistos de unas uñetas que se clavan en la pieza, y es a través de estas uñetas de arrastre con las que se comunica a la pieza el movimiento de giro.

Los arrastradores llevan incorporados el propio punto y se montan en el husillo mediante un cono Morse o por montaje con pestaña.

Lo más importante en este tipo de sujección es darle al montaje la fuerza axial suficiente para conseguir la sujección correcta. Para ello, el contrapunto utilizado suele disponer de un indicador de fuerza axial y de un sistema de ajuste para la misma.

8.1.6.3 Lunetas

Cuando se tornean piezas muy largas en relación a su diámetro, tanto con sujeción por plato de garras como entre puntos, se pueden producir flexiones por su peso o por la fuerza derivada del proceso de corte. El resultado obtenido son diámetros irregulares y acabados superficiales defectuosos, debido a las vibraciones.

En este caso, se utilizan unos elementos de sujeción llamados lunetas que sirven de apoyo a la pieza y evitan su flexión.

Existen dos tipos de lunetas:

- La luneta fija, que se monta sobre la bancada del torno, apoyada en las guías. Su fin principal es sostener la pieza.
- La luneta móvil o corredera, montada sobre el carro principal y que acompaña a la herramienta en su movimiento (va delante de ella en el sentido del avance). Su misión fundamental es contrarrestar las fuerzas de corte.

8.1.6.4 Pinzas o boquillas

Las pinzas son casquillos rasgados longitudinalmente en parte y de forma exterior ligeramente cónica, con un diámetro interior algo mayor que el de la pieza que se va a mecanizar.

La pieza se introduce en el interior de la pinza y ésta en un mandril provisto de un alojamiento interior cónico y de una rosca exterior. Al apretar con una tuerca se comprime la pinza y la pieza queda fuertemente sujeta por ella. Este sistema tiene el inconveniente de que se necesita una pinza de sujeción para cada diámetro de pieza.

Este mismo sistema se utiliza para amarrar grandes piezas de revolución, utilizando platos de sujeción rasgados con escalonamiento exterior o interior.

8.1.6.5 Platos lisos y útiles especiales

Para el torneado de piezas irregulares (tal es el caso de piezas previamente fundidas o estampadas) que no se pueden sujetar adecuadamente en un plato de garras es preciso emplear montajes especiales en platos planos.

El plato plano o plato liso lleva una serie de taladros que se utilizan para realizar la fijación de la pieza o del útil especial de sujeción.

Estos montajes pueden realizarse de múltiples formas, utilizando tornillos, escuadras, e incluso complejos utilajes con sistemas de amarre con accionamiento neumático o hidráulico.

En estos casos es siempre necesario equilibrar el conjunto con un contrapeso para que el giro se realice de la forma más suave posible, sin golpes alternativos.

8.2 Clases de tornos

El torno paralelo o torno universal que se ha descrito en los apartados anteriores es el más utilizado en la mayoría de los talleres o, más bien, ha sido el más utilizado, pues actualmente el puesto de privilegio lo empiezan a ocupar los tornos de control numérico (CN).

Existen, además, otros tipos de tornos derivados del torno paralelo que se han diseñado para realizar determinados trabajos especiales. Es el caso del torno al aire y del torno vertical.

Por otro lado, para alcanzar la alta productividad requerida en algunos casos se construyen tornos semiautomáticos (el tornos copiator y el torno revólver) y tornos automáticos accionados por levas que fabrican las piezas de forma automática.

Este último grupo, sin embargo, ha sido desplazado actualmente por los tornos de control numérico, que sustituyen los complejos automatismos mecánicos de los tornos copiator, revólver y de levas por un sistema de control electrónico que gobierna el funcionamiento según las instrucciones codificadas en un fichero informático. En este apartado se van a describir las características constructivas y funcionales de los tipos que se acaban de mencionar.

8.2.1 Torno al aire

Este tipo de torno, también denominado torno frontal, es una adaptación constructiva del torno paralelo, especialmente diseñado para tornear piezas de gran diámetro y poca longitud.

Se componen de una bancada muy baja, a ras del suelo y que, a veces, está dispuesta perpendicular al eje del torno; un cabezal alto con un plato de grandes dimensiones; y un carro portaherramientas también sobredimensionado con respecto al torno paralelo.

Es un torno que ha caído en desuso, sustituido por el torno vertical, pues plantea el problema de los grandes esfuerzos a flexión que debe soportar el husillo debido al peso del plato y de la pieza.

8.2.2 Torno vertical

Son tornos paralelos "puestos de pie", de tal forma que el eje del plato de fijación de la pieza es vertical.

Se utilizan para el mecanizado de piezas de gran diámetro, poca longitud y peso considerable, en una estructura mucho más rígida que en el caso del torno al aire.

Sus características constructivas son completamente distintas a las del torno paralelo, distinguiéndose las siguientes partes principales:

- La base: Bloque de fundición en el que se alojan los mecanismos del accionamiento principal y el eje vertical que soporta el plato. En algunos tornos, la base se desliza sobre unas guías para variar el diámetro del torneado.

- El montante o montantes: Según sea la construcción del torno. Es el equivalente a la bancada de los tornos paralelos y tiene forma de columna única en los tornos de un solo montante, y de dos columnas unidas por un puente en el caso del torno de dos montantes.

- El puente móvil, portacarros o travesaño: Carro que se mueve verticalmente sobre las guías del montante y que puede fijarse en una posición determinada.

- El carro portaherramientas: Carro dotado de movimiento horizontal y vertical provisto de la torreta portaherramientas. Los tornos de dos montantes pueden llevar dos carros portaherramientas.

Por lo demás, el funcionamiento del torno vertical es muy similar al del torno paralelo, tanto en lo que a la selección de la velocidad de giro del plato se refiere como a la cadena cinemática que proporciona el movimiento de avance automático.

Una última particularidad a destacar es la incorporación en este tipo de máquinas de accesorios especiales para realizar operaciones que no son propias de un torno, tales como dispositivos de rectificado, taladrado y fresado. El objeto de la incorporación de estos accesorios es evitar el trasiego de la pieza a otra máquina para realizar, en muchos casos, pequeñas operaciones complementarias.

8.2.3 Torno revólver

Se emplea para la fabricación de grandes series de piezas, generalmente de pequeño tamaño. Es un torno semiautomático que realiza la mayoría de las operaciones, aunque el operario deba intervenir en el resto.

Su principal característica es que están provistos de una torre portaherramientas giratoria (revólver), montada sobre un carro posterior que se coloca en el lugar del cabezal móvil.

Para disminuir los tiempos de maniobra y automatizar el trabajo lo máximo posible suelen disponer de herramientas especiales que combinan varias herramientas sencillas y que, en un solo movimiento realizan varias operaciones a la vez (taladrado y cilindrado, por ejemplo).

Las principales diferencias con el torno paralelo son:

- El cabezal está reforzado, para aguantar el trabajo simultáneo de varias herramientas.
- El husillo es hueco, para permitir la alimentación con barra continua, que es sujeta mediante una pinza accionada por palanca.
- El carro principal se sustituye por un carro auxiliar con dos portaherramientas, uno a cada lado de la pieza.
- El carro revólver, que se acciona con un volante de brazos. El carro dispone de unos topes regulables para cada herramienta e incorpora un dispositivo que le hace girar en el retroceso, para utilizar la siguiente herramienta.
- El carro tronizador, como auxiliar utilizado exclusivamente para tronzar la pieza una vez mecanizada. Se acciona mediante palanca.

8.2.4 Torno copiadore

Se utiliza para la fabricación de piezas de geometría complicada, a partir de una pieza patrón o plantilla.

Dispone, para ello, de un dispositivo copiadore que desplaza la herramienta automáticamente según el perfil que recorre un palpador sobre la pieza patrón o plantilla. Los sistemas empleados en el dispositivo copiadore son muy variados; entre ellos, se pueden citar:

- Copiado con mando por tensión elástica en el que el palpador está unido al portaherramientas y es presionado contra la plantilla mediante un resorte.
- Copiado con mando por transmisión eléctrica, en el que el palpador es un interruptor que hace girar a un motor eléctrico que mueve la herramienta en un sentido u otro.

- Copiado con mando hidráulico, en el que el palpador acciona una válvula que gobierna un cilindro hidráulico que mueve la herramienta.
- Copiado por mando electrónico-hidráulico, en el que el palpador está unido a un amplificador electrónico que gobierna una electroválvula hidráulica que, a su vez, manipula el cilindro hidráulico que mueve la herramienta.

Este tipo de tornos ha sido muy utilizado hasta hace algunos años, ya que cubría el enorme hueco existente entre el torno paralelo, de aplicación en pequeñas series y producción unitaria, y los tornos automáticos empleados en grandes series. Solucionaba, además, los problemas de generación de geometrías complicadas.

Actualmente, con la aparición del torno de control numérico ha caído totalmente en desuso.

8.2.5 Torno automático de levas

Se utilizan para la fabricación de grandes series, especialmente de tornillería y pequeñas piezas mecánicas en general.

Son máquinas tremendamente complicadas que requieren grandes tiempos de preparación para ajustar la precisión de las piezas obtenidas y la rentabilidad de la serie.

El automatismo es de tipo mecánico, gobernado por levas que se montan sobre un árbol portalevas que gira lentamente (una vuelta completa por pieza mecanizada).

Las levas son las encargadas de comunicar el movimiento de penetración y avance (si lo hay) a las herramientas.

Existen dos tipos básicos de tornos de levas:

- De cabezal fijo, en el que las herramientas se sitúan sobre un carro que realiza el avance.
- De cabezal deslizante, en el que las herramientas sólo tienen movimiento radial; el movimiento de avance lo realiza el cabezal, gobernado también por una leva.

Existen también tornos automáticos de varios husillos en los que se mecanizan varias piezas a la vez, realizándose una operación distinta en cada una. El cabezal va girando y colocando las piezas delante de una herramienta diferente, que efectúa siempre la misma operación.

8.2.6 Torno de control numérico (CN)

Las máquinas de control numérico (CN) están dotadas de un sistema electrónico de control que gobierna el funcionamiento completo de la máquina, incluyendo:

- trayectoria de las herramientas,
- magnitudes de corte (velocidad y avance),
- cambios de herramientas,
- otras operaciones auxiliares (accionamiento del sistema de refrigeración, por ejemplo).

Las instrucciones que se le dan al control van codificadas en un programa o secuencia de funciones y coordenadas (X y Z en el caso del torno).

De esta forma, se consigue que la máquina realice su trabajo automáticamente, aumentando y flexibilizando la productividad y mejorando la calidad de las piezas obtenidas.

En principio, cualquier máquina convencional puede ser adaptada para incorporarle un sistema de control, aunque en la actualidad, se diseñan específicamente para ello.

En el caso particular del torno, las diferencias más significativas entre un torno paralelo y torno CN son las siguientes:

- El sistema de control.
- La necesidad de incorporar motores a los husillos que mueven los carros de la máquina.
- La existencia de captadores de posición para realimentar el control.
- Una bancada más robusta, para soportar las exigentes condiciones de trabajo sin perder precisión.
- La torreta portaherramientas suele pasar a posición vertical y está provista de un gran número de ellas (12, por regla general) y de un sistema de giro automático, para seleccionarlas según se necesiten.
- Regulación continua de la velocidad de giro del husillo y de avance de la torreta.
- Incorporación de un carenado y sistemas de protección que aíslan la zona de trabajo del exterior, al no ser necesaria la intervención del operario.

En este tipo de tornos, la labor del operario se limita a colocar la pieza en el plato (de accionamiento hidráulico), apretar el interruptor de puesta en marcha de la máquina y esperar a que termine la primera fase de torneado para darle la vuelta y ejecutar otro programa.

La aplicación del control numérico no se limita a los tornos paralelos; existen también tornos verticales de control numérico.

Por último, comentar la gran especialización que se está dando en los tornos CN, siempre con vistas a aumentar la productividad. Encontramos, de esta forma, máquinas que incluso incorporan características propias de otro tipo de máquinas y que permiten realizar, por ejemplo, trabajos de fresado.

Entre la gran cantidad de alternativas existentes, se pueden citar:

- Tornos con control de giro de plato (eje C) y herramientas motorizadas para realizar taladros, chaveteros, ejes nervados, ...

- Tornos con dos torretas de herramientas que trabajan simultáneamente la misma pieza.

-
- Tornos con dos husillos (el segundo ocupando la posición del cabezal móvil) que permiten acabar la pieza sin que el operario tenga que intervenir para darle la vuelta.
 - Tornos con dos husillos y dos torretas, para mecanizar las dos fases a la vez.
 - Tornos que incorporan un eje Y que permite realizar complejas operaciones de fresado con las herramientas motorizadas.
 - Tornos con eje Y y almacén de herramientas de fresado, ...

8.3 Trabajos en el torno

8.3.1 Torneado exterior e interior

Una vez analizados los mecanismos que forman parte del torno y los movimientos que producen, vamos a analizar las superficies que se pueden generar y la denominación que reciben las operaciones que las generan.

Antes de definir estas operaciones es necesario hacer una primera distinción entre:

- Torneado exterior, que incluye todas las operaciones que se realizan sobre el exterior de la pieza.
- Torneado interior, relativo a las operaciones efectuadas en el interior de la pieza.

Las operaciones que se describen en este capítulo son, en su mayoría, aplicables a ambos tipos de torneado.

La única particularidad es que en el torneado interior hay que tener en cuenta el riesgo de vibraciones y la flexión de la herramienta, debido a las fuerzas de corte tangenciales y radiales. Este problema se analizará en profundidad al estudiar el cilindrado interior o mandrinado.

8.3.2 Refrentado

Con la operación de refrentado se mecanizan planos perpendiculares al eje del husillo, moviendo la herramienta con el carro transversal.

El refrentado puede ser tanto exterior como interior y se realiza prácticamente en todas las piezas que se tornean.

El refrentado puede realizarse en la totalidad de montajes analizados en el capítulo anterior: plato de garras, pinzas, entre puntos, etc. En este último caso se utiliza un punto seccionado o medio punto.

El refrentado puede hacerse de dos formas, según sea el sentido de avance de la herramienta:

- De fuera hacia dentro, que suele utilizarse en operaciones de desbaste.
- De dentro hacia fuera, más utilizado en operaciones de acabado.

Otra particularidad del refrentado es que el diámetro varía constantemente, de tal manera que si la velocidad de giro del husillo es constante, la velocidad de corte aumentará o disminuirá según sea la forma en que se realiza el refrentado.

El refrentado ideal es aquel que se efectúa a velocidad de corte constante, pero para ello es necesario disponer de una máquina con control continuo de velocidad de giro del husillo.

8.3.3 Cilindrado y mandrinado

El cilindrado es la operación con la que se obtienen superficies cilíndricas rectas al avanzar la herramienta en sentido paralelo al eje del husillo.

Al igual que el refrentado, es una operación que se realiza en casi todas las piezas que se tornean y se puede llevar a cabo con cualquier método de sujeción empleado.

El cilindrado puede ser también exterior e interior. Este último, recibe el nombre específico de mandrinado y tiene unas particularidades que se analizan a continuación.

En primer lugar, las fuerzas de corte tangenciales y radiales que se producen provocan una flexión de la herramienta, flexión que será mayor según sea la magnitud de esta fuerza (sección de viruta), el voladizo de la herramienta y su sujeción.

Esto se agrava si consideramos, además, que la sección del mango de la herramienta de mandrinar no puede ser tan robusta como queramos, pues está limitado por el diámetro interior que se va a tornean en la pieza.

La forma de solucionar este problema es utilizar unas herramientas con geometría específica y unos mangos o barras de mandrinar antivibratorias que serán analizadas en el capítulo siguiente.

8.3.4 Torneado cónico

Para generar un cono en el torno hay que desplazar la herramienta en una dirección paralela a la generatriz del cono. Esto se consigue de varias formas (muestra algunos de estos procedimientos):

- Inclinando el carro portaherramientas, que es orientable, aunque de accionamiento manual y poco recorrido.
- Desplazando la herramienta con un sistema copiador que utiliza una plantilla cuya inclinación es regulable.
- Por movimiento automático y simultáneo del carro longitudinal y transversal, que es el método empleado en los tornos de control numérico.
- Utilizando una herramienta inclinada, si el cono es corto, de dimensiones inferiores al filo.
- Desplazando el contrapunto, de tal forma que la generatriz del cono queda paralela al eje del husillo principal. Tiene sus limitaciones, pues el contrapunto se desplaza muy poco lateralmente.
- Con un escariado cónico colocado en el contrapunto, para el caso de acabado de conos interiores de pequeño diámetro.

8.3.5 Torneado excéntrico

Es un caso particular del cilindrado, mediante la cual se obtienen cilindros de distintos ejes de giro en una misma pieza. El tipo de sujeción y el procedimiento empleados para fabricar la pieza depende de la excentricidad y de los diámetros a tornear. Entre estos procedimientos están:

- Entre puntos, utilizando dos puntos de centrado. Se utiliza cuando la excentricidad no es muy grande y los centros caen dentro de las bases de la pieza.
- Entre puntos con útiles especiales, cuando la excentricidad es grande. Hay que utilizar contrapesos para evitar las vibraciones que produce el desequilibrio de masas.
- Con plato universal de cuatro garras independientes, que implica una laboriosa puesta a punto.

-
- Con plato universal de tres garras con un suplemento que provoca el descentramiento.
 - En plato plano, utilizado sobre todo para el caso de excéntricas interiores.
 - Torneado con eje-mandril con puntos excéntricos.
 - Torneado con útiles especiales.

8.3.6 Torneado de formas o copiado

Con esta operación se consiguen redondeamientos y otras formas, curvas en general, en las piezas torneadas, utilizando los siguientes procedimientos:

- Accionando simultáneamente el carro longitudinal y el transversal. Esta operación sólo puede realizarse en los tornos de control numérico; manualmente no se pueden realizar formas con precisión.
- Utilizando un aparato copiator que se apoya en una plantilla o pieza patrón. Por este motivo, al torneado de formas también se le denomina copiado.
- Empleando herramientas de forma. Este procedimiento se realiza, fundamentalmente, en el torneado de pequeñas piezas; sobre todo, en tornos automáticos y semiautomáticos (revólver).

8.3.7 Roscado

En el torno se pueden realizar roscas utilizando distintos procedimientos:

- Con macho de roscar, utilizado para mecanizar roscas interiores pequeñas. La pieza ha de girar a la mínima velocidad, y el avance del macho se produce de forma automática al iniciarse la rosca, evitando que el macho gire (para ello, se coloca un portamachos o portabrocas).
- Con terraja, para mecanizar roscas exteriores pequeñas. El procedimiento es idéntico al anterior.
- Con cabezal de peines, cuyos peines se abren al finalizar el roscado.
- Con rodillos de laminación. Este procedimiento tiene la ventaja de que no hay desprendimiento de viruta y, sobre todo, de que las fibras del material adoptan la forma de la rosca.

- Roscado con cuchilla, cuyo perfil se corresponde con el perfil de la rosca. Se diferencia de todos los anteriores en que hay que realizarlo en varias pasadas. La sincronización entre el husillo principal que hace girar la pieza y el movimiento de la herramienta se consigue utilizando el husillo de roscar.

Roscado con cuchilla

Selección del tipo de penetración:

Existen tres tipos diferentes de penetración: radial, de flanco e incremental. Se elige el más adecuado en función del torno, el material de la pieza y el paso de la rosca.

- * El más utilizado es la penetración radial, entre otras razones, porque es el único posible en muchos tornos. Proporciona una formación de viruta suave y un desgaste uniforme de la plaquita. Es aconsejable para pasos finos; con grandes pasos hay riesgo de vibraciones y un deficiente control de viruta. Se debe utilizar también con materiales que se endurecen al ser mecanizados, como es el caso del acero inoxidable austenítico.
- * La penetración por flanco proporciona un mejor control de viruta, al arrastrarla hacia un lado. Es adecuado para roscas de grandes pasos y para el roscado de interiores, pues en ambos casos se producen problemas de evacuación de virutas y vibraciones. Para evitar un mal acabado superficial o un desgaste excesivo del flanco, debido al rozamiento del filo posterior, el ángulo de avance debe ser 3 a 5 grados más pequeño que el ángulo de rosca.
- * La penetración incremental se utiliza para grandes perfiles. Proporciona un desgaste uniforme de la plaquita y una mayor duración de la herramienta, aunque sólo se puede conseguir en tornos de control numérico.

Selección del número de pasadas y profundidad de cada una de ellas:

La tabla siguiente da unos valores orientativos para el mecanizado de roscas métricas interiores y exteriores en acero, con penetración radial.

ISO métrica, exterior

Nº de penetraciones	Paso mm	← Reducir la velocidad de corte														
		0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
		Penetración radial por pasada, mm														
1		0,11	0,17	0,19	0,20	0,22	0,22	0,25	0,27	0,28	0,34	0,34	0,37	0,41	0,43	0,46
2		0,09	0,15	0,16	0,17	0,21	0,21	0,24	0,24	0,26	0,31	0,32	0,34	0,39	0,40	0,43
3		0,07	0,11	0,13	0,14	0,17	0,17	0,18	0,20	0,21	0,25	0,25	0,28	0,32	0,32	0,35
4		0,07	0,07	0,11	0,11	0,14	0,14	0,16	0,17	0,18	0,21	0,22	0,24	0,27	0,27	0,30
5		0,34	0,50	0,08	0,10	0,12	0,12	0,14	0,15	0,16	0,18	0,19	0,22	0,24	0,24	0,27
6				0,67	0,08	0,08	0,10	0,12	0,13	0,14	0,17	0,17	0,20	0,22	0,22	0,24
7					0,80	0,94	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,16	0,18	0,20	0,20	0,22
8							0,08	0,08	0,11	0,12	0,14	0,15	0,17	0,19	0,19	0,21
9							1,14	1,28	0,11	0,12	0,14	0,14	0,16	0,18	0,18	0,20
10									0,08	0,11	0,12	0,13	0,15	0,17	0,17	0,19
11									1,58	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,16	0,18
12										0,08	0,08	0,12	0,13	0,15	0,15	0,16
13										1,89	2,20	0,11	0,12	0,12	0,13	0,15
14												0,08	0,10	0,10	0,13	0,14
15												2,50	2,80	3,12	0,12	0,12
16															0,10	0,10
															3,41	3,72

Tabla 1. Valores de penetración en roscado. L. N. López, Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque, 2004.

8.3.8 Tronzado y ranurado

El tronzado es la operación utilizada para separar la pieza ya mecanizada de la barra de materia prima. Se consigue desplazando la herramienta con el carro transversal, hasta llegar al eje de giro. Se trata de una operación delicada en la que se utilizan herramientas de poco espesor y gran longitud, que se rompen con facilidad. En general sólo se utiliza al finalizar el torneado de piezas en las que el material de partida se encuentra en forma de barra.

El ranurado es un proceso similar, con la salvedad de que no se llega a cortar la pieza. Ofrece, además, la posibilidad de realizar diferentes tipos de ranuras según se analiza a continuación. Se distinguen los siguientes tipos de ranurado:

- Ranurado radial, en el que la herramienta penetra perpendicular al eje del husillo. De esta forma, se mecanizan, entre otros: alojamientos de juntas, salidas de rosca y de muelas (para la operación de rectificado), canales para correas, etc.
- Ranurado frontal, con penetración de la herramienta en sentido axial, paralelo al eje del husillo. Se utiliza para mecanizar guías en "T" y colas de milano, por ejemplo. La herramienta debe ajustar su geometría al diámetro de la ranura.

- Ranurado oblicuo, la penetración se realiza accionando simultáneamente el carro principal y el transversal, o inclinando el carro portaherramientas. La aplicación más común es el mecanizado de salidas de muela.

8.3.9 Moleteado

El objeto del moleteado es obtener una superficie rugosa en la que no se resbale la mano al agarrar y girar la pieza. Para su realización se utilizan unas ruedas estriadas de acero llamadas moletas que se colocan en un mango sujeto al carro portaherramientas y se aprietan contra la pieza.

Según sea la disposición de las estrías, el moleteado puede ser paralelo, en cruz o diagonal aunque también existen otros tipos menos utilizados.

8.3.10 Taladrado y escariado

Las operaciones de taladrado y escariado pueden realizarse en una gran variedad de máquinas-herramienta: tornos, fresadoras, taladradoras, punteadoras, etc.

En el torno se llevan a cabo haciendo girar la pieza y desplazando la herramienta (broca o escariador) que no gira. Estas operaciones sólo pueden realizarse en el torno paralelo si el eje del taladro coincide con el de giro de la pieza.

La herramienta puede colocarse tanto en el contrapunto como en la torreta, utilizando un portabrocas o acoplado directamente su cono Morse, si lo tiene.

El escariado es una operación complementaria del taladrado, cuyo objetivo es obtener agujeros de precisión dimensional y muy buen acabado superficial. Se realiza utilizando una herramienta denominada escariador.

8.4 Tipos de herramientas

Las herramientas específicas de torneado pueden ser de tres formas, atendiendo a su forma de construcción:

- enterizas,
- con plaquita soldada,
- con plaquita intercambiable.

Las enterizas son siempre de acero rápido (HSS) y se fabrican partiendo de una barra cuadrada o redonda que se afila hasta obtener la geometría deseada en la herramienta.

Las herramientas con plaquita soldada están formadas por un mango al que se suelda una plaquita de metal duro.

Por último, las más utilizadas son las herramientas de plaquitas intercambiables, en las que la plaquita se sujeta al mango mediante un elemento mecánico: brida, tornillo o cuña.

8.4.1 Geometría del filo

Además de los ángulos que definen la geometría del filo (ángulo de incidencia, α , ángulo de filo, β , y ángulo de desprendimiento, γ) y sus superficies asociadas, ya estudiados anteriormente. En una herramienta de torno, en la que el corte no es ortogonal, existen otras superficies, aristas y ángulos.

La zona de corte de una herramienta de torneado está constituida por dos filos (aristas de corte) que intersectan en la punta de la herramienta (ver figura).

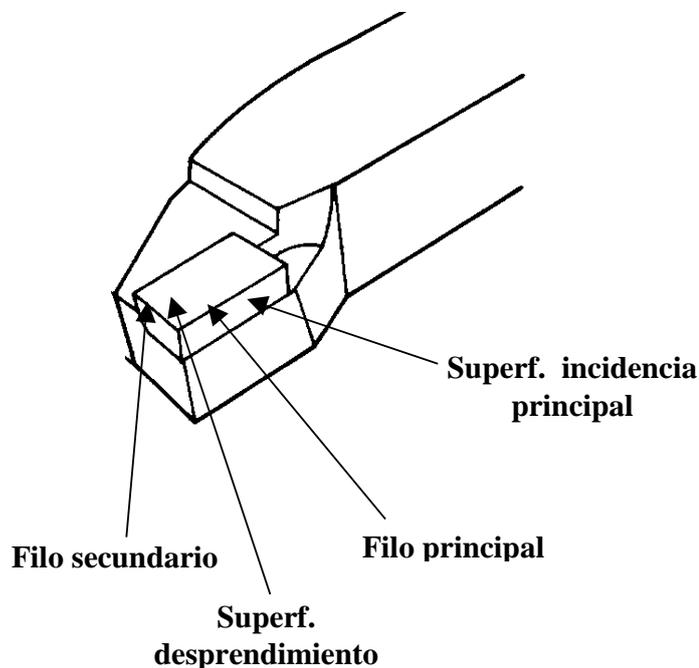


Fig. 8.2. Filos de una herramienta de torneado. Elaboración propia

Durante una operación de torneado la sección de viruta afectará siempre a ambos filos, pero generalmente actuará sobre una mayor longitud de uno ellos que se

-
- Superficie de desprendimiento: Es la superficie de la herramienta sobre la cual resbala la viruta. También se llama plano de salida o plano de ataque.
 - Superficie principal de incidencia: Es la superficie de la herramienta que da la cara a la superficie de corte. También se llama plano libre del filo.
 - Superficie secundaria de incidencia: Es la superficie de la herramienta que da la cara a la superficie de trabajo. También se llama plano libre del contrafilo.
 - Arista de corte principal: Es la arista de corte que está en dirección del avance; es la que engendra la superficie de corte. También se puede decir que es la arista formada por las superficies de desprendimiento y principal de incidencia.
 - Arista de corte secundaria o contrafilo: Es la arista de corte que genera la superficie de trabajo. También es la arista formada por las superficies de desprendimiento y secundaria de incidencia.
 - Angulo de la punta (E): Es el formado por las aristas de corte principal y secundaria.
 - Eje de la herramienta: Es el eje de simetría del mango de la herramienta.
 - Angulo de posición (G): Es el formado por la arista de corte y el eje de la herramienta.

8.4.1.1 Influencia del ángulo de posición de la herramienta

El ángulo de posición de la herramienta (G) influye en el ancho de la viruta, pero puede modificarse esta influencia si se coloca la herramienta en otra postura (ángulo X). El ángulo de posición afecta también a las fuerzas de corte. Este efecto se analizará al estudiar las herramientas de mandrinado.

8.4.2 Herramientas enterizas

El uso de las herramientas enterizas ha descendido enormemente con la aparición de las plaquitas intercambiables. Sin embargo, se siguen utilizando en aplicaciones donde las velocidades de corte o los perfiles del filo no son adecuados para las herramientas de metal duro. Una de sus aplicaciones más extendidas son las herramientas de forma en tornos automáticos.

La geometría de corte que se le da a la herramienta viene determinada por el tipo de máquina y el material de la pieza a trabajar, utilizando siempre, por regla general, ángulos positivos.

La tabla de la figura 8.4, ofrece unas recomendaciones orientativas que se modificarán según las condiciones de mecanizado. Con avances elevados, por ejemplo, los ángulos de incidencia (α) y desprendimiento (γ) deben reducirse para obtener un filo de corte (β) más robusto.

Material	Dureza HB	α	γ	β
Acero	< 175	8	15	67
Acero	175 – 250	8	8	74
Acero	> 250	6	0	84
Acero inoxidable		8	15	67
Fundición	< 250	8	8	74
Fundición	> 250	6	0	84
Latón		10	10	70
Bronce		8	10	72
Cobre		10	30	50
Aluminio		10	35	45

Fig. 8.4. Geometría recomendada en herramientas enterizas de acero rápido. Elaboración propia

Para mecanizar materiales de viruta larga se puede rectificar un rompevirutas, para obtener una mejor rotura de viruta, pero sin que sea demasiado pronunciado, para no producir atascos de viruta.

8.4.2.1 Tipos de herramientas enterizas

Cada trabajo de torno de los analizados exige una herramienta apropiada. Las herramientas más utilizadas (todas ellas normalizadas) son:

- Herramientas rectas y curvas: Utilizadas para desbastar, por su construcción robusta. Según la posición de corte principal se distingue entre herramientas con corte a la derecha o a la izquierda (con el filo principal a la derecha o a la izquierda, cuando se las mira de frente y con la cara del corte hacia arriba). Las normas que las definen son:
 - * cuchillas rectas para exteriores: DIN 4951.
 - * cuchillas curvas para exteriores: DIN 4952.
 - * cuchillas para torneados interiores: DIN 4953.
- Herramientas de punta: Para acabados, tanto exteriores (DIN 4955) como interiores (DIN 4954).
- Herramientas anchas: También utilizadas en operaciones de acabados (DIN 4956).
- Herramientas de corte lateral: Para refrentado y torneado de esquinas en ángulo, normalizadas según DIN 4960 y DIN 4965.
- Herramientas de forma: Para trabajos diversos: tronzado (DIN 4961), ranurado, roscado, etc.

8.4.3 Herramientas con plaquitas soldadas

Las formas constructivas se encuentran también normalizadas según normas DIN e ISO.

- a) Herramienta de cilindros (ISO 1, 2 y 6).
- b) Herramienta de punta.
- c) Herramienta acodada a la izquierda.
- d) Herramienta acodada a la derecha (ISO 3).
- e) Herramienta de corte frontal (ISO 5).
- f y g) Herramientas para interiores (ISO 8 y 9).
- h) Herramientas para ranurar (ISO 4 y 7).

Las plaquitas generalmente son de materiales de corte de elevada dureza (metales duros, cerámicas, nitruro de boro o diamante).

La designación de la herramienta se debe realizar según la normativa. Por ejemplo:

ISO 6 - R - 1010 – HW - P10

en donde:

- * ISO 6: es la forma geométrica.
- * R : indica que es de corte a derechas (L para izquierdas).
- * 1010 : son las dimensiones del mango 10 x 10 mm.
- * HW : es la identificación del material de corte.
- * P10 : es la calidad del material de corte.

8.4.4 Normativa ISO de identificación de materiales de corte duros

La norma ISO 513:2004(E) define cómo deben identificarse los materiales de corte duros empleados para las operaciones de mecanizado con geometría de filo definida. Estos materiales de corte duros incluyen a los metales duros (carburos metálicos), cerámicas, nitruro de boro y diamante. Esta normativa es de aplicación a cualquier herramienta de corte con geometría definida de estos materiales (no sólo a las herramientas de plaquita soldada).

Como se ha indicado anteriormente, la designación de estos materiales de corte incluye la identificación del material de corte según las tablas 8.1 a 8.4, seguido de la designación de la calidad del material de corte según su grupo de aplicación.

Herramientas de metal duro (carburos metálicos)	
Id. material de corte	Grupo de material de corte
HW	Metal duro sin recubrimiento, principalmente con carburo de wolframio (WC) con tamaño de grano $\geq 1\mu\text{m}$
HF	Metal duro sin recubrimiento, principalmente con carburo de wolframio (WC) con tamaño de grano $< 1\mu\text{m}$
HT	Metal duro sin recubrimiento, principalmente con TiC, TiN o ambos (también denominados "Cermets")
HC	Metal duro con recubrimiento

Tabla 8.1. Designación metales duros. Elaboración propia

Herramientas cerámicas	
Id. material de corte	Grupo de material de corte
CA	Cerámicas principalmente con Al ₂ O ₃
CM	Cerámicas mixta, Al ₂ O ₃ y otros componentes
CN	Cerámicas de nitruro de silicio (principalmente Si ₃ N ₄)
CR	Cerámicas principalmente con Al ₂ O ₃ , reforzadas
CC	Cerámicas con recubrimiento

Tabla 8.2. Designación cerámicas. Elaboración propia

Herramientas de nitruro de boro	
Id. material de corte	Grupo de material de corte
BL	Nitruro de boro cúbico cristalino (bajo contenido CBN)
BH	Nitruro de boro cúbico cristalino (alto contenido CBN)
BC	Nitruro de boro cúbico cristalino con recubrimiento

Tabla 8.3. Designación nitruro de boro. Elaboración propia

Herramientas de diamante	
Id. material de corte	Grupo de material de corte
DP	Diamante policristalino
DM	Diamante monocristalino

Tabla 8.4. Designación diamante. Elaboración propia

Letra Identif.	Color	Materiales que mecaniza	Calidad mat. de corte	Propiedades del mat. de corte	
P	Azul	Acero: Todo tipo de aceros y aceros fundidos excepto aceros inoxidables	P01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			P10		
			P20		
			P30		
			P40		
			P50		
M	Amarillo	Acero inoxidable	M01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			M10		
			M20		
			M30		
			M40		
K	Rojo	Fundición	K01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			K10		
			K20		
			K30		
			K40		
N	Verde	Metales no ferreos: Aluminio y otros metales no féreos (cobre, latón, bronce)	N01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			N10		
			N20		
			N30		
S	Marrón	Superalcaciones y titanio: Super-alcaciones termorresistentes con base hierro, níquel y cobalto. Alcaciones de titanio.	S01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			S10		
			S20		
			S30		
H	Gris	Material duro: Aceros templados, otros materiales endurecidos.	H01	Tenacidad ↓	Dureza ↑
			H10		
			H20		
			H30		

Fig. 8.5. Calidades de Metal Duro. Elaboración propia

8.4.5 Herramientas con plaquitas intercambiables

Las herramientas con plaquitas intercambiables están formadas por un mango o soporte y la plaquita. Esta ha de estar envuelta por el soporte para que no se mueva durante el mecanizado.

Las formas de realizar la sujeción, los tipos de plaquitas y las clases de mangos, ofrecen una gran variedad de posibilidades que se analizan en los siguientes apartados.

8.4.5.1 Tipos de sujeción

La sujeción de la plaquita al mango se puede realizar de tres formas:

- Utilizando una brida, sistema que permite un fácil cambio de plaquita, pues no es necesario desatornillar del todo.
- Con un tornillo, sistema más compacto que el anterior, pero que tiene el inconveniente de que hay que desatornillar completamente, con el riesgo de perder el tornillo en la operación.
- Con un sistema de palanca, que al atornillar produce este efecto sobre la plaquita. Tiene el inconveniente de introducir tensiones en la plaquita.

Como puede observarse en la figura, en todos los sistemas empleados la plaquita no descansa directamente sobre el mango, sino sobre una placa de apoyo de dimensiones similares a la de la plaquita.

Estos sistemas de sujeción se utilizan para la mayoría de operaciones (cilindrado, refrentado, mandrinado, roscado, etc.). En las operaciones de tronzado y ranurado, aunque también se utilizan estos sistemas, también se emplea el sistema de amarre.

8.4.5.2 Tipos de plaquitas

La variedad de plaquitas existentes en el mercado es enorme, debido a la gran cantidad de factores que las definen, entre los que destacan:

- geometría de corte: ángulos de filo, desprendimiento e incidencia, geometría de rompevirutas, etc. Según el ángulo de desprendimiento efectivo de la plaquita (debido a la geometría de la plaquita y del portaplaquitas), se clasifican en:

- Plaquitas de geometría negativa: ángulo de desprendimiento efectivo menor que cero (adecuadas para torneado exterior y de agujeros grandes)
- Plaquitas de geometría positiva: ángulo de desprendimiento efectivo mayor que cero (adecuadas para operaciones que requieran fuerzas de corte pequeñas: mandrinado, perfilado, torneado de piezas pequeñas,...).
- forma (redondas, cuadradas, triangulares, rómbicas, etc.),
- tamaño,
- dirección del avance,
- calidad del metal duro u otro material empleado (cerámica, nitruro o diamante).

Para el torneado en general se utiliza un sistema de codificación según norma ISO 1832-1985.

8.4.5.3 Tipos de mangos o soportes

Los mangos utilizados en las distintas operaciones de torneado también se codifican según diferentes nomenclaturas. En las figuras de las páginas siguientes se muestran las tablas de codificación de los portaplaquitas empleados para:

- Torneado exterior, según ISO 5608-1989 .
- Barras de mandrinar para torneado interior, según ISO 6261-1984 .
- Herramientas de roscado exterior .
- Barras de mandrinar para roscado interior .

8.5 Determinación de los parámetros de corte

En general, los catálogos de herramientas recomiendan valores de los parámetros de corte adecuados para las distintas herramientas en función del tipo de operación, material de la pieza, etc. Esos parámetros de corte se corresponderán con una vida de herramienta que dicho fabricante estima “razonable”. En función de dichas recomendaciones, las limitaciones de las máquinas-herramienta, análisis

económicos, la experiencia de mecanizados previos, etc., deberán establecerse los parámetros de corte óptimos para dicho proceso.

8.5.1 Selección del radio de punta y avance en operaciones de torneado

El radio de punta y el avance, se determinan según el tipo de operación que se trate: desbaste o acabado. Para operaciones de *desbaste*, se selecciona el mayor radio de punta posible, con el fin de obtener una arista de corte robusta, que permita grandes avances. Sólo en caso de que haya posibilidad de aparición de vibraciones se utilizará un radio pequeño. Los radios utilizados con más frecuencia son de 1,2 y 1,6 mm. Para un desbaste económico, se debe utilizar un avance elevado y una velocidad de corte baja.

Además de las recomendaciones del catálogo de herramientas. Como regla práctica puede elegirse un avance (a) de desbaste igual a la mitad del radio de punta (r_ϵ): $a_{desbaste} = 0,5 r_\epsilon$

En operaciones de *acabado* hay que tener en cuenta que el acabado superficial y las tolerancias dimensionales y geométricas de la pieza se ven afectados por la combinación del radio de punta y el avance, además de la estabilidad de la pieza, la sujeción y las condiciones generales de la máquina.

En las operaciones de acabado deben considerarse las siguientes reglas generales:

- El acabado superficial se mejora a menudo utilizando velocidades de corte mayores y ángulos de desprendimiento neutros o positivos.
- Si hay tendencia a las vibraciones se debe utilizar un radio más pequeño.
- Las calidades sin recubrimiento producen normalmente un acabado superficial mejor que las calidades con recubrimiento.
- La selección del avance (f o a , en mm/rev) en función de la rugosidad máxima (R_{max}) y del radio de la herramienta (r_ϵ en mm) se hace según la fórmula siguiente:

$$R_{max} (\mu m) = \frac{f^2}{8 r_\epsilon} 1000$$

Generalmente, el valor de R_{max} no suele figurar en los planos de fabricación. La calidad superficial se indica mediante:

- el valor de R_a en μm
- el valor de RMS en μm
- la calidad superficial (N6, N8, etc.)

- una codificación de triángulos, actualmente en desuso.

Conocidos los valores de los parámetros de corte (velocidad de corte, avance y profundidad de pasada) estamos en condiciones de poder calcular los tiempos de corte invertidos en las distintas operaciones de torneado.

La expresión general para el cálculo de los tiempos de corte es:

$$t_c = L / v_a = L / (a \cdot n);$$

en donde: L = longitud de mecanizado

V_a = velocidad de avance en mm/min

a = avance en mm/rev

n = régimen de giro (revoluciones por minuto) de la pieza

En los siguientes apartados se aplica dicha expresión general al cálculo del tiempo de corte en distintas operaciones de torneado.

8.5.2 Refrentado

El tiempo de refrentado depende de cómo se realice éste:

1) Refrentado a un número de revoluciones por minuto constante:

El tiempo de refrentado es:
$$T_r = \frac{R}{V_a} = \frac{R}{a n}$$

en donde: R = radio de la pieza a refrentar

V_a = velocidad de avance en mm/min

a = avance en mm/rev

n = régimen de giro (revoluciones por minuto) de la pieza

El valor de n , se calcula a partir de:
$$n = \frac{1000 V_c}{\pi D}$$

en donde: V_c = velocidad de corte en m/min

D = diámetro exterior a refrentar ($D = 2R$)

Sustituyendo, resulta:
$$T_r = \frac{2\pi R^2}{1000 a V_c}$$

Si se refrenta un anillo circular:
$$T_r = \frac{R - r}{a n}$$

2) Refrentado a un número de revoluciones por minuto escalonadas:

Se emplea en tornos manuales en mecanizados en los que es necesario reducir la variación de la velocidad de corte a lo largo del refrentado. Es poco utilizado, pues requiere parar la máquina para cambiar el régimen de giro y porque siempre quedan marcas en la pieza.

El tiempo de refrentado se calcula como la suma de tiempos de refrentado de los sucesivos anillos circulares:

$$T_r = \sum \frac{R_{i_{ext}} - R_{i_{inte}}}{a n_i}$$

3) Refrentado a velocidad de corte constante:

Este método puede utilizarse en tornos de control numérico, manteniendo la velocidad de corte constante y variando las revoluciones del cabezal continuamente. El tiempo de refrentado se calcula a partir de:

$$T_r = \frac{\pi R^2}{1000 a V_c}$$

En el caso de un anillo circular:

$$T_r = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{1000 a V_c}$$

8.5.3 Cilindrado

El tiempo de corte empleado en el cilindrado se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$T_c = \frac{l + c}{a n}$$

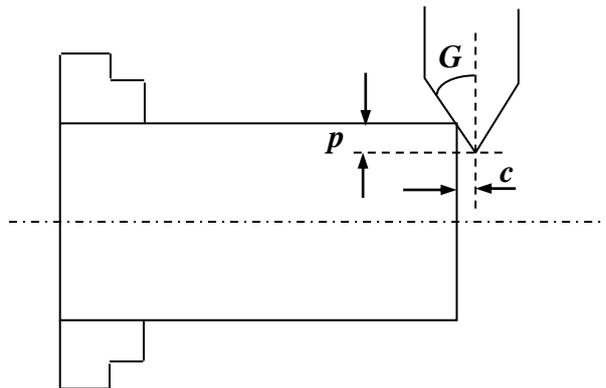
siendo: $c = p \operatorname{tg} G$ y $n = \frac{1000 V_c}{\pi D}$

en donde: l = longitud a tornear en mm

c = entrada de la cuchilla en mm (normalmente se desprecia)

p = profundidad de pasada en mm

G = ángulo de la arista principal de la herramienta



Sustituyendo, resulta: $T_c = \frac{l + p \operatorname{tg} G}{a n}$

8.5.4 Torneado cónico

El tiempo de mecanizado de una superficie cónica se determina considerando las longitudes de las distintas pasadas.

En el caso de velocidad de giro constante es:

$$T_{con} = \frac{\sum L_i}{a n} = \frac{\sum \frac{p i}{\operatorname{sen}(\alpha/2)}}{a n} = \frac{p}{a n \operatorname{sen}(\alpha/2)} \sum i$$

en donde: L_i = longitud de cada pasada

i = número de pasadas

p = profundidad de pasada en mm (constante)

α = ángulo del cono

8.5.5 Roscado

Sustituyendo en la fórmula del cilindrado el avance (a) por el paso (p) de la rosca, resulta:

$$T_{ROS} = \frac{l}{p n}$$

Como el roscado se hace en varias pasadas (N_p) el tiempo total empleado en la operación será:

$$T_{ROS} = \frac{l}{p n} N_p$$

y sustituyendo n por su expresión correspondiente, resulta:

$$T_{ROS} = \frac{\pi D l}{1000 p v_c} N_p$$

en donde: D = diámetro medio de la rosca

9. PROCESO DE FRESADO

9.1 Introducción

Es un proceso de mecanizado en el que se arrancan virutas utilizando una herramienta de forma circular con múltiples filos llamada fresa.

El movimiento principal de corte es circular y lo realiza la fresa al girar sobre su propio eje.

Los movimientos de avance, profundidad y aproximación, los realiza, en principio, la pieza que se mecaniza (ya veremos que existen otras posibilidades).

La primera gran diferencia del proceso de fresado en relación a los ya estudiados (torneado y taladrado) es que los filos de corte no trabajan de forma continua, sino sólo durante una parte del giro completo de la fresa. El resto del tiempo gira en vacío, lo que permite su refrigeración. El trabajo de la herramienta no es, por lo tanto, tan fuerte como el de las herramientas de torno o el de las brocas helicoidales cuyos filos están siempre en contacto con la pieza, arrancando material.

Consecuencia de lo anterior es que la fuerza empleada en el arranque de viruta no es siempre la misma. Puede producirse por ello vibraciones que perjudiquen a la máquina, a la herramienta y a la superficie de trabajo de la pieza.

Mediante fresado pueden obtenerse una gran diversidad de superficies planas o curvas, ranuras, entalladuras, dentados, etc.

En las operaciones de fresado convencionales, que se explicarán más adelante (planeado, ranurado, cajeado, etc.), el mecanizado se realiza mediante el movimiento independiente de uno de los ejes perpendiculares al eje de giro de la herramienta. O bien, mediante el movimiento coordinado de los dos ejes perpendiculares a dicho eje. De esta forma, el mecanizado genera un plano, bien perpendicular al eje de giro de la herramienta, bien paralelo a dicho eje. Una vez finalizado el mecanizado en dicho plano, se efectúa el movimiento correspondiente al 3^{er} grado de libertad (dirección del eje de giro de la fresa), que permite acceder a otros planos de trabajo.

En estas condiciones, según sea la disposición del eje de la fresa, se distinguen dos tipos básicos de fresado:

a) El **fresado cilíndrico**, en el que el eje de la fresa es paralelo a la superficie de trabajo de la pieza. El arranque de viruta se realiza fundamentalmente con los filos de la periferia lateral de la herramienta. Las virutas producidas tienen forma de coma.

b) El **fresado frontal**, en el que el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo. Al igual que en el caso anterior, la herramienta corta fundamentalmente con los filos de su periferia. El espesor de las virutas es más uniforme que en el fresado cilíndrico. Por ello, también la carga es más uniforme, obteniéndose superficies más lisas.

Podría añadirse un tercer tipo de fresado correspondiente al **fresado** con desplazamiento relativo herramienta-pieza **en la dirección del eje de giro de la herramienta**. Este tipo de operaciones pertenecen a las operaciones de taladrado más que a las de fresado y exigen que la fresa disponga de filos en su base (fresa con corte frontal). Un caso en el que se realiza este tipo de operación es en la profundización de la herramienta al principio de cada pasada de un cajeado.

Dentro del fresado cilíndrico se distinguen dos tipos de operaciones según sea el movimiento de avance.

a) El **fresado en oposición o contramarcha**, se realiza haciendo avanzar la pieza en sentido contrario al giro de la fresa. Las características de este método son:

- El espesor de la viruta crece al girar la fresa y avanzar la pieza.
- El esfuerzo de corte va creciendo progresivamente.
- Si el avance es muy pequeño y sólo corta un diente a la vez, la resultante de los esfuerzos de corte tiende a levantar la pieza provocando flexiones y vibraciones.
- El rozamiento al iniciar el corte es muy grande, desgastando los dientes más rápidamente.
- La potencia consumida es mayor, debido al rozamiento.
- La superficie mecanizada presenta ondulaciones.

b) El **fresado en concordancia o a favor del avance**, se caracteriza por que la fresadora gira en el mismo sentido que el de avance de la pieza. Las características son:

- Los dientes de la fresa inician el corte de la viruta por su máximo espesor.
- Se necesita mayor esfuerzo de corte que en el caso anterior.
- La fuerza de corte tiende a empujar la pieza contra su apoyo, y si la máquina es suficientemente rígida, hay menos vibraciones.

- No existe rozamiento al iniciar el corte.
- Se pueden emplear mayores avances, mejorando el rendimiento.
- La potencia consumida es menor.
- El acabado superficial es mejor que el obtenido por oposición, al no presentarse ondulaciones.

9.2 Tipos de fresadoras

9.2.1 Fresadora universal horizontal. Componentes.

La fresadora universal horizontal, consta de los siguientes componentes principales:

- Bancada o cuerpo
- Ménsula
- Carro transversal
- Placa giratoria
- Mesa portapiezas
- Husillo principal
- Puente

a) Bancada o cuerpo

La bancada constituye el armazón estructural sobre el que se apoyan y desplazan el resto de componentes de la máquina. Suele ser de fundición y lo suficientemente rígida para soportar los esfuerzos producidos en el mecanizado. Se distinguen las siguientes partes:

1. Base, que se fija al suelo con tornillos.
2. Guías sobre las que desliza la ménsula, debidamente templadas y rectificadas.
3. Alojamiento del husillo principal.
4. Alojamiento de los ejes secundarios de la caja de velocidades.
5. Acceso a la caja de velocidades.
6. Guía para desplazamiento del puente.

b) Ménsula

Es el carro vertical que desliza por medio de unas guías sobre el cuerpo. A su vez, dispone en su parte superior de otras guías perfectamente perpendiculares a las anteriores. En su interior se alojan los mecanismos que producen los avances manuales y automáticos de los distintos carros. Al igual que la bancada suele ser de fundición, con las guías templadas y rectificadas.

La subida o bajada de la ménsula se realiza mediante un husillo, de accionamiento manual o automático. Su bloqueo a una altura determinada se hace con unos tornillos.

Los movimientos automáticos de los distintos carros pueden recibir la potencia necesaria del husillo principal, mediante una cadena cinemática similar a la del torno; o bien, pueden disponer de su propio accionamiento.

c) Carro transversal

El carro transversal se apoya y desliza sobre las guías horizontales de la ménsula. Con él se realizan los movimientos transversales. Sus características constructivas son muy similares a las de la ménsula.

d) Placa giratoria

Encima del carro transversal hay una plataforma que se puede orientar según una circunferencia graduada. En la parte superior de la placa están las guías que sirven de apoyo a la mesa portapiezas.

e) Mesa portapiezas

Se trata de una plataforma rectangular cuya cara superior, perfectamente plana, sirve de apoyo directo a las piezas que se van a mecanizar, o a los útiles que las sujetan (ver tema 9). Para ello, dispone de ranuras en T en las que se introducen las tuercas o tornillos de amarre.

La mesa se desplaza longitudinalmente, por medio de un husillo accionado por una manivela manual o por el mecanismo de avance automático. Se fabrica de fundición estabilizada de alta calidad, y con una rigidez tal que evite deformaciones producidas tanto por el proceso de mecanizado como por los elementos de amarre.

f) Husillo principal

Es el encargado de comunicar el movimiento de giro a la herramienta. Esta se fija a él bien directamente, bien mediante alguno de los sistemas que se estudiarán en temas posteriores.

El husillo principal se aloja en la parte superior del cuerpo de la fresadora, de tal forma que gire suavemente pero sin juego, por lo que la labor de los rodamientos es muy importante.

Al igual que en el caso del torno, el husillo principal debe poder girar a distintas velocidades; para ello, se dispone de una caja de velocidades accionada por el motor principal.

g) Puente

Sirve para dar apoyo al eje portafresas. Se ajusta en la parte superior del cuerpo de la fresadora, formando un todo rígido gracias a los elementos de bloqueo (2).

Las guías (3) sirven para realizar la unión con la bancada y para acoplar la luneta (4) que actúa como segundo apoyo del eje portafresas.

h) Accesorios

La fresadora universal es una máquina muy versátil que permite realizar una gran variedad de trabajos. Más, si se incorporan una serie de accesorios tales como el cabezal vertical o el aparato de mortajar.

- El cabezal vertical es un accesorio que se acopla al eje principal y que convierte a la fresadora horizontal en una vertical. Este cabezal puede ser rígido o bien, permitir el giro según un determinado ángulo.

- El aparato de mortajar es un accesorio muy útil para realizar ranuras interiores, pequeñas entallas y perfiles especiales. El aparato de mortajar convierte el giro del husillo en un movimiento lineal de vaivén.

9.2.2 Fresadora universal vertical de eje orientable.

Las dos diferencias fundamentales con la fresadora horizontal estudiada en el apartado anterior son:

- La mesa portapiezas se coloca directamente sobre el carro transversal, no existiendo placa giratoria.
- El eje principal va en un cabezal que se puede orientar formando cualquier ángulo con respecto a la mesa portapiezas.

El cabezal es lo más característico de estas máquinas, pues el resto de componentes son muy similares a los de las fresadoras horizontales.

Se estudian, a continuación, los tipos de cabezales más empleados: el sistema Huré, el sistema Gambín y el sistema de platinas ortogonales.

a) Cabecal Huré

El cabezal Huré, es un cabezal de gran robustez, cuya orientación se consigue con dos movimientos:

- el de la base o platina vertical (1) sobre el cuerpo de la fresadora (3) alrededor del eje motor (2),
- el de la pieza portahusillo (8) sobre la base (1) en el plano de contacto entre ambas, que forma 45 grados con el eje motor y el eje del husillo respectivamente.

b) Cabecal Gambín

Es un cabezal menos robusto que el anterior, pero más fácil de orientar en la posición deseada, pues los ejes de giro son ortogonales.

El cuerpo principal exterior puede girar y ocupar una inclinación cualquiera, de forma muy similar a la platina vertical del cabezal Huré.

La pieza portahusillo gira, a su vez, en el interior del cuerpo principal. Su fijación en la posición deseada se hace mediante los tornillos.

c) Cabecal de platinas ortogonales

Este tipo de cabezal es también muy utilizado, aunque tiene la desventaja de que, al no disponer del eje portafresas en el mismo plano que el eje del cuerpo principal, pueden presentarse momentos torsores. Su reglaje, sin embargo, es muy sencillo.

9.2.3 Fresadoras especiales.

Los distintos tipos de trabajos que se realizan en los talleres de fabricación exigen la construcción de fresadoras especiales adaptadas a las necesidades de producción. En este apartado se describen las características que diferencian a estas fresadoras especiales de las universales, estudiadas anteriormente.

a) Fresadora de bancada fija

En esta fresadora, la bancada (equivalente a la ménsula de la fresadora universal) es fija, y el carro transversal es mucho mayor, por lo que el campo de trabajo es muy superior al de las fresadoras universales.

Sus principales componentes son:

- La bancada, bloque de fundición con guías horizontales templadas por donde se desplaza el carro transversal.
- El montante, bloque de fundición con guías verticales templadas para el desplazamiento del cabezal, que queda perpendicular a la mesa.
- El cabezal, que contiene el husillo principal y la caja de velocidades.
- El carro transversal, sobre el que se apoya la mesa.

En algunos casos, no existe carro transversal y la mesa descansa directamente sobre la bancada. Es entonces el cabezal el que realiza los movimientos transversales y verticales.

b) Fresadora puente o de pórtico

Es una variante de la anterior, en la que la bancada fija y la mesa son un mismo conjunto. El movimiento longitudinal lo realiza un pórtico o montante, desplazándose sobre unas guías que incorpora la bancada.

Sobre este pórtico o montante, provisto de unas guías verticales se desplaza un puente y sobre éste el o los cabezales, pues es normal en este tipo de máquinas la utilización de dos cabezales verticales.

Existen también versiones con el cabezal o cabezales en disposición horizontal.

Este tipo de máquinas se utiliza para planear piezas grandes, empleando casi exclusivamente platos de cuchillas de grandes dimensiones.

c) Fresadora de utillajes o prototipos

Se trata de una máquina robusta, de pequeño tamaño, manejable y muy precisa que dispone de una gran cantidad de accesorios con los que se pueden realizar trabajos muy complicados, propios de talleres de utillaje, matricería y prototipos. Para ello, dispone de:

- Puente móvil, que realiza el movimiento transversal.
- Mesa escuadra fija y esa inclinable.

- Divisor de sobremesa.
- Plataforma inclinable.
- Cabezal vertical orientable y cabezal de mortajar.
- Mesas de coordenadas.
- Lectores ópticos lineales, para conocer los desplazamientos.

d) Fresadora de torreta

Es una mezcla de fresadora vertical universal y de taladradora radial, pues consta de:

- Una mesa, carro transversal y ménsula, exactamente iguales que los de una fresadora universal, horizontal o vertical.
- Un cabezal vertical, dotado de un variador de velocidad continuo que mueve el husillo, de recorrido vertical muy preciso. Este cabezal es, además, orientable en cualquier posición angular.
- Un brazo que se desliza sobre una mesa giratoria apoyada sobre el cuerpo de la fresadora.

De esta forma, el campo de trabajo es más versátil.

e) Fresadora copiadora

No es más que una fresadora normal, dotada de un sistema copiador que mueve los carros de la máquina según las características geométricas de la plantilla que recorre un palpador.

El sistema de copiado, al igual que se estudió en el tema relativo al torno, puede ser de distinta naturaleza, distinguiéndose entre:

- Fresadora copiadora mecánica, que utiliza un pantógrafo (paralelogramo articulado) como mecanismo de reproducción.
- Fresadora copiadora hidráulica, en la que el palpador es solidario a una válvula distribuidora.
- Fresadora copiadora electrónica, con extensímetros.

Este tipo de máquina, muy utilizado en la fabricación de moldes y matrices, ha caído en desuso con la aparición de las fresadoras de control numérico.

f) Fresadora de control numérico (CN)

En realidad no se trata de un modelo estructuralmente diferente de máquina sino de un sistema de control de las funciones y movimientos de la fresadora.

De esta forma existen fresadoras verticales de control numérico, fresadoras de torreta CN, fresadoras de pórtico CN, etc.

En estas fresadoras, la información necesaria para la ejecución del mecanizado se codifica según un determinado lenguaje que el sistema de control traduce en señales de mando que gobiernan el funcionamiento de los órganos de la máquina.

g) Centro de mecanizado

Los centros de mecanizado son fresadoras CN que incorporan además:

- Sistemas automáticos para el cambio de herramientas.
- Sistemas automáticos para el cambio de piezas (opcional, no disponible en todos los centros de mecanizado).

h) Fresadora de control numérico de 5 ejes

Son máquinas utilizadas en la fabricación de moldes y matrices y otras aplicaciones, tales como prototipos de carrocerías de automóviles.

En ellas, la herramienta puede orientarse según cualquier posición angular y controlarse su movimiento, tanto de desplazamiento lineal como de posicionado angular, mediante un sistema de control. De esta forma, se puede mecanizar, por ejemplo, una superficie compleja, de tal manera que la herramienta siempre sea perpendicular a la superficie, con lo que se obtienen mejores precisiones dimensionales, geométricas y de acabado superficial.

i) Fresadora de alta velocidad

Es una fresadora cuyo diseño y construcción es muy especial, para poder trabajar a elevadas velocidades, tanto del husillo principal (20.000 rpm, por ejemplo) como de los carros (10.000 mm/min).

Se emplean en aplicaciones muy específicas de determinados sectores (aeroespacial, por ejemplo) en los que se mecanizan piezas de poco espesor susceptibles de deformarse durante el mecanizado, ya que al realizarlo a alta velocidad se reducen las deformaciones.

9.3 Características de una fresadora

Las características de una fresadora definen su campo de aplicación. Se suelen agrupar en los siguientes apartados:

- a) Mesa
 - Superficie de la mesa
 - Número y tamaño de las ranuras en "T"
 - Distancia entre ranuras
 - Giro de la mesa
- b) Cursos o recorridos
 - Longitudinal (x)
 - Transversal (y)
 - Vertical (z)
- c) Avances
 - Número de avances
 - Gama de avances longitudinales y transversales
 - Gama de avances verticales
 - Avances rápidos longitudinales y transversales
 - Avance rápido vertical
- d) Husillo principal
 - Alojamiento (tipo de cono)
 - Potencia
 - Número de velocidades
 - Gama de velocidades
- e) Precisiones
 - Posicionamiento
 - Repetibilidad
- f) Pesos y dimensiones
 - Peso neto máquina

- Peso máximo admisible sobre la mesa
- Dimensiones de la máquina

9.4 Sujeción de piezas en la fresadora.

a) Principios generales de sujeción de una pieza.

En todos los procesos de mecanizado uno de los aspectos más importantes es la fijación de la pieza a la máquina.

Las condiciones que debe cumplir la fijación de una pieza para que quede centrada, orientada y fuertemente sujeta son las siguientes:

Inmovilizar la pieza en posición correcta.

- Conservar esta posición durante el mecanizado, a pesar de las fuerzas de corte.
- Prever en el montaje la entrada y salida de la herramienta y la evacuación de la viruta.
- No flexionar ni deformar la pieza con los elementos de sujeción.
- Utilizar unos elementos de sujeción suficientemente rígidos.
- Evitar que la pieza se doble bajo los efectos de las fuerzas de corte.
- Facilitar la realización del mayor número de operaciones en una posición.
- Permitir la preparación, sujeción y desmontaje de la pieza en el menor tiempo posible.

Los factores más importantes que influyen a la hora de elegir un sistema de sujeción son:

- el tipo de operación,
- las dimensiones y forma de la pieza,
- el número de piezas que hay que fabricar,
- la capacidad de trabajo de la máquina.

Los sistemas más empleados, que se estudian en los siguientes apartados, son los siguientes:

- mordazas,
- sujeción directa sobre la mesa, con bridas, tornillos y apoyos,

- aparatos divisores y platos de garras,
- sistemas rápidos mecánicos, con levas y excéntricas o con actuadores neumáticos o hidráulicos,
- utillajes especiales, modulares o diseñados expresamente para una pieza determinada.

Todos los sistemas de sujeción se basan en las fuerzas de rozamiento que se calculan según la expresión:

$$F = \mu N$$

en donde: F = fuerza de rozamiento

μ = coeficiente de rozamiento

N = fuerza normal entre las superficies de contacto

La tabla de la figura 9.1 muestra valores comunes de coeficientes de rozamiento para varios materiales.

<i>Materiales</i>	<i>Coeficiente de rozamiento μ</i>	
	<i>En seco</i>	<i>Engrasado</i>
Acero sobre acero	0,15	0,1
Acero sobre fundición	0,19	0,1
Fundición gris sobre fundición gris	0,20	0,16
Acero templado sobre acero templado	0,10	0,05
Bronce sobre acero	0,18	0,1
Madera sobre madera	0,5	0,16
Madera sobre metal	0,7	0,11
Cuero sobre fundición	0,45	
Goma sobre fundición	0,45	
Cinta de freno sobre acero	0,55	

Fig. 9.1. Coeficientes de rozamiento. L. N. López, Mecanizado de alto rendimiento: procesos de arranque, 2004.

b) Sujeción en mordaza.

La mordaza es uno de los medios de sujeción más utilizados para sujetar piezas en la fresadora.

La inmovilización de la pieza se consigue gracias al rozamiento (F_R) originado entre la pieza y las mordazas del aparato, al presionar con el husillo que se apoya en la parte posterior de la mordaza deslizante.

Para que la sujeción sea efectiva, la fuerza de rozamiento debe ser mayor que la fuerza de corte ejercida por la fresa. A su vez, la mordaza debe quedar bien apretada contra la mesa de la máquina, para evitar su deslizamiento.

Las mordazas existentes en el mercado son muy variadas, encontrándose:

- mordazas sencillas, con base fija y muy robustas,
- mordazas giratorias, con placa base graduada,
- mordazas universales, que pueden girar sobre dos y hasta tres ejes, para colocar la pieza en cualquier posición,
- mordazas de accionamiento neumático e hidráulico.

Entre las precauciones que hay que tener en cuenta al sujetar las piezas en las mordazas figuran las siguientes:

- Comprobar el paralelismo de las mordazas con respecto a la mesa.
- Asegurar el apoyo de la pieza sobre la base de la mordaza o las platinas rectificadas que se utilizan como apoyos.
- Utilizar garras blandas para amarrar las piezas susceptibles de rayados.

Una variante de las mordazas son las mesas magnéticas.

c) Sujeción de la pieza sobre la mesa.

Cuando se mecanizan piezas medianas y grandes en trabajos unitarios o pequeñas series se emplea la sujeción directa sobre la mesa, utilizando bridas y tornillos.

Existe una gran variedad de formas de bridas para adaptarse a las diferentes piezas, al mecanizado a realizar y a las fuerzas de fijación. También se emplean, como elementos auxiliares, calzos, escuadras y diversos suplementos.

Es muy importante nivelar la pieza si no dispone de una buena superficie de referencia que sirva de apoyo. Para ello, se apoya la pieza sobre tres puntos y después se sujeta con bridas, teniendo cuidado de no deformar la pieza.

La fuerza que se debe aplicar depende de las fuerzas de mecanizado y, en función de éstas, se determina el tamaño de las bridas, su número y distribución. La relación entre la fuerza R_1 que ejerce cada brida en dirección axial sobre la pieza se determina a partir de las siguientes expresiones:

$$R_1 + R_2 = Q$$

$$R_1 a = R_2 b$$

$$R_1 = \frac{Q b}{a + b} = \frac{Q b}{A}$$

Como R_1 debe ser lo mayor posible, siempre se realizará el montaje de la brida de forma que b sea mayor que a .

Hay que comprobar, además, si el tornillo tiene resistencia suficiente para soportar los esfuerzos generados, sin sobrepasar su límite elástico, utilizando la fórmula siguiente:

$$Q = T_{adm} \frac{\pi d_i^2}{4}$$

en donde:

T_{adm} = tensión admisible en Kg/mm²

d_i = diámetro del núcleo del tornillo en mm

d) Sujeción mediante levas y excéntricas.

Los mecanismos utilizados son:

- Leva frontal, que no es más que una cuña circular, accionada por una palanca. En algunos casos hay que utilizar elementos de seguridad para evitar el desbloqueo de la leva.
- Leva radial, con el mismo principio de funcionamiento pero con la fuerza de apriete perpendicular al eje de giro. Suele fabricarse según la geometría de la espiral de Arquímedes.
- Excéntrica circular, más fácil de fabricar.

e) Sujeción en platos de garras y aparatos divisores.

Los platos de garras son exactamente iguales a los ya estudiados en el capítulo, referente al torno y sus elementos de sujeción. El plato puede amarrarse

directamente a la mesa, para lo que dispondrá de unas ranuras laterales en las que se alojan los tornillos de sujeción a la mesa.

También puede colocarse dicho plato de garras, sobre el aparato divisor. Este es un accesorio utilizado para mecanizar ranuras, taladros o cualquier otro elemento sobre las piezas de forma equidistante. Aplicaciones comunes son la fabricación de engranajes, ejes nervados, levas helicoidales, etc.

El divisor dispone de un disco con agujeros o un disco ranurado para poder realizar las operaciones antes mencionadas. Una vez seleccionada la posición buscada, se fija mediante un gatillo.

El aparato divisor puede utilizarse también para realizar montajes entre puntos o con pinza como las utilizadas en los tornos.

Los aparatos divisores pueden ser horizontales o verticales y pueden incorporar incluso ejes orientables.

f) Utillajes especiales.

Cuando hay que fresar grandes series de piezas el tiempo empleado en la sujeción, centraje y desmontaje de la pieza supone al final un aumento considerable de los tiempos de preparación y maniobra, en detrimento de los tiempos de corte. Por esta razón, se emplean utillajes especiales, específicamente diseñados para el amarre de una pieza determinada.

Para poder accionar los utillajes con mayor rapidez y comodidad para el operario, incorporan elementos mecánicos de accionamiento rápido (palancas, levas, excéntricas, ...) e incluso dispositivos neumáticos e hidráulicos.

Los utillajes especiales también se emplean en series más cortas cuando la complejidad de las piezas que se deben amarrar es muy grande (como es el caso de las piezas de fundición o estampadas).

Los utillajes especiales pueden diseñarse y construirse de forma que solo valgan para una determinada pieza, pero ello supone unos gastos muy elevados y, además, hay que tener un almacén de utillajes muy voluminoso.

g) Utillajes Modulares

La alternativa a este problema es la utilización de utillajes modulares que permiten realizar construcciones tipo "mecano" tan complejas como lo exija la pieza que hay que sujetar. Estos tienen la ventaja de que una vez concluido el trabajo se pueden

desmontar y aprovechar las piezas para nuevos utillajes, con lo que se reduce el espacio de almacén necesario.

El sistema modular ofrece aún más ventajas entre las que se pueden destacar:

- La utilización de un sistema de codificación que se escribe en una ficha, a partir de la cual se puede volver a construir el mismo utillaje.
- La disponibilidad en ficheros CAD (Diseño Asistido por Ordenador) de los distintos elementos modulares, para poder diseñar el útil antes de fabricar la pieza.

9.5 Operaciones de fresado.

Las operaciones que pueden llevarse a cabo en una fresadora son las siguientes:

- Planeado.
- Escuadrado
- Contorneado
- Cajeadado
- Ranurado
- Fresado de formas
 - * Fresado de árboles ranurados
 - * Fresado de acoplamientos de dientes
 - * Mortajado
 - * Tallado de ruedas dentadas
 - * Tallado de levas
 - * Tallado de fresas
- Taladrado y trabajos afines
- Fresado de superficies complejas

En los siguientes apartados se describen cada una de estas operaciones.

a) Planeado.

Con la operación de planeado se mecanizan en las piezas superficies planas para múltiples aplicaciones: superficies de apoyo, juntas estancas, superficies de guías de deslizamiento, etc.

La calidad superficial a obtener dependerá de la aplicación de la superficie plana y en función de ella se realizará un planeado en desbaste o en acabado. Incluso puede ser necesario tener que acabar la superficie en otra máquina, mediante un proceso de rectificado.

El planeado puede obtenerse de dos formas principales:

- Mediante una fresa con eje de giro perpendicular a la superficie plana a obtener (fresado frontal).
- Mediante una fresa con eje de giro paralelo a la superficie plana a obtener (fresado cilíndrico).

Sea cual sea el método elegido, se debe tener en cuenta que el plano a mecanizar debe cumplir las tolerancias dimensionales, geométricas (de forma y posición) y de acabado superficial.

La tolerancia de forma relacionada con la operación de planeado es la planitud o planicidad. En relación a la posición, son importantes el paralelismo, perpendicularidad, inclinación, etc. En la norma DIN 7184 o UNE-1-121-75 se definen todas estas tolerancias.

* Planeado con fresa frontal

Es el método más empleado, ya sea utilizando fresas enterizas, o bien con platos de plaquitas intercambiables.

Si la tolerancia de forma pide una planitud muy fina, el eje de giro de la fresa debe ser perfectamente perpendicular al plano de referencia.

La elección de la fresa para la operación de planeado dependerá de:

- El material a mecanizar: pocos dientes para materiales de viruta larga, muchos para viruta corta (bronces y fundición, por ejemplo).
- La rigidez de la máquina.
- El sistema de fijación empleado.
- La posición de la fresa respecto a la pieza.
- La anchura de la superficie a mecanizar.

Esta última condición determina el diámetro de la fresa. Si se quiere realizar el planeado en una sola pasada, el diámetro de la fresa será de al menos 1,2 veces el ancho de la pieza. No se deben utilizar fresas de diámetros muy grandes, pues al necesitar más recorrido para la entrada y la salida, el tiempo de mecanizado es mayor. También son mayores el par resistente y la potencia necesaria.

Cuando el plano sea muy ancho, será necesario dar varias pasadas, que habrán de solaparse ligeramente para evitar discontinuidades en la superficie.

En operaciones de acabado, nunca se debe volver con la herramienta por encima de la superficie ya fresada.

* Planeado con fresa cilíndrica

Este planeado es de peor calidad que el frontal, pero en algunos casos, debido a la máquina o fresa disponible y al tipo de pieza, puede ser necesario recurrir a él.

Algunas consideraciones a tener en cuenta son:

- Utilizar dientes helicoidales para trabajos de desbaste y cortes discontinuos.
- Para desbastes, utilizar fresas de pequeño diámetro (menor momento torsor); para acabados gran diámetro (mejor acabado).

b) Escuadrado.

El escuadrado es un caso combinado de los dos tipos de planeado descritos en el apartado anterior. Se trata de mecanizar una escuadra o ángulo recto, de forma que uno de los planos se obtiene con la parte frontal de la fresa y el otro plano con la periférica.

c) Contorneado.

El contorneado o fresado periférico es una operación similar al planeado periférico utilizada para el mecanizado de contornos exteriores de piezas.

Se utiliza, para ello, fresas de mango enterizas y de plaquitas que trabajan con su superficie lateral, aunque algunas tienen también la posibilidad de trabajar frontalmente, de tal forma que realizan a la vez el contorneado y el planeado (escuadrado siguiendo un contorno).

La figura 9.2 muestra un ejemplo de contorneado.

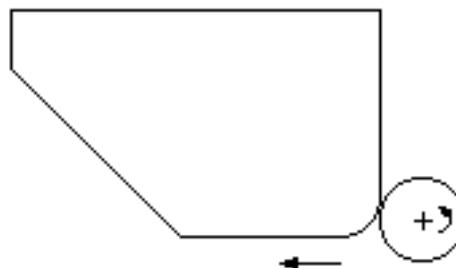


Fig. 9.2. Contorneado o fresado periférico. Elaboración propia

d) Cajeadado.

El cajeadado es una variante del contorneado y del ranurado que consiste en realizar un vaciado en una superficie de una pieza, según un contorno definido. Para ello, se utilizan fresas cilíndricas de mango, tanto enterizas como de plaquitas intercambiables.

Si la fresa no dispone de filos de corte en toda su superficie frontal, es necesario taladrar primero y luego utilizar una fresa o avellanador recto para mecanizar la entrada de la fresa.

e) Ranurado.

Es una operación con la que se mecanizan ranuras. En el caso de que sean rectangulares, se obtienen de una sola pasada tres planos: el de fondo y los dos laterales, perpendiculares al anterior.

Esta operación se puede realizar tanto con fresas de disco como con fresas cilíndricas de mango (ver figura 9.3). En ambos casos pueden utilizarse herramientas enterizas o herramientas con plaquitas intercambiables.

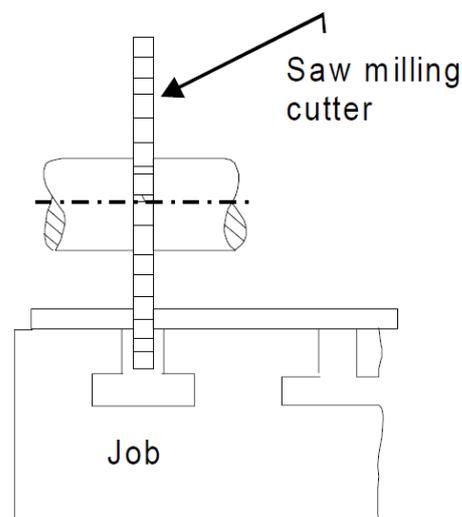


Fig. 9.3. Operación de ranurado. R. Singh, Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, 2006.

Tanto en el caso de las fresas cilíndricas de mango como en el de las de disco, se trata de herramientas de una dimensión fija, luego, en una sola pasada solo es posible mecanizar ranuras de las dimensiones de la fresa. Para ranuras más anchas, habrá que realizar dos o más pasadas.

Las ranuras que requieren unas tolerancias dimensionales estrechas, habrán de realizarse también en varias pasadas, abriendo primero el canal central y repasando después los dos laterales.

Entre las aplicaciones más comunes del ranurado están:

- El fresado de chaveteros.
- El fresado de ranuras en "T", utilizando fresas especiales.

- Fresado de ranuras especiales: en ángulo, colas de milano, con perfiles curvos,

Un aspecto muy importante en las operaciones de ranurado es la refrigeración, debido a que la fresa trabaja encerrada entre las paredes de la pieza y, por tanto, las grandes superficies de contacto generan una gran cantidad de calor.

Por último, en el caso de utilizar fresas de mango, la distancia entre el husillo y la pieza (es decir, el voladizo de la fresa) debe ser la menor posible, para evitar el momento flector que se produce. Recordando las fórmulas de resistencia de materiales:

$$\frac{M_f}{W} \leq \sigma_{adm}$$

siendo:

$$M_f = F_c \cdot x$$

$$W = \frac{\pi d^3}{32}$$

en donde:	M_f	= momento flector producido por la fuerza de corte
	W	= momento resistente de la sección del mango
	σ_{adm}	= tensión admisible para la herramienta
	d	= diámetro de la herramienta

Estas consideraciones son también aplicables a las operaciones de contorneado, escuadrado y cajado cuando se utilizan fresas cilíndricas de mango.

Cuando las necesidades del trabajo exijan grandes voladizos se utilizan adaptadores antivibratorios que reducen las vibraciones. Se utilizan, sobre todo, en aplicaciones de mecanizado de moldes y matrices.

f) Fresado de formas.

Bajo este epígrafe se agrupan diferentes operaciones de fresado cuyo objetivo es el mecanizado de formas especiales, diferentes a las ya estudiadas en los apartados anteriores.

Muchas de ellas no son más que una variante de algunas de las ya analizadas, cuya única diferencia es el empleo de una herramienta especial con una forma determinada.

* Fresado de árboles ranurados

Los árboles ranurados se fabrican a partir de una pieza cilíndrica, previamente torneada, sobre la que se efectúan las ranuras necesarias.

Se trata, por lo tanto, de una operación de ranurado realizada con una fresa de forma que reproduce la geometría normalizada de la ranura.

La pieza (eje) cilíndrica se coloca normalmente entre un punto de apoyo y el plato divisor, necesario este último para girar el eje que se mecaniza el número de grados adecuado.

* Fresado de acoplamientos de dientes

Los acoplamientos de dientes son elementos de máquinas utilizados para unir ejes o árboles. Pueden ser de dientes rectos, triangulares o trapeciales.

Se mecanizan utilizando fresas de disco rectas (para el caso de dientes rectos) o con forma triangular o trapecial. La pieza se sujeta sobre un plato divisor vertical con eje orientable.

* Mortajado

La operación de mortajado necesita el acoplamiento a la máquina del aparato de mortajar, que convierte el movimiento circular del husillo en un movimiento de vaivén. Mediante mortajado se mecanizan en las piezas:

- chaveteros en alojamientos,
- estriados interiores,
- engranajes interiores,
- acoplamientos de dientes interiores, etc.

* Tallado de ruedas dentadas

Las ruedas dentadas o engranajes pueden fabricarse de muchas formas y a ello se dedica un amplio apartado en el capítulo de máquinas y procedimientos especiales de arranque de viruta.

Uno de los procedimientos empleados es el fresado, con el que pueden fabricarse:

- Engranajes cónicos, con fresa de disco de forma y divisor vertical con eje orientable.
- Engranajes cilíndricos rectos, con fresa de disco de forma y aparato divisor manual. De igual forma, se mecanizan ruedas de cadena.
- Engranajes cilíndricos rectos y helicoidales con fresa madre, utilizando un aparato divisor o mecanismo similar accionado automáticamente por la fresadora.
- Tornillo sinfín y corona, con fresa de disco de forma y aparato divisor automático.
- Cremalleras, con fresa de forma.
- Engranajes rectos, exteriores e interiores, por mortajado.

* Tallado de levas

En la fresadora universal pueden mecanizarse levas de diferentes tipos:

- Levas de tambor, que no es más que una ranura helicoidal a lo largo de un eje cilíndrico. Se utiliza una fresa de forma o de mango y un aparato divisor, accionado por una cadena cinemática que recibe el movimiento de la propia fresa.

Este tipo de levas se mecanizan en la actualidad en tornos de control numérico equipados con herramientas motorizadas y eje C controlable.

- Levas de disco, fabricadas con fresas cilíndricas de mango y divisor vertical con accionamiento automático, o bien, directamente con una fresadora CN que realiza la trayectoria de mecanizado según sea el perfil de la leva.

* Tallado de fresas

Las propias fresas pueden mecanizarse utilizando una fresadora, aunque este tipo de trabajos son realizados por fábricas especializadas dedicadas exclusivamente a la producción de herramientas de fresado.

Los procedimientos empleados son muy similares a los descritos en las diferentes secciones de este apartado: utilización de fresas de forma y aparatos divisores orientables y accionados automáticamente.

g) Taladrado y trabajos afines.

Las fresadoras o centros de mecanizado permiten realizar otras operaciones con herramientas rotativas como los taladros y trabajos afines (avellanado, escariado, roscado con macho y mandrinado).

Todas estas operaciones se explicarán en un capítulo posterior de estos apuntes, en el que se describen las herramientas, parámetros de corte, etc. correspondientes.

h) Fresado de superficies complejas.

La industria dedicada a la fabricación de moldes, matrices y troqueles se enfrenta a la necesidad de tener que mecanizar superficies complejas, tales como la que necesitan una matriz y el troquel complementario utilizados en el proceso de embutición de chapas para fabricar carrocerías de automóviles.

Hasta hace pocos años, estas operaciones se realizaban en fresadoras copiadoras, pero actualmente se utilizan fresadoras y centros de mecanizado de control numérico de 3 y 5 ejes.

Las herramientas utilizadas suelen ser de punta esférica que permiten realizar operaciones en todas las direcciones, incluido el mecanizado en rampa.

10. HERRAMIENTAS PARA FRESAR

10.1 Fresas enterizas

Las fresas enterizas se fabrican de diferentes materiales (acero rápido y metal duro, fundamentalmente, aunque también las hay de materiales cerámicos) por procedimientos de fresado que van definiendo los distintos dientes.

10.1.1 Dentado

Cada diente, definido por varios planos cuyas intersecciones constituyen las aristas de corte, actúa igual que una herramienta simple de un solo filo y está definido por sus correspondientes ángulos de incidencia (α), filo (β) y desprendimiento (γ). Estos y el paso entre ellos se eligen en función del material. Así:

- Para materiales duros (a) se emplean pasos pequeños y ángulos α y γ pequeños.
- Para materiales de dureza media (b) el paso es mayor y también α y γ .
- Por último, para materiales blandos (c) se utilizan grandes pasos, para poder evacuar la gran cantidad de virutas producidas y los ángulos α y γ son aún mayores, pues no importa debilitar el filo β .

Las fresas enterizas pueden ser:

- De *dientes rectos*, paralelos al eje de la fresa, que abarcan la viruta en toda su anchura, haciendo que la fresa trabaje a golpes.
- De *dientes helicoidales*, que trabajan de forma más suave, con menos vibraciones, pues cuando sale un diente del material hay otro que acaba de empezar a cortar. En este tipo de fresas hay que considerar un ángulo más, el de la hélice.

10.1.2 Geometría y aplicación

10.1.2.1 Fresas cilíndricas para planear

Se utilizan en fresadoras horizontales para realizar operaciones de planeado mediante fresado frontal o cilíndrico. Presentan dientes rectos o helicoidales.

Estas últimas producen un esfuerzo axial sobre el husillo principal de la máquina que se puede anular utilizando dos fresas con el mismo ángulo de hélice pero distinta orientación de éste.

Estas fresas están normalizadas:

- Norma UNE 16-201-75 y DIN 884 para las de dientes helicoidales.
- Norma UNE 16-202-75 y DIN 1892 para las helicoidales acopladas.

Fresas cilíndricas con corte frontal

Son fresas cilíndricas con filos en su base (corte frontal). Pueden presentar corte frontal integral o parcial (los filos no llegan al eje de la herramienta). Permiten trabajar desplazándose en la dirección del eje de giro de la herramienta de forma similar a una broca. Además presentan filos en su periferia por lo que pueden realizar operaciones de planeado y escuadrado. Están normalizadas según DIN 1880 y DIN 841, existiendo para diferentes diámetros entre 30 y 150mm.

10.1.2.2 Fresas cilíndricas de mango

Son también fresas para trabajos frontales y tangenciales, pero de menor diámetro que las anteriores y provistas de su propio mango, que puede ser:

- Cilíndrico, para diámetros de 2 a 20 mm, según norma DIN 844, aunque las hay de diámetros mayores.
- Cónico, con cono morse, para diámetros de 6 a 40 mm, según norma DIN 845 A y B.

Existe una gran variedad de herramientas de este tipo, en función de:

- El número de dientes.
- El ángulo de la hélice.
- Los ángulos del filo (α , β y γ).
- El tipo de dentado, liso o corrugado, este último empleado en operaciones de desbaste, pues los rebajes de los dientes reducen la fuerza de corte necesaria y rompen la viruta.
- El material empleado: acero rápido con o sin recubrimiento, metal duro con o sin recubrimiento, filos de metal duro soldados, materiales cerámicos, con placa o filos de diamante, etc.
- La forma de la punta: plana, de bola, con radio, achaflanada, etc.

- Corte hasta el centro de la fresa, o sin él.
- Tipo de mango: cono morse, cilíndrico liso, cilíndrico roscado, muesca Weldon.
- La longitud: serie corta, larga, etc.

Las fresas cilíndricas de mango se utilizan en muchas de las operaciones: planeado, escuadrado, contorneado, cajeado y ranurado, fundamentalmente.

10.1.2.3 Fresas de disco

Son fresas cilíndricas cuya longitud es relativamente pequeña comparada con su diámetro. Se utilizan, fundamentalmente, en operaciones de ranurado y fresado de formas especiales con ayuda del aparato divisor.

Están normalizadas según DIN 885 A y B, DIN 1831, DIN 1847, DIN 1848 y DIN 1890.

10.1.2.4 Fresas de forma

En este grupo entran todas las fresas enterizas restantes, utilizadas para mecanizar formas especiales. Entre ellas, podemos citar:

- Fresas de mango para ranurar en "T", normalizadas según DIN 851, 650 y 6888.
- Fresas angulares isósceles (DIN 847) y bicónica (DIN 1823-B), utilizadas para ranuras prismáticas y tallados de fresas.
- Fresas frontales de ángulo (DIN 842 y 1823-A), para mecanizar guías de máquina.
- Fresas cónicas de mango (DIN 1833-A y B), para tallar herramientas, guías y avellanados.
- Fresas de formas diversas: cóncavas, convexas, con perfil de engranajes, con perfil de ranura de ejes nervados, con perfil de rueda de cadena, perfiles compuestos, etc.

10.2 Fresas de filos soldados o intercambiables

Las fresas de grandes dimensiones es antieconómico construirlas totalmente de material de corte: se utilizan, en este caso, fresas con el cuerpo de acero de construcción tenaz y sólo los dientes son de acero de herramientas o, más comúnmente, metal duro, aunque también se emplean dientes de cerámica y diamante.

Los dientes postizos pueden ser permanentes y se unen por soldadura, o bien intercambiables, utilizando fijación mecánica por tornillo o brida.

10.2.1 Fresas de plaquitas intercambiables

La utilización de las plaquitas intercambiables (las soldadas son poco empleadas), al igual que en el caso del torneado, han supuesto una revolución en lo que a herramienta de fresado se refiere. Su única limitación, aparte de las herramientas de forma, son las herramientas cilíndricas de pequeño diámetro, dada la imposibilidad física de colocar plaquitas con su sistema de fijación en diámetros inferiores a 12 mm.

En este apartado se muestran las diferentes formas constructivas empleadas en las plaquitas y en las herramientas, incluyendo las claves de códigos utilizados para su identificación.

10.2.1.1 Plaquitas intercambiables para fresado

Existen tablas (como por ejemplo las del catálogo de SANDVIK de herramientas rotativas) relativas a:

- La clave de códigos para identificar las plaquitas intercambiables para fresado (extracto de la norma ISO 1832-1985).
- Las calidades básicas de metal duro para fresado, indicando sus aplicaciones en función del tipo de material y de la operación.
- El campo de aplicación de las distintas calidades.

10.2.1.2 Fresas para planear y escuadrar

Existe una gran variedad de platos para plaquitas intercambiables de aplicación en operaciones de planeado y escuadrado, en función de diferentes factores. Entre ellos, podemos citar:

- El diámetro del plato (de 40 a 500 mm).

- El ángulo de posición de la plaquita (de 45 a 90 grados).
- La forma de la plaquita (cuadrada, redonda, rectangular, ...)
- El número de plaquitas (desde 3 a 82).
- La geometría de las plaquitas.

10.2.1.3 Fresas para ranurar y contornear

Estas fresas se utilizan en ranurados o contorneados con formas específicas.

10.2.1.4 Fresas de disco

Estas fresas tienen una geometría similar a un disco, y sirven para otros campos de aplicación que no se cubren con las fresas habituales.

10.2.1.5 Fresas para roscar

En las modernas máquinas fresadoras y centros de mecanizado de control numérico, existe la posibilidad de realizar los distintos métodos de roscado. Las plaquitas utilizadas son las definidas en el capítulo de herramientas de torneado.

10.3 Fresas especiales

En este apartado se incluyen las fresas que por su forma y aplicación muy específica no entran dentro de los apartados anteriores.

Nos referimos fundamentalmente a:

- Las fresas madre utilizadas en el tallado de engranajes.
- Las fresas rotativas empleadas en las operaciones de acabado de moldes.

10.3.1 Fresas madre para el tallado de engranajes

Son fresas con geometría muy compleja utilizadas para tallar:

- Ruedas helicoidales para tornillo sinfín.
- Engranajes helicoidales.

- Engranajes de diente recto.

Están normalizadas según DIN 3968, 3972, 8000, 8002 y 5841.

10.3.2 Fresas rotativas para acabado de moldes

Son fresas de mango de formas muy variadas de metal duro y dentado muy tupido, utilizadas en la industria de matricería y moldes para el acabado y repaso de superficies, aristas y agujeros.

10.4 Sistemas de sujeción de herramientas

La sujeción de la herramienta a la máquina es uno de los factores más importantes en el proceso de fresado, pues se ha de asegurar el perfecto acoplamiento y la perfecta concentricidad entre husillo y herramienta. Si esto no es así, el trabajo obtenido será de dudosa calidad y, además, la máquina sufrirá más de lo debido.

10.4.1 Clasificación

Los sistemas de sujeción más empleados son:

- Montaje con cono.
- Montaje sobre platina de arrastre.
- Montaje con mango postizo.
- Montaje con pinzas.

En este apartado se describen brevemente estos sistemas de sujeción, incluyéndose una sección dedicada a los adaptadores y reductores y otra a los sistemas modulares de sujeción.

10.4.1.1 Montaje con cono

Se trata de un acoplamiento directo entre el eje del husillo, dotado de un cono interior Morse, ISO u otro tipo, y el mango cónico de la herramienta. Se obtiene así una gran robustez y precisión de montaje, pues no se emplea ningún elemento intermedio: sólo depende de la precisión de la máquina y de la propia herramienta.

En el caso del cono Morse, su pequeña conicidad hace que la adherencia sea lo suficientemente grande para aguantar el par provocado por los esfuerzos de corte. No obstante, en algunos casos, se incorpora un tirante en el eje del husillo que se utiliza para fijar la fresa y también para extraerla.

10.4.1.2 Montaje sobre platina de arrastre

Es también un acoplamiento directo, utilizado sobre todo con platos de planear. El eje de la fresadora termina en una platina plana (1), normalizada, que incorpora unas chavetas transversales de arrastre (2) y cuatro taladros roscados (3) en los que se sujeta el plato.

El centrado de la herramienta puede hacerse de varias formas: con una guía en el plato que ajuste en el exterior del husillo, con un centrador que ajusta en el cono interior del eje y en el agujero central del plato, etc.

10.4.1.3 Montaje con mango postizo o portaherramientas

Cuando la fresa no está provista de mango o el plato de planear no se puede acoplar directamente al eje, hay que utilizar un mango o eje postizo.

El mango o portaherramientas puede ser de distintas formas, disponiendo de un cono (ISO, Morse o de otro tipo normalizado) y de tirantes para su sujeción al husillo de la máquina.

Para sujetar la fresa, pueden emplearse distintas soluciones:

- Portaherramientas roscado en su extremo, que se utiliza para fresas pequeñas.
- Portaherramientas con arrastre de chaveta.
- Portaherramientas con arrastre de chaveta y fijación por tornillos, utilizada con platos de planear.

10.4.1.4 Montaje con pinzas. Portapinzas

Se utiliza para la sujeción de fresas de mango cilíndrico y brocas. Es un sistema muy eficaz, tanto desde el punto de vista del arrastre como del centrado. La pinza, similar a las de sujeción de piezas en el torno, está provista de ranuras longitudinales, un diámetro central que varía con la acción de una fuerza exterior y un cono que, al hacer presión sobre él, estrangula el agujero central y presiona el mango de la herramienta en él alojado.

Es necesario tener todo un juego de pinzas para abarcar todos los diámetros de fresas disponibles en el taller. La pinza puede alojarse directamente en el cono del husillo, en el que se ajusta por la acción de un tirante o de un pequeño golpe. Sin embargo, es más común utilizar un portapinzas que se acopla al husillo y que, a su vez, aloja a la pinza.

10.4.1.5 Adaptadores y reductores

Las herramientas (fresas, brocas, etc.) y portaherramientas (portapinzas, portabrocas, mangos, etc.) no tienen todos el mismo sistema de sujeción: unos llevan cono Morse, otros cono ISO, hay herramientas con mango cilíndrico, etc. Por

otro lado, el husillo donde se coloca la herramienta o el portaherramientas no es de la misma forma ni del mismo tamaño.

Para poder utilizar cualquier herramienta o portaherramientas en cualquier fresadora se emplean unos accesorios denominados adaptadores y reductores que exteriormente disponen de un sistema de sujeción adaptable a la máquina y en su interior llevan otro sistema, en el que se acopla la herramienta que, directamente no se podía montar.

Entre los muchos tipos de adaptadores que existen se pueden citar: adaptadores cono ISO a cono Morse, reductores ISO a ISO, reductores Morse a Morse, adaptadores-alargadores ISO a Morse, etc.

10.4.1.6 Sistemas de sujeción modulares

Los portaherramientas analizados hasta ahora son todos enterizos: portabrocas, portapinzas, mangos, adaptadores y reductores.

En algunos casos, por ejemplo, con los mangos utilizados para las fresas frontales, que son herramientas que no se suelen cambiar, interesa que el portaherramientas sea enterizo. Sin embargo, cuando las necesidades de producción exigen una gran cantidad y flexibilidad de herramientas, se eleva de forma considerable el inventario de portaherramientas. Se utilizan entonces sistemas modulares de cambio rápido que mejoran la productividad, al agilizar el cambio de la herramienta y reducen el gasto en portaherramientas.

Estos sistemas están diseñados en determinados casos para poder ser utilizados tanto en tornos como en fresadoras y centros de mecanizado.

Existe una gran variedad, según los fabricantes, de sistemas modulares. En el caso de los portaherramientas para fresadoras y centros de mecanizado se distinguen dentro de un sistema determinado:

- Mangos básicos: ISO 7388/I (ISO 30, 40, 45 y 50); MAS BT (ISO 30, 40 y 50); DIN 2080 (ISO 40 y 50); etc.
- Adaptadores intermedios, de extensión, de reducción, de adaptación a otros sistemas modulares, ...
- Adaptadores de herramientas: para fresas frontales; fresas de disco; portapinzas; fresas de ranurar con mango roscado, Weldon o Whistle Notch; portabrocas; para cono Morse; portamachos de roscar, etc.

11. PARÁMETROS TECNOLÓGICOS EN EL FRESADO

11.1 Generalidades

11.1.1 Velocidad de corte

Es la velocidad lineal en metros por minuto de un punto periférico P de los dientes de la fresa que están en contacto con la pieza que se mecaniza (ver figura 11.1.).

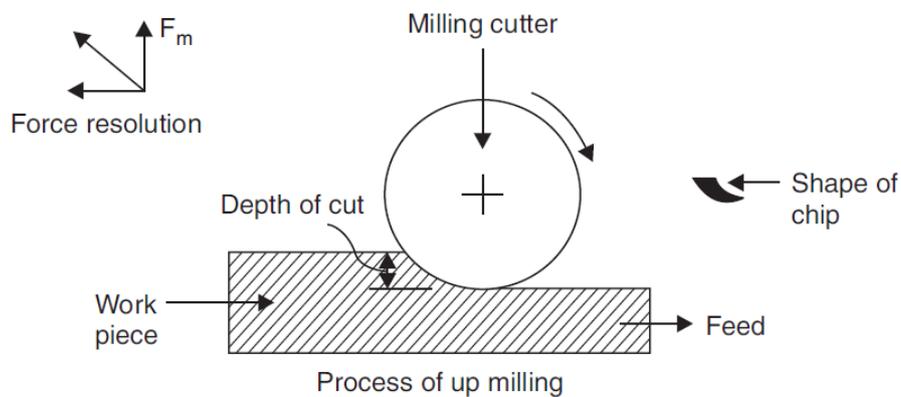


Fig. 11.1. Esquema del proceso de fresado. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009.

La relación entre la velocidad de corte (V_c en m/min) y la velocidad de giro de la fresa (n en r.p.m.), se calcula a partir de la fórmula (D es el diámetro de la fresa en mm):

$$V_c = \frac{\pi D n}{1.000}$$

Si comparamos el proceso de fresado con el de torneado, observamos que existe una diferencia relativa a la velocidad de corte: los dientes de la fresa trabajan de forma intermitente, por lo que, en igualdad de condiciones en lo que a material de la pieza y material de herramienta se refiere, y para una misma velocidad de corte, su duración será mayor.

La velocidad de corte depende, además del material de pieza y herramienta, de otros factores tales como: el tipo de operación, la forma de la fresa, la refrigeración empleada, etc.

11.1.2 Avance

El avance es el desplazamiento relativo entre pieza y fresa. Se distinguen tres tipos de avance:

- Avance por diente (a_z): desplazamiento que corresponde a cada diente en una vuelta completa; se mide en mm. Es un valor muy importante, pues determina el material que puede cortar un diente; valor que depende fundamentalmente de la forma del diente y del material que se mecaniza.
- Avance por vuelta (a_n): desplazamiento de la fresa en una vuelta completa; se mide en mm/revolución. Si el número de dientes es z , su valor se calcula a partir de:

$$a_n = z a_z$$

Velocidad de avance ($v_a = a_{\min}$):

La velocidad de avance expresada en mm/min (v_a ó a_{\min}) es el desplazamiento de la fresa en un minuto. Se calcula a partir de:

$$a_{\min} = a_n n = a_z z n$$

11.1.3 Profundidad de pasada

La profundidad de pasada se mide en milímetros y hay que distinguir entre:

- La profundidad de pasada radial (p_r), medida en la dirección del radio.
- La profundidad de pasada axial (p_a), medida en la dirección del eje.

Hay que diferenciar también entre pasadas de desbaste, en las que interesa evacuar la mayor cantidad de material posible (siempre con la limitación impuesta por la potencia de la máquina) y pasadas de afinado, en las que el objetivo es conseguir una superficie con un buen acabado.

11.2 Fuerza y potencia de corte

Al igual que en las operaciones de torneado, la fuerza de corte es el producto de la sección de viruta instantánea (S) por la fuerza o presión específica de corte (f_c).

$$F_c = f_c S$$

La potencia de corte en el fresado se calcula a partir de la ya conocida expresión:

$$P_c = F_c v_c = f_c S v_c$$

El valor de f_c puede obtenerse de tablas en función del material de la pieza, geometría de la herramienta y de los parámetros de corte.

A diferencia de las operaciones de torneado, en el fresado la sección de viruta instantánea (S) es variable debido a los siguientes factores:

- El espesor de la viruta varía a lo largo del trabajo de un filo determinado.
- El número de filos de la fresa cortando en un instante determinado es variable.
- En el caso de fresas de dientes oblicuos, la longitud de trabajo del filo es variable debido a que el inicio y final del corte son progresivos.

Por lo tanto, también la fuerza y potencia de corte instantáneas serán variables en las operaciones de fresado.

En general interesa determinar los valores medios de dichas magnitudes para lo que serán necesarias las expresiones de la sección de viruta media (S_m).

11.2.1 Sección de viruta

La sección de viruta de un filo de la herramienta es el producto del espesor de la viruta (e) por la longitud del filo de la herramienta en contacto con el material de la pieza (l):

$$S = e l$$

Considerando que en el fresado pueden trabajar varios filos simultáneamente, la sección de viruta instantánea puede calcularse a partir de:

$$S = e l z'$$

en donde:

l = longitud de contacto de cada diente con la pieza (cte. si el diente es recto).

z' = número de dientes en contacto en un momento dado.

La sección de viruta media (S_m) en una operación de fresado vendrá dada por la expresión:

$$S_m = e_m p_a z'_m$$

p_a = profundidad axial.

z'_m = número de dientes medio en contacto con la pieza.

e_m = espesor medio de la viruta.

Si φ es el ángulo en radianes de la parte de una fresa con z dientes que está en contacto con la pieza el valor de z'_m será:

$$z'_m = z \frac{\varphi}{2\pi}$$

A continuación se explican las expresiones para el cálculo aproximado del espesor medio de viruta en el fresado cilíndrico y fresado frontal.

11.2.1.1 Espesor medio de viruta

a) Fresado cilíndrico ($p_r \ll D$):

El espesor medio (e_m) de viruta se calcula a partir de la expresión:

$$e_m = \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2}$$

Como el avance por diente (a_z) es muy pequeño con respecto al diámetro de la fresa, puede aproximarse la curva descrita por el diente (una cicloide) por un arco de circunferencia de radio $D/2$.

A partir de la figura anterior se deduce que:

$$\cos(BAC) = \frac{e_{\max}}{a_z}$$

y como los triángulos ABC y ADO son semejantes:

$$\cos(BAC) = \frac{AB}{AC} = \frac{AD}{AO} = \frac{\sqrt{R^2 - (R - p_r)^2}}{R}$$

con lo que:

$$\frac{e_{\max}}{a_z} = \sqrt{\frac{2R \cdot p_r - p_r^2}{R^2}} \Rightarrow e_{\max} = a_z \sqrt{\frac{2 p_r}{R} \left(1 - \frac{p_r}{D}\right)}$$

En el fresado cilíndrico, p_r/D suele ser pequeño y puede despreciarse, resultando:

$$e_{\max} = a_z \sqrt{\frac{2 p_r}{R}} = 2 a_z \sqrt{\frac{p_r}{D}}$$

Por último, el espesor medio será:

$$e_m = \frac{e_{\max}}{2} = a_z \sqrt{\frac{p_r}{D}}$$

Por otro lado, para el cálculo de z'_m en fresado cilíndrico:

$$\cos \varphi = \frac{OF}{D/2} = \frac{D/2 - p_r}{D/2} = 1 - \frac{2 p_r}{D}$$

aproximando (φ es pequeño en este tipo de fresado):

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2}$$

resulta:

$$\varphi = 2 \sqrt{\frac{p_r}{D}}$$

con lo que:

$$z'_m = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{p_r}{D}}$$

y la sección de viruta media será, sustituyendo también el valor de e_m :

$$S_m = \frac{a_z z p_r p_a}{\pi D} (\text{mm}^2)$$

b) Fresado frontal:

El espesor de la viruta en el fresado frontal no es tan variable como en el fresado cilíndrico. En este apartado se estudia el caso de una operación de planeado frontal

en una única pasada en el que el eje de la herramienta se desplace por la línea media de la pieza mecanizada.

Para calcular el espesor medio de la viruta se considera que las dos áreas rayadas en la figura son aproximadamente iguales, resultando:

$$p_r a_z = l_a e_m$$

de donde:

$$e_m = \frac{p_r a_z}{l_a}$$

El valor de l_a , puede calcularse a partir de la expresión (φ expresado en radianes):

$$l_a = \frac{D \varphi}{2}$$

con lo que:

$$e_m = \frac{p_r a_z 2}{D \varphi}$$

Por otra parte:

$$z'_m = z \frac{\varphi}{2\pi}$$

Sustituyendo:

$$S_m = \frac{a_z z p_r p_a}{\pi D} (\text{mm}^2)$$

Obteniéndose la misma expresión que para las operaciones de fresado periférico.

11.2.2 Fuerza de corte

Como se indicó anteriormente, la fuerza de corte es el producto de la sección de viruta (S) por la fuerza específica de corte (f_c).

$$F_c = f_c S$$

Teniendo en cuenta los valores de la sección media de viruta (S_m), calculados anteriormente, se obtienen la siguiente expresión para la fuerza media de corte:

$$F_c = \frac{a_z z p_r p_a}{\pi D} f_c$$

El valor de f_c puede obtenerse de tablas en función del material de la pieza, geometría de la herramienta y de los parámetros de corte.

11.2.3 Potencia de corte

La potencia de corte se calcula a partir de la expresión:

$$P_c = F_c v_c$$

en donde:

$$v_c = \frac{\pi D n}{1000} (m/\min) = \frac{\pi D n}{60000} (m/s) \quad ; \quad F_c = \frac{a_z z P_r P_a}{\pi D} f_c (Kgf)$$

Expresado f_c en Kgf/mm².

Sustituyendo las expresiones anteriores se obtiene:

$$P_c = \frac{a_z z P_r P_a n}{60000} f_c (Kgf \cdot m/s)$$

Finalmente, sustituyendo: $a_z n z = a_{\min} (mm/\min)$

Resulta en (CV) y (KW):

$$P_c = \frac{a_{\min} P_r P_a f_c}{4.500.000} (CV)$$

$$P_c = \frac{a_{\min} P_r P_a f_c}{6.120.000} (KW)$$

Estas expresiones son válidas tanto para el fresado cilíndrico como para el fresado frontal.

11.3 Tiempos de mecanizado

La fórmula general para calcular el tiempo de corte en el fresado es:

$$T_c = \frac{L}{v_a}$$

en donde:

T_c = tiempo de corte en minutos

L = recorrido de la fresa

a_{\min} = avance en mm/min

y el valor de L se calculará según sea el tipo de fresa y la operación que se realiza.

11.3.1 Fresado frontal

Ver figura 3.1.):

$$L = C + B + C$$

en donde, como $C = D/2$, resulta:

$$L = D + B$$

11.3.2 Fresado cilíndrico

Ver figura 3.2.:

$$L = B + C$$

en donde:

$$C^2 = \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - p\right)^2$$

Desarrollando resulta:

$$C^2 = p(D - p) \quad \Rightarrow \quad C = \sqrt{p(D - p)}$$

En consecuencia:

$$L = B + \sqrt{p(D - p)}$$

11.3.3 Fresado en escuadra

Es a la vez tangencial y frontal. La expresión de L es:

$$L = B + 2C = B + 2\sqrt{p(D - p)}$$

11.3.4 Distancia de aproximación

De todas formas, independientemente del caso que sea, hay que añadir una distancia de seguridad (entre 2 y 5 mm) para asegurar que la salida y/o la entrada son completas y se realizan de forma suave.

12. TALADRADO

12.1 Introducción

12.1.1 Generalidades

El proceso de taladrado se utiliza para realizar en las piezas agujeros pasantes o ciegos que denominamos taladros.

Las aplicaciones de estos taladros dados en las piezas son múltiples: alojamiento de tornillos, ejes y émbolos, dar paso a gases o líquidos, etc. De ahí, que las operaciones de taladrado se den muy a menudo en los procesos de fabricación.

La máquina-herramienta que se utiliza específicamente para taladrar es la taladradora, en sus diferentes versiones. En este tipo de máquinas, la herramienta se fija en el husillo principal con movimiento rotativo (movimiento de corte) y el movimiento de avance durante el mecanizado únicamente puede realizarse en la dirección del eje de giro. Sin embargo, el taladrado se puede llevar a cabo en otras máquinas-herramientas: tornos, fresadoras, punteadoras, mandrinadoras, etc.

La herramienta con la que se realizan los taladros se llama broca, de la cual existen diferentes formas constructivas, aunque la más utilizada es la broca helicoidal.

Asociadas siempre a una operación previa de taladrado, encontramos una serie de operaciones que se realizan a continuación con diferentes fines:

- Conseguir un agujero taladrado de precisión dimensional y buen acabado superficial. Se realiza entonces una operación complementaria de escariado (para pequeños diámetros) o de mandrinado (para grandes diámetros).
- Roscado del taladro con un macho de roscar.
- Mecanizar un alojamiento cónico o cilíndrico para una cabeza de tornillo, por ejemplo. La operación realizada se denomina entonces avellanado.

Previamente al taladrado puede realizarse una operación de punteado para guiar la entrada de la broca (taladros profundos, superficie irregular, etc.).

Estas operaciones afines al taladrado, pues están asociadas a él y se realizan en el mismo tipo de máquina, se describirán con detalle al final del capítulo.

Se incidirá, sobre todo, en el tipo de herramienta utilizada, ya que el resto del proceso es idéntico al taladrado.

12.1.2 Movimientos en el proceso de taladrado

El proceso de taladrado se realiza mediante dos movimientos (ver figura 12.1).

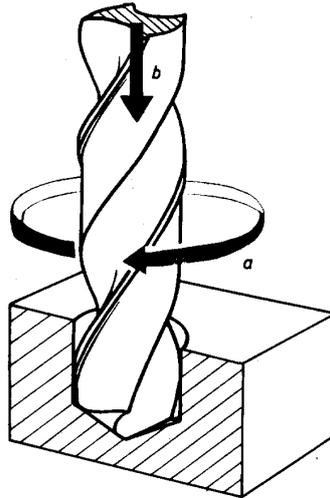


Fig. 12. 1. Movimientos en el taladrado. Elaboración propia

- El movimiento de *corte*, movimiento rotativo alrededor del eje de la broca (giro de la broca o de la pieza en el caso del taladrado en el torno).

El parámetro que lo define es la velocidad de corte (V_c) en la esquina del filo que se mide en m/min. La velocidad de giro del husillo (n) se calcula según:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot D}$$

en donde D es el diámetro de la broca en mm.

- El movimiento de *avance* es rectilíneo en la dirección del eje de la broca (avance de la broca hacia la pieza o viceversa).

El avance (a) se mide en mm/rev y multiplicándolo por la velocidad de giro (n) se determina la velocidad de avance (V_a) en mm/min.

El movimiento de avance determina el espesor de viruta. Así, utilizando una broca de dos filos, el espesor de viruta es igual a la mitad del avance.

Como se observa en la figura 1.1 los filos de una broca se encuentran en su base, de forma que la combinación de los movimientos de corte y avance hace que sigan

una trayectoria helicoidal, provocando la formación continua de virutas. Este proceso dificulta la refrigeración de los filos de la herramienta y la evacuación de las virutas producidas. En general es necesario realizar varias entradas y salidas de la broca para facilitar el proceso.

12.2 Maquinas taladradoras

La máquina taladradora es la encargada de comunicar a la broca los movimientos de corte y de avance necesarios para realizar el proceso de taladrado.

Además de los mecanismos y accionamientos necesarios para realizar dichos movimientos, la taladradora debe estar provista de una mesa destinada a sujetar la pieza sobre la que se efectúa la operación de taladrado.

Los distintos tamaños y formas de las piezas, así como el tamaño, la calidad y el número de taladros a realizar sobre ellas, exigen una variedad de máquinas de taladrar adaptadas a cada tipo de trabajo.

Se distinguen así los siguientes tipos de máquinas taladradoras:

- taladradora vertical de columna,
- taladradora de sobremesa,
- taladradoras portátiles,
- taladradora de husillos múltiples,
- taladradora radial,
- punteadora,
- mandrinadora.

12.2.1 Taladradora vertical de columna. Componentes

Los componentes principales que forman parte de ella son:

- La bancada, formada por la placa base (a) y la columna (b) sobre la que descansan el resto de componentes de la máquina.
- El husillo (d) en el que se aloja y se da movimiento a la broca. El movimiento de giro lo recibe del accionamiento principal (motor eléctrico) a través de un sistema de transmisión (c) de poleas escalonadas o caja de engranajes.

- El mecanismo para el avance (e) mediante el cual se le da al husillo el movimiento rectilíneo. Este se consigue gracias a una cremallera, tallada en la parte exterior del casquillo guía del husillo, en la que engrana una rueda dentada. Esta puede recibir su movimiento de giro de dos formas:
 - *manualmente*, accionando una palanca de brazos,
 - de forma *automática*, recibiendo entonces el movimiento del accionamiento principal, a través de una cadena cinemática similar a la del torno que incluye una caja de velocidades para seleccionar distintos avances.
- La mesa de taladrar, que soporta la pieza. Para ello, dispone de unas ranuras en "T" en las que se amarran los elementos de sujeción.

La placa base de la bancada también suele estar provista de ranuras, para sujetar piezas de gran tamaño.

La mesa puede desplazarse verticalmente a lo largo de la columna, mediante una manivela que actúa sobre un mecanismo de piñón-cremallera. Elegida la altura más idónea para realizar el trabajo, se fija la posición con una palanca que deja la mesa firmemente sujeta a la columna.

Una variante de la taladradora vertical de columna es la taladradora de montante. Se trata de una máquina más rígida y potente que sustituye la columna por un bastidor de sección rectangular y guías prismáticas sobre las que deslizan el cabezal y la mesa. Con ella se pueden realizar agujeros más grandes y de mayor profundidad, pues el husillo va mejor guiado.

En ambos casos, el posicionamiento del taladro se realiza desplazando la pieza. La posición de los taladros se define marcando la pieza, con una plantilla, etc.

12.2.2 Taladradora de sobremesa

Se trata de una versión ligera de la taladradora de columna, utilizada para trabajar sobre piezas pequeñas y con brocas de hasta 10 mm, aproximadamente. Se colocan sujetas a un banco de trabajo y no suelen tener movimiento de avance automático, sólo disponen del avance manual o sensitivo.

12.2.3 Taladradoras portátiles

Se utilizan en operaciones auxiliares: montajes, reparaciones, etc. y, desde el punto de vista del taller de fabricación, tienen poca importancia. Pueden ser, fundamentalmente, de dos tipos: eléctricas, accionadas por un pequeño motor

eléctrico (de 500 W aproximadamente) y neumáticas, accionadas por una turbina de aire comprimido a unos 7 Kg/cm².

Las de accionamiento neumático son más potentes que las eléctricas, si comparamos máquinas del mismo tamaño; tienen, sin embargo, el inconveniente de necesitar una instalación de aire comprimido.

12.2.4 Taladradora de husillos múltiples

La taladradora de husillos múltiples se utiliza para taladrar simultáneamente un gran número de agujeros paralelos situados en un mismo plano.

Se utilizan en la fabricación de grandes series de piezas. Constan de un husillo principal que acciona varios husillos mediante el uso de articulaciones cardan.

12.2.5 Taladradora radial

Cuando hay que realizar taladros sobre piezas grandes, es mejor poder mover la posición del husillo que desplazar la pieza. Para ello, se utilizan las taladradoras radiales, cuyo cabezal es soportado por un brazo sobre el que puede desplazarse radialmente. Este brazo, a su vez, puede girar alrededor de la columna y moverse verticalmente sobre ella. Se consigue así un campo de trabajo de tipo cilíndrico.

La máquina va provista de una placa de asiento de mayores dimensiones que las de las taladradoras de columna. La columna es muy robusta, pues debe soportar el voladizo del brazo.

Algunas taladradoras radiales llevan incorporada una mesa orientable que puede girar alrededor de un eje horizontal, lo que permite realizar taladros inclinados. Otras es el propio brazo el que puede orientarse, girando alrededor de su eje longitudinal; y, más aún, las hay cuyo cabezal puede girar alrededor de un eje perpendicular al eje longitudinal del brazo. De esta forma, pueden realizarse taladros orientados en cualquier posición del espacio.

Las taladradoras radiales suelen tener dos motores de accionamiento: uno, situado sobre el cabezal, que origina los movimientos de corte y avance y, otro, en la columna, que se utiliza para elevar o bajar el brazo. Algunas van provistas de un tercer accionamiento para desplazar el cabezal sobre el brazo.

12.3 Herramientas para taladrar

La herramienta empleada para taladrar dependerá del tipo de trabajo que se vaya a realizar, según se detalla en la clasificación de la figura 12.2

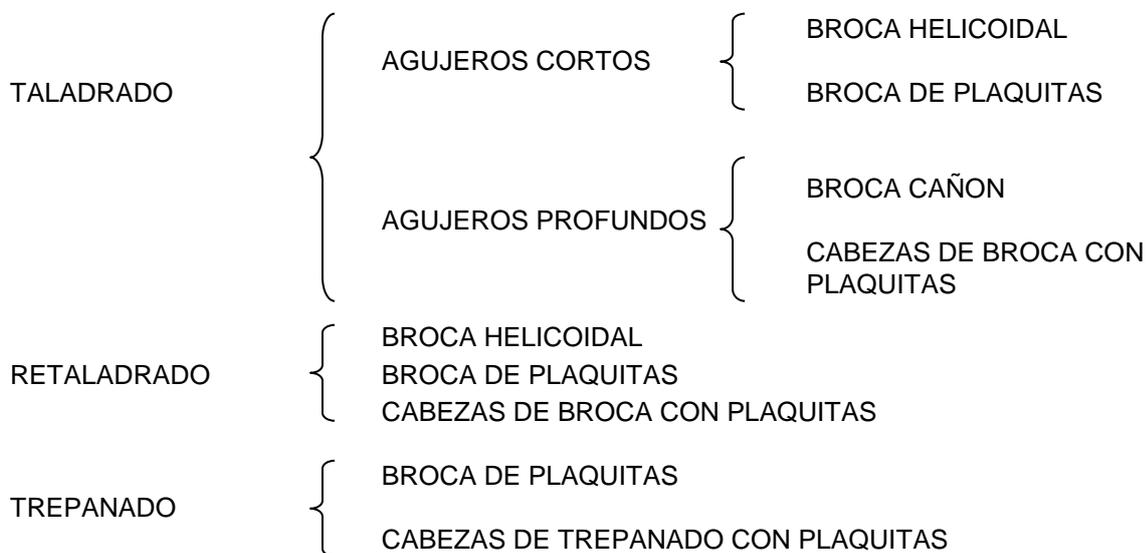


Fig. 12.2 Tipos de herramientas para taladrar. Elaboración propia

- El *taladrado* sirve para hacer el primer agujero, muchas veces el único.
- El *retaladrado* se utiliza para agrandar un taladro previo. Es necesario para taladros de diámetros grandes (no pueden realizarse con una única broca).
- El *trepanado*, por último, realiza el taladro dejando un núcleo central de material que no se mecaniza.

12.3.1 Broca helicoidal

La broca helicoidal tiene la forma que se representa en la figura 12.1. En ella se distinguen las siguientes partes:

- La punta está formada por dos conos desplazados del eje de la broca, cuya intersección se denomina filo transversal. La intersección de los conos con la hélice genera dos aristas rectas (filos principales o labios) y dos aristas curvas.

La superficie de cada cono comprendida entre la arista curva y la recta se denomina talón.

- El cuerpo es la parte de la broca con forma helicoidal. No tiene una función de corte, pero sirve para centrar la broca y conducir la viruta al exterior del agujero a través de sus ranuras helicoidales. En el cuerpo se distinguen dos partes importantes:
 - El núcleo, sección central que no tiene forma helicoidal y que constituye la columna de la broca. Su espesor es de 0,14 a 0,20 veces el diámetro, aunque aumenta progresivamente al alejarnos de la punta para dar mayor resistencia a la broca.
 - La faja, o parte helicoidal, que se rebaja, pues sino rozaría demasiado en las paredes del agujero. La parte no rebajada se denomina faja-guía, de un espesor (f) determinado.

El cuerpo de la broca no es de un diámetro uniforme; tiene una ligera conicidad de 0,05 a 0,1 por ciento.

- El mango o vástago, zona por la que se amarra la broca. Pueden ser cónicos (cono Morse) o cilíndricos. Algunas brocas tienen un estrechamiento entre el cuerpo y el mango, que se denomina cuello.

En la broca encontramos, al igual que en todas las herramientas utilizadas en el arranque de viruta, los ángulos ya conocidos:

- ángulo de incidencia (α)
- ángulo de filo (β)
- ángulo de desprendimiento (γ), que se corresponde, aproximadamente, con el ángulo de la hélice.

Además, en las brocas, existen otros dos ángulos importantes:

- el ángulo de punta (ϵ)
- el ángulo de los filos transversales (λ), que suele ser de 55 grados.

En función de los materiales empleados en su fabricación, se distinguen los siguientes tipos de brocas helicoidales:

- Brocas de acero al carbono, utilizadas para taladrar maderas.
- Brocas de acero rápido (HSS), con o sin recubrimiento de TiN, TiCN, etc.

- Brocas enterizas de metal duro, con o sin recubrimiento de TiN, TiCN, etc.
- Brocas con punta de metal duro soldada.
- Brocas helicoidales con plaquitas intercambiables.
- Brocas de cerámica.
- Brocas con punta de diamante.

Algunas brocas llevan en su interior conductos para la refrigeración del taladrado, que desembocan en los talones después de recorrer el interior de la broca helicoidalmente.

12.3.2 Brocas de plaquitas intercambiables

Al igual que en las herramientas de torneado, se utilizan brocas formadas por un cuerpo o soporte y una o, generalmente varias, plaquitas de corte de metal duro. Este tipo de brocas también pueden disponer de un sistema de refrigeración interior. Estos son los distintos tipos:

- Brocas helicoidales con plaquitas trigonales, triangulares y especiales para taladrado.
- Brocas rectas con las mismas plaquitas.
- Brocas de lamas.
- Cabezales para taladros profundos con plaquitas cuadradas, triangulares y especiales (para pequeños diámetros los hay con plaquitas soldadas).
- Brocas trepanadoras con plaquitas.

Los cabezales de taladrar se utilizan para realizar taladros profundos de mediano y gran diámetro, utilizando máquinas especiales con las que se llega a profundidades de taladrado de hasta 100 veces el diámetro.

12.3.3 Brocas cañón

Se utilizan para realizar taladros profundos de pequeño y mediano diámetro y profundidad incluso superior a 100 veces su diámetro (hasta 200 veces en algunos casos).

Las velocidades de corte empleadas son muy grandes (4 a 6 veces mayores que en el caso de las brocas helicoidales) y se utilizan un fluido de corte bombeado a presión por el interior de la broca, que evacua las virutas, arrastrándolas hacia atrás por el canal exterior de la broca, en forma de V.

12.4 Sistemas de sujeción de herramientas y piezas.

12.4.1 Sujeción de herramientas

Lo más importante a la hora de sujetar la herramienta para que gire solidaria al husillo principal es que dicho giro sea concéntrico. Los sistemas de sujeción más empleados son:

- Ajuste del cono morse en la cavidad cónica del husillo, en el caso de brocas con mango cónico.
- Portabrocas, en el caso de brocas de mango cilíndrico. Estos son, generalmente de tres garras.
- Cualquiera de los múltiples sistemas modulares o enterizos existentes en el mercado. Son sistemas que terminan en un cono normalizado (ISO-40, por ejemplo) que ajusta perfectamente en un alojamiento también cónico del husillo. Estos adaptadores y conos se estudiarán ampliamente en el tema referente a las herramientas utilizadas en las operaciones de fresado.

12.4.2 Sujeción de piezas

Al taladrar se producen momentos de giro que tienden a mover la pieza, por lo que ésta ha de sujetarse de forma correcta y segura. Cuando las piezas son suficientemente grandes, su propio peso las mantiene fijas. En las pequeñas, sin embargo, hay que utilizar un sistema de fijación.

Los más utilizados se enumeran a continuación. Al ser los mismos que se utilizan en las operaciones de fresado, aquí simplemente se enumeran:

- Sujeción mediante bridas, calzos, tornillos y tuercas en "T", que se alojan en las ranuras de la mesa.
- Sujeción con mordazas.
- Prismas con "V" y tornillos de apriete.
- Platos de garras.

- Utillajes especiales, que se proyectan para la realización de un trabajo concreto, en series grandes. Con ellos se pretende reducir tiempos de fabricación, facilitando el posicionado y la fijación de las piezas.

12.5 Selección de parámetros de corte en el taladrado

Dos son los parámetros que hay que determinar en una operación de taladrado:

a) Velocidad de corte (V_c): en m/min, entendiéndose como tal la del punto más exterior del filo de la broca, pues según vamos hacia el centro, disminuye.

La velocidad de corte depende, como en todo proceso de mecanizado, del material de la pieza que se va a taladrar y del material de la herramienta, además de otros factores secundarios, tales como la rigidez de la máquina, la refrigeración empleada, etc.

b) Avance (a): en mm/rev. En su elección interviene, además de los factores ya mencionados en la velocidad de corte, el diámetro de la broca que se utiliza.

Del avance dependen, a su vez, magnitudes tan importantes como el espesor de viruta, la fuerza de avance necesaria y la calidad superficial del taladro realizado.

12.6 Fuerzas y potencia en el taladrado

Las fuerzas que aparecen en el proceso de taladrado con broca helicoidal se suponen concentradas en el centro de cada filo de la punta. Cada una de estas fuerzas se pueden descomponer en dos:

- una fuerza tangencial ($F_c/2$) la fuerza de corte,
- otra perpendicular ($F_R/2$) al filo en el plano que pasa por el eje de la broca.

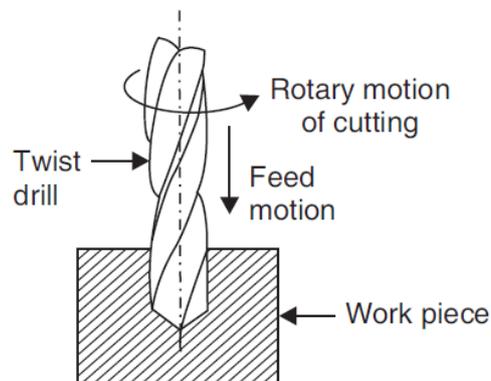


Fig. 12.3 Movimientos en el taladrado. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009

12.6.1 Esfuerzos

12.6.1.1 Fuerza de corte

La fuerza de corte (F_c) es la que se opone al filo de la broca y es proporcional a la sección de la viruta cortada, que se calcula a partir de la expresión:

$$S = \frac{a}{2} \frac{D}{2} = \frac{a D}{4}$$

en donde:

a = avance en mm/rev

D = diámetro de la broca

La fuerza de corte será, por tanto, el producto de la sección de viruta por la componente de la fuerza específica de corte en la dirección de F_c (p_{sc}), es decir:

$$\frac{F_c}{2} = p_{sc} \frac{a D}{4}$$

con lo que:

$$F_c = p_{sc} \frac{a D}{2}$$

12.6.1.2 Fuerza de avance

La fuerza $F_R/2$, al igual que F_c , es también proporcional a la sección de viruta (S), siendo p_{sR} (componente de la fuerza específica de corte en la dirección de F_R) la constante proporcional, con lo que:

$$\frac{F_R}{2} = p_{sR} \frac{a D}{4}$$

Esta fuerza puede, a su vez, descomponerse en otras dos:

- una paralela al eje ($F_p/2$), y
- otra perpendicular a él ($F'_p/2$).

Las dos fuerzas $F'_p/2$, una por cada filo, se anulan entre sí, pues son de sentido contrario e igual magnitud.

Las fuerzas $F_p/2$ son, sin embargo, las que se oponen al avance de la broca. Su valor puede calcularse en función de $F_R/2$, ya que:

$$\frac{F_p}{2} = \frac{F_R}{2} \operatorname{sen} \frac{\varepsilon}{2}$$

con lo que:

$$F_p = p_{sR} \frac{a D}{2} \operatorname{sen} \frac{\varepsilon}{2}$$

12.6.2 Potencia

12.6.2.1 Momento torsor

El momento de giro que debe darse a la broca en el proceso de taladrado será:

$$M = F_c \frac{D}{4} = p_{sc} \frac{aD}{2} \frac{D}{4} = p_{sc} \frac{a D^2}{8}$$

pues al suponer concentradas las fuerzas en el centro del filo, el brazo de giro es D/4.

12.6.2.2 Potencia de corte

La potencia absorbida por la broca es la suma de la consumida por ambas fuerzas: la de penetración y la de corte; pero, como la broca avanza a muy poca velocidad, puede despreciarse la potencia consumida por su fuerza, resultando:

$$P_c = p_{sc} \frac{a D V_c}{2} = p_{sc} \frac{a D V_c}{4}$$

12.6.3 Gráficos de potencia y fuerza de avance

Los valores de p_{sc} y p_{sR} dependen del material a taladrar y se encuentran en tablas o gráficos. Resulta más práctico, en cambio, disponer directamente de gráficos que permitan evaluar la magnitud de la potencia y la fuerza de avance necesarias.

Estos gráficos son relativos a distintos tipos de brocas:

- brocas de acero rápido recubierto,
- brocas enterizas de metal duro recubierto,
- brocas con punta de metal duro soldada,
- brocas con plaquitas intercambiables,
- brocas de trepanar con plaquitas intercambiables,
- cabezales de taladrar con plaquitas soldadas o intercambiables,
- brocas cañón.

12.7 Cálculo de tiempos en el taladrado

La determinación del tiempo de corte en el taladrado es muy sencilla. La longitud total en la que el filo de broca arranca viruta es:

$$L = l + 0,3D$$

en donde:

l = longitud del taladro

D = diámetro de la broca

El ángulo de punta que se utiliza normalmente es de 120 grados, resultando una longitud de punta de 0,3 veces el diámetro, aproximadamente.

El tiempo de taladrado será, por tanto:

$$t_t = \frac{L}{V_a} = \frac{l + 0,3D}{a n} = \frac{(l + 0,3D)2\pi}{a V_c 1000}$$

A este tiempo de corte habrá que añadirle:

- El tiempo invertido en el movimiento de aproximación, y
- El tiempo invertido en el movimiento de retroceso de la broca, una vez realizado el taladro.

13. PROCESOS COMPLEMENTARIOS

13.1 Avellanado

La operación de avellanado tiene como misión preparar un taladro para el alojamiento de la cabeza de un tornillo o el asiento correcto de la misma o de una arandela. Para ello, se emplean herramientas de las formas más variadas con las que se realizan:

- Cajeras cilíndricas para alojamientos de tornillos tipo DIN 912, utilizando un avellanador cilíndrico de corte frontal con o sin espiga, que sirve de guía.
- Avellanados cónicos, para alojamientos de tornillos de cabeza avellanada (DIN 7991, por ejemplo). Se utiliza un avellanador cónico con un ángulo de punta que depende del tipo de alojamiento que se quiere realizar.
- Desbarbado de taladros, utilizando el mismo tipo de herramienta (avellanador cónico, normalmente de 60 grados).
- Refrentado de superficies de apoyo, utilizando una cuchilla plana. Se suele realizar sobre cubos y tetones.

El resto de características del proceso es exactamente igual a las estudiadas para el taladrado.

13.2 Escariado

Los taladros que se realizan con brocas no suelen tener un buen acabado superficial ni unas medidas con tolerancias estrechas, aunque hay brocas que dan una tolerancia del agujero IT8 y un acabado superficial de $R_a = 1 \mu\text{m}$.

Cuando se quieren conseguir taladros en mejores condiciones es preciso recurrir a la operación de escariado que utiliza una herramienta de varios filos denominada escariador. La operación de escariado requiere siempre un taladro previo.

El escariado puede realizarse a mano o con máquina. En el primer caso se utilizan escariadores de largos dientes, que permiten su guiado correcto. Los utilizados en máquina tienen filos más cortos.

Los dientes del escariador pueden ser rectos o helicoidales y es importante no girar nunca el escariador hacia la izquierda, pues se rayaría la superficie con las virutas y se corre el riesgo de romper los dientes. Existen también escariadores cónicos para acabar taladros de poca conicidad.

Para finalizar el proceso de escariado, se facilitan dos tablas muy prácticas:

- Valores orientativos de diferencias entre los diámetros del taladro previo y del escariado para distintos materiales de pieza y dimensiones.
- Valores orientativos de los parámetros de corte en el escariado.

14.ROSCADO CON MACHO

El roscado ya ha sido estudiada en el capítulo de torneado. En éste se profundiza algo más, incidiendo en la herramienta utilizada y el proceso seguido. Antes de proceder al roscado hay que realizar un taladro previo, de un diámetro mayor que el diámetro del núcleo de la rosca, pues en la operación se producen rebabas. Existen tablas, para el caso de roscas métricas, para obtener el valor de los taladros previos al roscado.

El macho de roscar puede ser de mano (y, generalmente, se utilizan juegos de tres machos, o de máquina (que suele ser único).

Los machos de roscar suelen ser de acero rápido y existen velocidades recomendadas para cada modelo.

15. RECTIFICADO

15.1 Tipos de rectificado

El rectificado es un procedimiento de conformación por arranque de viruta basado en la acción cortante de unos cuerpos abrasivos llamados muelas. Una muela cualquiera se compone del abrasivo propiamente dicho, en forma de granos, y de un producto aglomerante cuya misión es aglutinarlo.

Tal como se ha dicho, el corte lo efectúan los granos abrasivos, cuya dureza es superior a la del material que se trabaja, y cuyas aristas de corte responden a las formas más variadas, aunque los ángulos de corte son generalmente negativos.

La alta velocidad de corte desarrollada (de ordinario muy superior a la de otras máquinas herramientas), junto con la capacidad de arrancar virutas microscópicas, permiten alcanzar precisiones y calidades superficiales imposibles de obtener por otros procedimientos. Por esta razón, el rectificado es un método de trabajo que se emplea para acabar piezas mecanizadas con anterioridad con las demasías adecuadas (torneadas, fresadas, etc.), cuando sus características mecánicas así lo aconsejan.

El rectificado también resulta imprescindible para mecanizar piezas de gran dureza superficial, como es el caso de las piezas templadas.

El rectificado requiere como mínimo la conjunción de tres movimientos: el de corte, realizado por la muela; el de avance o alimentación, realizado por la pieza y el de penetración, que casi siempre lo efectúa la muela.

Por otro lado, el rectificado se aplica a superficies de revolución de generatrices rectas (cilíndricas, cónicas...) o curvas y también a superficies planas.

En consecuencia, las diversas variedades de rectificado dependen de la combinación armónica de los movimientos necesarios y de la naturaleza geométrica de las superficies a trabajar.

A grandes rasgos, los rectificados más importantes son:

- Rectificado plano con muela frontal
- Rectificado plano con muela tangencial
- Rectificado cilíndrico exterior

- Rectificado cilíndrico interior
- Rectificado sin centros
- Rectificado de perfiles.

Cuando el rectificado sirve para obtener las caras de corte de una herramienta, entonces se denomina afilado y se realiza en máquinas especializadas. Su estudio se realizará en los temas finales del presente texto.

15.1.1 Rectificado plano con muela frontal.

En este sistema el eje de la muela es perpendicular a la superficie que debe rectificarse. Por consiguiente, la muela, que es cilíndrica, ataca la pieza por su cara frontal, mientras gira a una velocidad de corte determinada (movimiento de corte); al mismo tiempo avanza periódicamente en dirección axial hacia la pieza, lo que constituye el movimiento de penetración a_v que ocasiona la profundidad de pasada.

La pieza se desplaza longitudinalmente a una velocidad v_p y transversalmente con un avance a_t si el ancho a rectificar es mayor que el diámetro de la muela; no obstante, en algunas máquinas, estos movimientos los realiza la muela.

15.1.2 Rectificado plano con muela tangencial.

La disposición básica de este procedimiento es el paralelismo existente en el eje de la muela y la superficie a rectificar. La muela arranca la viruta trabajan con su periferia, lográndose así rectificados de mayor calidad superficial y precisión, debido al escaso contacto entre la pieza y la muela que, teóricamente, se reduce a la tangencia de una superficie plana con la cara lateral de un cilindro.

La muela está animada de un movimiento de rotación sobre un eje v_m al mismo tiempo que dispone de un desplazamiento vertical a_v al término de cada pasada completa. Por su parte, la pieza se mueve longitudinalmente para conseguir el avance o alimentación v_p y también transversalmente a_v cuando finaliza una pasada completa, en función del ancho de la muela y de la calidad que se desea obtener.

15.1.3 Rectificado cilíndrico exterior.

Este trabajo se efectúa mediante un movimiento de rotación de la muela v_m que, a su vez, dispone de otro transversal que origina la profundidad de pasada a_t . La pieza gira sobre el eje v_p y también tiene otro desplazamiento rectilíneo, aunque ahora es longitudinal, a_l para que toda la pieza entre en contacto con la muela.

Cuando se trabaja por penetración radial (rectificado en plongée) dicho desplazamiento a_l no existe.

Si la pieza a rectificar es cónica en lugar de cilíndrica, los movimientos a efectuar no varían.

15.1.4 Rectificado cilíndrico interior.

Los movimientos necesarios para el rectificado interior son idénticos al caso anterior. Varía únicamente la disposición de la muela, que va montada en un vástago, al aire, así como la forma de sujetar la pieza, que no debe ofrecer ningún obstáculo a la penetración de la muela.

15.1.5 Rectificado sin centros.

Es un procedimiento muy original que consta de una muela de trabajo, que gira a velocidad v_m y de otra de menor diámetro, llamada muela de arrastre, que se mueve en el mismo sentido que la primera y cuyo eje está ligeramente inclinado.

La pieza a rectificar se encuentra aprisionada entre el par de muelas y una regla de gran dureza, que la sostiene por su parte inferior. Dicha pieza, como consecuencia de la disposición particular de la muela de arrastre experimenta un avance longitudinal a_l , al mismo tiempo que gira sobre su eje (v_p).

15.1.6 Rectificado de perfiles.

El rectificado de perfiles diversos exige la preparación previa de la muela a emplear de modo que ésta adquiriendo la forma que se desea obtener. Por consiguiente la penetración de la muela a_v sobre la pieza siempre será radial, ya sea rectilíneo o circular el perfil que se trabaje.

15.1.7 Rectificados especiales.

Se refieren a superficies cuya rectificación suele ser problemática y exige, casi siempre, el empleo de maquinaria específica. Tal es el caso del rectificado de los filetes de una rosca, los flancos de los dientes de una rueda dentada, el perfil de una leva, etc.

15.2 Muelas abrasivas

El rectificado se basa en las propiedades cortantes de unos productos de gran dureza y resistencia al calor, denominados abrasivos, contenidos en las muelas.

Estos abrasivos, reducidos a granos de tamaño mínimo, están dispersos de la forma más homogénea posible en el seno de una masa aglutinante que los sostiene y que, a la vez, permite conformar la herramienta abrasiva o muela, de modo que sea apta para el trabajo de esmerilado.

Examinando una muela, se puede apreciar, incluso a simple vista, los granos abrasivos cohesionados por el aglomerante, que no llega a ocupar todo el espacio intergranular, sino que aparece dejando poros de tamaño variable cuya existencia es imprescindible para un mecanizado correcto.

En efecto, las partículas de material arrancadas por los granos abrasivos se depositan en los poros de la muela hasta ser proyectados por la fuerza centrífuga, muchas veces en estado incandescente, formando un haz de chispas característico.

Las aristas de corte de los granos presentan las formas más variadas e irregulares, aunque los ángulos de corte suelen ser negativos.

En el transcurso del esmerilado los granos activos sufren un proceso de desgaste que los va aplanando hasta llegar al punto en que se rompen los puentes de aglomerante que los sostenían, con lo cual, los granos achatados se desprenden, aflorando enseguida otros nuevos con los cantos vivos.

15.2.1 Clases de abrasivos

En primer lugar están los abrasivos naturales, como el cuarzo, el esmeril, el corindón natural, etc.; todos ellos tienen poco interés industrial, a excepción del diamante.

Los abrasivos más empleados son los artificiales, sobre todo el corindón artificial y el carburo de silicio. También están el diamante artificial y el nitruro de boro.

- Corindón artificial.

Está compuesto de alúmina (óxido de aluminio, Al_2O_3) y se obtienen a partir de la bauxita, por fusión en el horno eléctrico a unos 2000 °C.

Es adecuado para trabajar materiales tenaces como la mayoría de los aceros, el hierro dulce, la función maleable y el bronce tenaz.

Comercialmente adopta diversos nombres, según los fabricantes (alúndum, aloxite, bauxilite, etc). Su dureza en la escala de Mohs es de 9,21.

- Carburo de silicio.

Es un compuesto de carbono y silicio, cuyo símbolo químico es SiC. Se obtiene por fusión de una mezcla de arena de cuarzo, coque de petróleo, serrín y sal común, en un horno eléctrico de resistencia.

Es más duro que el coridón (9,75 en la escala de Mohs) pero menos tenaz. Por esta razón, se emplea para trabajar materiales quebradizos, como el metal duro, la fundición, la porcelana, etc., y también para materiales dúctiles muy blandos tales como el latón, el aluminio, etc.

Comercialmente recibe los nombres de carborúndum, crystolon, sicilit, unirúndum, etc.

15.2.2 Tamaño del grano.

El abrasivo se obtiene en bloques grandes que, luego, son triturados y molidos y, por último, clasificados en tamaños por medio de tamices o cribas.

Dichos tamaños se designan por un número que corresponde al número de hilos por pulgada lineal que tiene el tamiz empleado.

15.2.3 Aglomerante.

Como ya se ha dicho, el aglomerante es la liga o cemento que mantiene unidos los granos abrasivos de una muela. Se designa por una letra específica.

Hay cuatro aglomerantes principales:

Vitrificado (V): Es el aglomerante más común, usado en el 75 % de las muelas. Es de naturaleza cerámica, obtenido a elevadas temperaturas. Debido a su porosidad y a las particularidades del empastado, tiene una gran capacidad abrasiva. Es insensible a la humedad y al frío, siendo su porosidad favorable al esmerilado húmedo.

Resiste bien la fuerza centrífuga, pero resulta frágil a los choques mecánicos y térmicos debido a su poca elasticidad y su mala conductibilidad.

Resinoide (B): Es adecuado para la fabricación de muelas delgadas poco sensibles a la presión y a los choques.

Puede usarse con seguridad en muelas de alta velocidad y es ideal para discos de corte por abrasión.

Goma (R): Se usa cuando se requiere una muela muy fina, de gran resistencia, puede obtenerse un espesor mínimo de 0,2 mm.

Las muelas de goma deben funcionar a gran velocidad (3.000 a 5.000 m/min) para que la fuerza centrífuga mantenga el perfil. Se emplea también para pulidos muy delicados y para muelas de arrastre de rectificadoras sin centros.

Una variante del mismo es la goma laca (E).

Silicato (S): No suele emplearse en el rectificado de precisión. Posee gran potencia esmeriladora y es apropiado para el esmerilado plano.

15.2.4 Grado de dureza de la muela

Se entiende por grado de una muela la mayor o menor tenacidad con la que el aglomerante retiene los granos de abrasivo.

En la práctica, una muela se llama blanda, cuando sus granos se separan fácilmente durante el trabajo, se llama dura en el caso contrario.

En principio, una muela tiene el grado adecuado para un trabajo determinado, cuando su blandura es la necesaria y suficiente para que la superficie cortante de la misma no se aplane y embote (recuérdese el abrillantado característico que toma la muela cuando no corta).

Factores a considerar en la elección del grado de una muela, son:

Características del material a mecanizar

Las muelas blandas son adecuadas para trabajar materiales duros y viceversa. No obstante, para rectificar aceros templados con salida de muela suelen utilizarse muelas de dureza media. Para aleaciones no ferrosas emplearemos muelas menos duras que las usadas para mecanizar acero.

Precisión de mecanizado

Al aumentar la precisión el grado de la muela debe elevarse, para evitar continuos reglajes de la máquina provocados por el rápido desgaste de la muela.

Forma de la superficie a mecanizar.

Para el desbaste en el rectificado plano, las muelas, ya sean enteras o de segmentos, deberán ser blandas, de modo que el mismo trabajo provoque el autoafilado de la muela; es decir, que la caída de los granos abrasivos se produzca de tal forma que no exista riesgo de embotamiento.

Para rectificar piezas con radios pequeños, ángulos poco abiertos o perfiles complicados es necesario aumentar la dureza de la muela, especialmente si el trabajo es de responsabilidad, para evitar continuos retoques de la muela.

También hay que tener presente que, a mayor velocidad, la muela se comporta como si tuviera mayor grado que el que realmente le corresponde; ocurre todo lo contrario si trabaja con poca. Por consiguiente, si una muela no alcanza la velocidad apropiada, debido a las condiciones de trabajo (rectificado de agujeros de pequeño diámetro, por ejemplo), su grado debe ser mayor de lo normal.

15.2.5 Estructura.

Se entiende por estructura de una muela la relación cuantitativa de tres factores: grano, aglomerante y porosidad. Para hacer más comprensible este concepto se puede definir la clase de estructura por el grado de porosidad. Es decir, una estructura muy compacta o cerrada será la que tiene los poros muy pequeños y los granos casi juntos; una estructura abierta tendrá, por el contrario, los granos separados y grandes poros entre ellos

Según lo dicho, la estructura se clasifica en tres categorías, representadas por diferentes números que se distribuyen del 0 al 14 o más.

Las muelas de estructura cerrada se emplean para acabado fino y rectificado de precisión; las de estructura abierta media, para desbaste y las de estructura muy abierta, para trabajos donde exista peligro de sobrecalentamiento, por que su gran porosidad favorece la penetración del refrigerante.

Como datos orientativos se puede establecer que en una estructura cerrada el volumen de grano está entre el 60 y el 54 %; en una media, entre el 52 y el 46 % y en una estructura abierta los granos no suponen más que una cifra que oscila entre el 44 y 38 %.

15.2.6 Forma de las muelas.

La norma UNE 16-300-75 señala siete formas típicas de muela que se designan por un número del modo siguiente:

- Muelas planas, tipo 1 (A)
- Muelas planas con escote, tipo 5 (B)
- Muelas planas con dos escotes, tipo 7 (C)
- Muelas de vaso, tipo 6 (D)
- Muelas de copa, tipo 11 (E)
- Muelas de plato, tipo 12 (F)
- Muelas de disco embutido, tipo 27 (G).

15.2.7 Designación de una muela.

La designación completa de una muela comprende tres factores, indicados por este orden:

- Forma de la muela. Se indica el tipo correspondiente.
- Dimensiones. Las medidas de los diámetros exterior, espesor y diámetro del agujero en milímetros.
- Especificación. Las características propias de la muela.

Para designar las especificaciones se emplean siete símbolos que hacen referencia a otras tantas características o datos, tres de los cuales son facultativos, colocados de este modo:

- Tipo de abrasivo. Propio del fabricante (facultativo).
- Naturaleza del abrasivo. A, para los aluminios (coridón...); B, para los de carburo de silicio (carborúndum).
- Tamaño del grano.
- Grado.
- Estructura (facultativo).
- Naturaleza del aglomerante.
- Tipo de aglomerante. Propio del fabricante (facultativo).

Como ejemplo, analicemos una muela designada con el símbolo general 51 S-36-L-5-V 32. El significado de cada uno de los símbolos parciales es el siguiente:

- 51, tipo de abrasivo (código del fabricante).

- A, Naturaleza del abrasivo (coridón).
- 36, tamaño del grano.
- L, Grado.
- 5, Estructura.
- V, Naturaleza del aglomerante (vitrificado).
- 32, tipo de aglomerante (código del fabricante).

Por consiguiente, la designación completa de una muela plana de 300 x 40 x 32 con las especificaciones anteriores sería.

1 muela tipo 1, de 300 x 40 x 32 51 A - 36 - L - 5 -V32

Para más detalles, así como para conocer las dimensiones y características normalizadas de diversas muelas, consultar las normas UNE 16-300-75 y siguientes.

15.2.8 Montaje y equilibrado de las muelas.

15.2.8.1 Montaje de las muelas

El montaje de las muelas tiene gran importancia para conseguir un trabajo correcto. Por ello, es preciso tener en cuenta unas cuantas normas sencillas y de fácil ejecución, encaminadas, como se ha dicho, a lograr un esmerilado correcto pero, especialmente, a evitar accidentes.

Antes de montar la muela es preciso asegurarse que sus características son las indicadas para el trabajo a realizar. También debe comprenderse su estado haciendo la prueba del sonido. En este caso, golpeando con suavidad la muela, suspendida libremente, con un mazo, debe oírse un sonido claro; si no es así, habrá que desecharla porque tiene probablemente fisuras internas.

- Las muelas de aglomerante resinoide no tienen sonoridad, pero debido a sus propiedades elásticas no tienen tendencia a agrietarse.
- La muela deberá introducirse en su asiento sin forzarla en absoluto y asimismo, tampoco se montará con juego excesivo. Si el diámetro del árbol es inferior al del agujero de la muela, se dispondrá entre ambos el casquillo correspondiente.
- La sujeción y arrastre de la muela se efectúa mediante dos bridas cóncavas, en forma de platillo, cuyos diámetros, iguales entre si, deben ser 1/3 del de la muela, como mínimo.
- Entre las bridas y la muela hay que poner unos discos de cartón fino (con frecuencia los llevan las muelas) para que el contacto sea más completo.
- La tuerca de cierre debe apretarse sin exagerar. Es muy conveniente comprobar que la rosca no tienda a aflojarse cuando la muela está en movimiento.

Las posibles fijaciones a emplear pueden reducirse a estas cuatro:

Fijación directa sobre el husillo

La muela se introduce en el árbol y se sujeta entre dos bridas que se aprietan por medio de una tuerca. Si la muela es de dimensiones notables conviene introducir lengüeta de arrastre.

Estos sistemas se emplean para muelas de hasta 300 mm de diámetro.

Fijación sobre útil portamuelas

Se emplea para muelas de gran diámetro. El útil consiste en dos platos P y M que se acoplan entre sí, ajustando por el cuello C, mientras la muela asienta sobre el diámetro D. Una vez fijado todo el conjunto por los tornillos que lleva, se monta en el asiento cónico A y se asegura apretando la tuerca de cierre.

La extracción se realiza después de soltar la tuerca, roscando un extractor en R que, al hacer tope en el extremo del árbol, ocasionará la salida del conjunto de platos y muela.

Fijación por tornillo

Este sistema es propio de muelas pequeñas. Por lo tanto, es habitual en los rectificadores interiores.

También se emplea para sujetar las porciones de abrasivo en las muelas de segmentos.

Fijación sobre vástago propio

Se limita su empleo a muelas muy pequeñas que se sueldan o encolan sobre un eje de acero. En estas condiciones, la muela, provista de vástago, se fija ordinariamente con una pinza o plato.

15.2.8.2 Equilibrado de las muelas

Por regla general, las muelas presentan cierta excentricidad en sus agujeros, un ligero error de paralelismo entre sus caras y una densidad irregular en toda su masa, debidas a la propia naturaleza del producto y al proceso de fabricación empleado.

La consecuencia de ello es que las muelas están desequilibradas. Emplear una muela desequilibrada tiene muchos inconvenientes porque la fuerza centrífuga no compensada provoca vibraciones que se transmiten a la máquina y, en último término, al trabajo efectuado. El resultado es una pérdida de precisión y en casos extremos se puede llegar a la rotura de la muela.

El objeto del equilibrado estático de la muela se realiza con ayuda de un útil y de unos contrapesos móviles que llevan las bridas o platos portamuelas. Estos contrapesos, en número par (ordinariamente dos o cuatro), encajan en una ranura circular del plato y se fijan en la posición deseada mediante un tornillo que los obliga a presionar contra los laterales de su alojamiento.

15.3 Tipos de rectificadoras

Las operaciones de rectificado se realizan en unas máquinas herramientas llamadas rectificadoras. La diversidad de rectificados posibles condiciona las características constructivas de las rectificadoras, de modo que, según lo dicho, se puede establecer una clasificación orientativa de los distintos modelos existentes, sin olvidar que ciertas máquinas tienen capacidad universal, es decir, pueden efectuar varios rectificados.

Así pues, el cuadro general queda de la siguiente manera:

- Rectificadora plana:
 - Rectificadora frontal: - de movimiento rectilíneo
 - Rectificadora tangencial: - de movimiento circular
- de movimiento pendular
- Rectificadora cilíndrica: - de exteriores
- de interiores
- universal
- Rectificadora sin centros
- Rectificadora de perfiles
- Rectificadoras especiales: de roscas, de engranajes, de levas, de perfiles, de árboles ranurados, etc.

15.3.1 Rectificadoras de superficies planas

Existen dos modelos fundamentales de rectificadora para superficies planas, definidos por la posición del eje de rotación de la muela: si éste es vertical, la rectificadora se llama frontal y, si por el contrario, ocupa la posición horizontal, se trata de una rectificadora tangencial.

15.3.1.1 Rectificadora frontal de superficies planas.

Esencialmente, esta rectificadora se compone de un cabezal portamuelas de eje vertical y de una mesa portapiezas. El movimiento principal de corte lo produce siempre la muela al girar, así como el de penetración, el movimiento de avance o alimentación depende de la pieza y, a veces, de la muela según los casos.

Se pueden establecer tres tipos de rectificadoras planas frontales: el de mesa con movimiento rectilíneo alternativo; el de mesa circular y el de cabezal oscilante o pendular.

15.3.1.2 Rectificadora frontal de mesa alternativa

Consta de una bancada sobre la que se eleva una columna o montante que sostiene el cabezal. Dicho cabezal se desliza sobre guías plano-prismáticas de ajuste verificable por medio de regletas y lleva el husillo en cuyo extremo se fija una muela de vaso, provista de la protección conveniente.

La muela gira impulsada por una transmisión de correa, con el motor montado en la cara posterior del cabezal, lo que permite la obtención de varias velocidades, aunque las máquinas más modernas disponen de motor de dos velocidades acoplado directamente a la muela o bien de un motor de corriente continua de velocidad variable.

La mesa de la máquina se mueve alternativamente en dirección longitudinal y carece de movimiento transversal. Su accionamiento se efectúa, principalmente, por sistema oleohidráulico o mecánico.

Las piezas se fijan ordinariamente al plato magnético que lleva la máquina para este fin.

El plato magnético es un bloque de acero anclado a la mesa por la parte inferior y que, por la parte superior, tiene una superficie plana dotada de polos magnéticos alternados, separados por un metal no férreo. Hay dos clases de platos magnéticos: los electromagnéticos y los de imán permanente.

En los platos electromagnéticos la imantación se produce por medio de electroimanes alimentados por corriente continua que proviene de un rectificador conectado a la red de corriente alterna. Deben dotarse de un dispositivo de seguridad contra faltas de corriente porque, si ésta cesa, se podrían producir proyecciones de piezas al no existir magnetismo.

Los platos de piezas de imán permanente están compuestos de imanes rotativos encerrados en una masa de acero dulce que se imana o desimana con gran facilidad. La posición de los imanes móviles se regula desde el exterior a través de una palanca de conexión-desconexión.

Una vez mecanizadas, conviene pasar las piezas por un desimantador, para eliminar el remanente magnético que proviene de su contacto con el plato, entre otras razones porque atraen las virutas metálicas.

15.3.1.3 Rectificadora frontal de mesa circular

Es una máquina de gran producción. Funcionalmente es similar al tipo anterior pero presenta grandes diferencias constructivas especialmente en lo que a la mesa se refiere. En efecto, el movimiento de alimentación ya no es rectilíneo sino circular. Es una máquina de gran robustez y la mayor potencia de su cabezal portamuelas cuyo motor puede llegar a los 50 CV de potencia.

La mesa circular es desplazable con objeto de realizar la carga y descarga de piezas con toda facilidad. Es del tipo electromagnético, para poder sujetar las piezas sin dificultad y gira a velocidad variable impulsada por un piñón que engrana con una corona atornillada en su parte interna.

Algunas máquinas son de ciclo automático y pueden realizar esta secuencia de operaciones:

- Traslación automática de la mesa desde la posición de carga hasta debajo del cabezal.
- Descenso rápido del cabezal.
- Puesta en marcha de la muela y la mesa portapiezas.
- Avance vertical automático, a la medida y compensación automática del desgaste de la muela.
- Subida rápida del cabezal.
- Retorno de la mesa.
- Apertura y cierre del paso de refrigerante.

15.3.1.4 Rectificadora frontal de cabezal oscilante.

En esta máquina la pieza no tiene ningún movimiento puesto que permanece en reposo sobre la mesa, mientras el cabezal efectúa el movimiento de avance y el de penetración, además del de corte, propio de la muela. Esta máquina tiene poca precisión y es apta únicamente para trabajos de poca precisión.

Para ello, el cabezal puede pivotar alrededor de una columna fija a la bancada, movido por el operario, que empuja una abrazadera que para este propósito lleva el cabezal. Al mismo tiempo, va dando la profundidad de pasada, moviendo el volante con la mano libre.

15.3.1.5 Rectificadora tangencial de superficies planas

Es una máquina de gran precisión destinada al rectificado de superficies planas por contacto tangencial de la periferia de una muela cilíndrica de eje horizontal con la pieza a mecanizar. También se pueden realizar piezas de forma con generatrices rectas, empleando una muela perfilada en la misma máquina.

Consta de una sólida bancada en cuya parte posterior se apoya el montante que sirve de guía al cabezal portamuelas. En unas guías que lleva la bancada desliza un carro transversal que, a su vez, sostiene la mesa de la máquina, dotada de movimiento longitudinal. Además, hay que considerar el equipo de aspiración del polvo y viruta, cuando se trabaja en seco y el grupo de refrigeración.

Existen dos fórmulas constructivas, si se considera la distribución de movimientos que pueden realizar la mesa y el cabezal portamuelas: la primera corresponde a la máquina estudiada anteriormente; la segunda, por el contrario, responde a otro criterio, ya que es el montante el que se desplaza lateralmente para conseguir la cobertura de toda la superficie a rectificar. En otros casos el montante permanece fijo (para ganar en solidez) y es el propio cabezal portamuelas el que se desplaza transversalmente.

15.3.2 Rectificadora cilíndrica universal

La rectificadora cilíndrica universal es una máquina herramienta capacitada para rectificar superficies de revolución de generatrices rectas o curvas, e incluso las superficies planas frontales que las limitan. En consecuencia, con ella se pueden efectuar cilindrados exteriores e interiores; conos interiores y exteriores, de pequeña o gran conicidad; refrentados y superficies de revolución de generatrices curvilíneas, aunque esto requiere el perfilado de la muela con un dispositivo especial, según una plantilla-modelo.

a) Características constructivas

Deben responder a dos exigencias fundamentales: precisión y robustez. Esto se logra a través de una cuidadosa elección de los materiales empleados, un mecanizado muy riguroso de los distintos elementos y un diseño compacto y reforzado de los mismos. Estas son las partes más importantes de la rectificadora universal:

Bancada

Es una caja de fundición cerrada, en forma de T, cuya misión es sostener y guiar los órganos de trabajo. En su parte alargada lleva las guías de la mesa, mecanizadas con gran precisión; son de forma prismática, una para el

deslizamiento del carro del grupo portamuelas, situadas en la parte posterior de la bancada.

En su interior se encuentran los mecanismos de accionamiento de la mesa, el armario eléctrico y, con frecuencia, la central oleohidráulica. Adosado a la bancada por su parte exterior, se halla el equipo de refrigeración que tiene gran importancia en el trabajo de rectificado.

Mesa

Es una pieza de fundición de forma alargada dividida en dos partes. La inferior lleva las guías que coinciden con las de la bancada; la superior puede girar sobre el plano horizontal y es la que lleva las guías para el cabezal portapiezas y la contrapunta. La amplitud del desplazamiento angular puede controlarse por medio de un sector graduado o con mayor precisión por medio del comparador o de bloques-patrón.

La mesa se mueve alternativamente a lo largo de las guías de la bancada.

Cabezal portapiezas

Es un grupo autónomo situado en un extremo de la mesa, cuya misión es la de proporcionar la rotación necesaria a las piezas que se rectifican. Consta de dos partes bien diferenciadas: una plataforma deslizante sobre la mesa y el cabezal propiamente dicho que puede girar sobre aquélla. El cabezal se divide, a su vez, en dos elementos: husillo principal y grupo motor.

El husillo o árbol principal gira con gran precisión montado sobre cojinetes de aleación especial ajustables, para corregir el juego radial. También es frecuente el montaje sobre rodamientos de rodillos. Los esfuerzos axiales son recibidos por rodamientos axiales de bolas.

El extremo anterior del husillo tiene un alojamiento cónico para recibir el utillaje conveniente; también se puede montar un plato liso, magnético o de garras, ya sea de accionamiento manual o neumático. La rotación del husillo se efectúa a través de una transmisión por correa desde el grupo motor; éste puede ser eléctrico o hidrodinámico.

El motor puede ser trifásico, de dos velocidades; en este caso, la variación del número de revoluciones del árbol se consigue con poleas escalonadas. También se emplean los variadores continuos de velocidad ya sean de fricción, de poleas extensibles o electrónicos. En el caso de motores de corriente continua, su

velocidad se regula por un potenciómetro. Cuando se emplea un motor hidráulico opera de modo parecido al motor de corriente continua.

Cabezal portamuelas

El cabezal portamuelas descansa sobre dos carrillos transversales; el inferior desliza sobre la bancada y es accionado por un sistema de tornillo y tuerca que garantiza una posición exacta, con una tolerancia de 0,001 mm. Este carrillo lleva una plataforma sobre la que gira el carrillo superior donde van firmemente sujetas la caja del husillo portamuelas y la placa del motor. Por consiguiente el carrillo superior (con todo el conjunto portamuelas) es orientable y movable a mano, lo cual resulta muy útil en el rectificado de conos de mucha conicidad.

El husillo o árbol portamuelas se apoya en cojinetes ajustables de metal antifricción. En un extremo se instala la muela y en el otro, lo más cerca posible del cojinete, está la polea de arrastre, conectada a la del motor situado en la parte trasera del grupo. La calidad del rectificado depende en gran medida de la precisión de giro de este árbol, lo cual se logra por medio de un juego de funcionamiento muy estrecho y la sujeción firme y perfecto equilibrado de la muela.

Sobre la parte superior de la caja del husillo portamuelas se puede colocar una pinza abatible, que sujeta un husillo para rectificadores interiores, y el motor correspondiente.

El husillo para rectificar interiores es un dispositivo de muy alta precisión compuesto por una camisa cilíndrica de la que sobresale el árbol por ambos extremos. A un lado sostiene la muela y en el otro recibe una polea, movida por el motor a través de una correa plana. Los rodamientos pueden ser de contacto angular y pueden girar con toda la fiabilidad a elevado número de revoluciones, puesto que por el escaso diámetro de la muela, para alcanzar la velocidad de corte necesaria pueden girar en algunos casos hasta las 50.000 r.p.m.

Contrapunta

Es muy parecida a la del torno pero es más pequeña y de funcionamiento más sencillo. Consta de un bloque de fundición dotado de guías que ajustan en la mesa de trabajo, lo que permite colocarlo en la posición requerida y asegurarlo en ella por medio de unos tornillos que presionan una regleta situada en la cara inferior de las guías.

El husillo de la contrapunta ajusta perfectamente en el bloque citado y puede retroceder rápidamente por medio de la palanca. esta facilita el montaje de las piezas entre puntos ya que, al soltar la palanca, el husillo presiona la pieza

colocada, gracias a la acción de un muelle regulable por un botón exterior. Obtenida la fijación entre puntos deseada se bloquea el husillo moviendo la palanca.

b) Movimientos y órganos para el desplazamiento.

Existen dos formas básicas de ejecutar un rectificado: por desplazamiento longitudinal de la mesa y por penetración radial de la muela (plongée). En el primer método la pieza, solidaria con la mesa, se mueve alternativamente y, al término de cada pasada, la muela va avanzando radialmente, para conseguir la penetración necesaria. En el segundo, la muela avanza radialmente de modo continuo mientras la pieza no tiene ningún desplazamiento lateral y solamente gira sobre si misma.

Por otro lado interesa que el avance de aproximación y retroceso, una vez incluido el ciclo de trabajo, sea lo más rápido posible ya que es tiempo no productivo. Además, es preciso tener presente que cuando se llega a la profundidad máxima de rectificado es necesario que la muela esté en contacto con la pieza hasta que las chispas hayan desaparecido, para asegurar, de este modo, la máxima precisión y uniformidad superficial.

El desplazamiento longitudinal de la mesa se logra normalmente por medio de un cilindro oleohidráulico de doble vástago, fijo a la bancada, cuyo émbolo es solidario, a su vez, con dicha mesa. El esquema de la instalación y su funcionamiento es como sigue: el aceite precedente del depósito, impulsado por la bomba, pasa al distribuidor y de ahí al cilindro, lo que provoca el movimiento del émbolo y el desplazamiento de la mesa, como es lógico. Ahora bien, cuando uno de los topes choca con la palanca, que controla el distribuidor, éste cambia la dirección del flujo de aceite, con lo cual se invierte el sentido de avance del émbolo del cilindro.

Se puede inmovilizar la mesa en cualquier punto moviendo únicamente la válvula de tres vías, con lo que el aceite vuelve al depósito sin acceder al cilindro. La velocidad de la mesa se regula sin problemas por mediación de la válvula, que regula el paso de fluido.

El accionamiento hidráulico es más ventajoso que el mecánico por ser más sencillo, flexible y preciso. Únicamente hay que cuidar la estabilidad del fluido y la carencia de burbujas de aire en el aceite, ya que la compresibilidad de aquél acarrearía avances por sacudidas del émbolo, principalmente cuando el movimiento fuera muy lento. Otra ventaja, nada desdeñable, es la seguridad que proporciona la instalación oleohidráulica contra sobrecargas en los órganos de trabajo; el aumento de la presión del aceite provocaría la apertura de la válvula de seguridad y, en consecuencia, el escape de aceite al depósito.

No obstante, la mesa se puede mover manualmente por medio de un mecanismo de cremallera y piñón. La cremallera se instala en la cara inferior de la mesa y el piñón, que engrasa con ella, es movido por el operario con un volante exterior, a través de un tren de ruedas dentadas.

El carro, sobre el que va el grupo portamuelas, tiene dos movimientos de precisión, manual y automático, y otro de acercamiento o alejamiento rápidos. El movimiento de precisión se verifica por medio de un sistema de husillo y tuerca; el husillo es movido a mano gracias a un volante dotado de una escala graduada que aprecia las milésimas de mm. o bien automáticamente, por medio de un trinquete que abarca un arco rigurosamente constante, aunque regulable a voluntad, que se mueve a cada vaivén de la mesa.

La tuerca en la que rosca el husillo está sujeta al carro del grupo portamuelas, de manera que el movimiento circular del husillo se transforma en rectilíneo de la tuerca.

15.3.3 Rectificadoras sin centros.

Hay numerosas piezas que debido a su tamaño o configuración no es posible rectificarlas con los procedimientos convencionales, ya porque no existe espacio material para la muela, el plato, etc, ya porque no es fácil agarrarlas con los medios de arrastre disponibles o, sencillamente, porque no es rentable su rectificado en la máquina universal. En estos casos suele dar óptimos resultados el rectificado sin centros.

Se emplean dos muelas, una propiamente abrasiva, de gran diámetro O y otra más pequeña C que actúa como muela de arrastre. El eje de giro de esta última está ligeramente inclinado, de forma que tiende a comunicar a la pieza P, apoyada sobre la regla extradura R, un movimiento helicoidal, de rotación y traslación que obliga a presentar toda su cara lateral a la acción de la muela abrasiva.

15.3.3.1 Generación de una superficie cilíndrica de revolución

Si la pieza a rectificar estuviera situada en tal posición que su centro se alineara con los de la muela operadora O y la muela conductora C, su diámetro sería igual a la mínima distancia que separa ambas muelas. En estas condiciones cualquier protuberancia (B) provoca en el extremo expuesto una depresión, puesto que la pieza es empujada contra la muela operadora. El resultado final será un cilindro poligonal (C).

En cambio, si la pieza está situada por encima de la línea de centros (D), un saliente cualquiera de la misma no ocasionará el esmerilado del punto diametralmente opuesto, porque la zona de trabajo instantánea está mucho más baja; por el contrario, el saliente citado será eliminado al pasar por la zona de esmerilado (E).

Cuando una depresión toca la muela de arrastre o la regla de apoyo, se produce un descenso automático de la pieza hacia la parte más estrecha del canal (F) y las elevaciones son eliminadas por la muela abrasiva.

De esta forma, gracias al ascenso y descenso del centro de la pieza, se verifica el autocilindrado de la misma, cuyo ritmo depende de los factores de corte. Cuanto mayor sea la velocidad periférica de la pieza y mayor sea su elevación, tanto más rápidamente se cilindra. Sin embargo, no es posible superar ciertos valores prácticos; así, la elevación no conviene que supere la mitad del diámetro.

15.3.3.2 Rectificado a través y por penetración

Anteriormente se ha dicho que la muela conductora está ligeramente inclinada respecto a la muela operadora; por este motivo la pieza cilíndrica avanza automáticamente en sentido longitudinal, mientras gira sobre si misma. Además, la muela conductora tiene el perfil levemente hiperbólico, reforzando de este modo el contacto con la pieza.

Sin embargo, cuando la pieza posee diámetros escalonados que deben rectificarse, el rectificado a través de la enfilada no es factible. En estos casos se trabaja por penetración.

La muela conductora se coloca en posición prácticamente horizontal; sólo se conserva una pequeña inclinación ($\alpha = 0,5^\circ$) para asegurar que la pieza no se moverá de sitio. Por otra parte, tanto la muela conductora como la muela operadora deben perfilarse de acuerdo con el perfil de la pieza, al igual que la regla de apoyo. Para determinar la posición axial de la pieza y lograr su expulsión, cuando la muela de trabajo ha completado su avance radial, se instala un tope o expulsor, accionado manual o automáticamente.

15.3.3.3 Práctica del rectificado sin centros.

La muela operadora es de naturaleza cerámica y funciona a 25-30 m/s. La muela de arrastre es de resina sintética o de caucho artificial; su velocidad se determina con relación a la de la pieza, de manera que resulte comparable con la relación que se establece en el rectificado cilíndrico.

El avance a de la pieza en sentido longitudinal es función del ángulo α de inclinación de la muela de arrastre; o sea:

$$a = \pi \cdot D_c \cdot n_c \cdot \text{sen} \alpha (\text{mm} / \text{min})$$

siendo:

D_c = diámetro de la muela conductora en mm

n_c = número de revoluciones por minuto de la muela conductora.

El avance axial lento favorece el cilindro, mientras que el avance rápido de apoyo, cuyo bisel no será inexistente ni demasiado pronunciado.

El material sobrante no se elimina de una sola pasada. En el desbaste puede llegarse a una penetración de 0,2 mm para reducir a 0,02 mm en el acabado; si deben obtenerse calidades muy elevadas, los últimos 0,05 mm deben rebajarse en tres pasadas, seguidas de algunas pasadas sin penetración.

15.3.3.4 Características de las rectificadora sin centros

Son rectificadoras preparadas para realizar el rectificado sin centros en sus diversas modalidades.

Constan de una sólida bancada, provista de dos cabezales móviles, montados sobre carros, que contienen las dos muelas conocidas. La regla de apoyo R va atornillada sobre un carrillo independiente.

Cada muela lleva un sistema de repasar adosada que actúa automáticamente, movido por un mecanismo hidráulico.

La rectificadora sin centros es una máquina que puede automatizarse sin demasiados problemas. Para ello debe adaptársele un cargador de piezas que suministre regularmente a la máquina y un sistema de evacuación que, cuando se rectifica a través, no es necesario porque aquella se realiza por gravedad.

La entrega de las piezas debe efectuarse con gran exactitud porque, de lo contrario, las formas obtenidas no serán cilíndricas.

15.3.4 Rectificado planetario

Las piezas que contienen orificios y que por su forma o dimensiones no pueden girar sobre sí mismas (bloques, moldes, placas matrices, etc.), se rectifican en

máquinas de husillo vertical, cuya muela experimenta, además de la rotación propia, un movimiento de traslación circular planetario.

También se emplean con frecuencia cabezales planetarios autónomos que se pueden acoplar a fresadoras de torreta, punteadoras, etc. Están provistos de una turbina neumática o de un grupo eléctrico de alta frecuencia para hacer girar la muela y de un dispositivo de excentricidad regulable que proporciona el movimiento planetario.

15.3.5 Rectificadoras especiales

Las hay de muy diversos tipos. Podemos citar entre ellas:

- Rectificadora de perfiles, pensada para ejecutar piezas de sección diversa pero generatrices rectas.
- Rectificadora de roscas.
- Rectificadora de ruedas dentadas.
- Rectificadora de levas.
- Rectificadora de cigüeñales.

15.4 Trabajos de rectificado

15.4.1 Trabajos en la rectificadora plana.

En términos generales, el rectificado plano con muela frontal se emplea para el arranque de gran volumen de viruta, especialmente si se trata con herramienta de segmentos, cuando las exigencias de calidad y precisión no son muy elevadas. El rectificado plano con muela tangencial es más adecuado para trabajos de la máxima responsabilidad; por el contrario, su rendimiento es muy inferior.

15.4.1.1 Rectificado plano con muela frontal

Es muy adecuado para rectificar piezas planas, de forma prismática y grandes salidas de muela.

La pieza se fija ordinariamente en el plato magnético aunque pueden emplearse otros sistemas (mordaza, bridas, utillajes, etc). La cara de apoyo debe estar bien plana o de lo contrario la adherencia sería imperfecta y podrían producirse accidentes.

Cuando la pieza es delgada se deben extremar las precauciones para asegurar que se adapta al plato en todos sus puntos (puede estar doblada). También se acostumbra a proteger las piezas muy delgadas con pletinas de acero de menor espesor que hacen tope lateral con aquéllas. Asimismo, se pueden rodear las piezas muy delgadas de un barrillo aglutinante, fuertemente mezclado con virutas metálicas, para que las líneas de flujo magnético no resulten debilitadas o interrumpidas.

Una vez que la pieza está bien sujeta, se sitúan los topes móviles que delimitan el recorrido de la mesa, procurando que la muela tenga las salidas necesarias, y se acerca el cabezal a la pieza. Cuando la muela roce levemente la pieza instante que se aprecia con seguridad porque aparecen algunas chispas, se mueve el volante que controla la profundidad de pasada o se conecta ésta para que funciones automáticamente.

El avance vertical se controla por medio de un reloj comparador, puesto a cero al dar la primera pasada, o bien con un aparato de control permanente, también puede controlarse con ayuda del tambor graduado o por la intervención de un tope regulable que desembraga el sistema de avance cuando se llega a un punto determinado previamente.

Cuando deban rectificarse piezas de pequeñas dimensiones, nunca se colocarán en el plato de manera discontinua sino apoyadas unas con otras y de forma que la muela quede siempre bien apoyada. La última disposición, además de ofrecer una longitud de pasada menos, resiste con mayor eficacia la entrada de la muela y presenta una superficie sin discontinuidades, lo que repercute en una mayor duración de la muela y en una precisión, ya que la muela no pisa el borde de la pieza.

15.4.1.2 Rectificado plano con muela tangencial

El rectificado plano con muela frontal proporciona, evidentemente, una gran zona de contacto entre la muela y la pieza y con ello se consigue un elevado rendimiento en el arranque de viruta.

Las muelas que trabajan tangencialmente tienen, por el contrario, un contacto mínimo con la pieza, reducido en teoría a una línea. Por esta razón, su rendimiento es mucho menor, pero permiten alcanzar una exactitud superior en las medidas y una figura superficial extraordinaria.

Las muelas que se emplean normalmente son planocilíndricas. Como su anchura es casi siempre menor que la de la superficie a planear, la forma habitual de trabajo es la de dar pasadas longitudinales paralelas. La muela realiza una pasada a lo

largo de la pieza (en realidad es ésta la que se mueve) cubriendo una longitud igual a la de la pieza más unos márgenes de entrada y salida; a continuación, gracias a un desplazamiento transversal de la mesa, no superior al ancho de la muela, se rectifica otra franja paralela a la anterior.

La forma habitual es con un plato magnético. En este caso, es válido lo dicho para la rectificadora plana frontal.

Se puede realizar también el rectificado de perfiles diversos. Se trata de piezas de forma variada cuyas generatrices son rectas y cuya sección normal puede presentar un perfil cualquiera.

El perfil a rectificar se reproduce en una plantilla de material resistente, normalmente acero, a una escala de ampliación para que los posibles errores apenas se manifiesten en la muela. La plantilla se coloca en el aparato perfilador (diaform) y éste reproduce en la periferia de la muela el perfil correspondiente.

15.4.2 El trabajo en la rectificadora universal

Los trabajos típicos de la rectificadora universal son el rectificado cilíndrico exterior e interior, la ejecución de conos exteriores e interiores y, eventualmente, el rectificado de superficies planas frontales.

15.4.2.1 Fijación de las piezas

La fijación de las piezas es una cuestión clave para obtener óptimos resultados. La determinación de los medios más convenientes la condiciona la forma de la pieza y la clase de rectificado que se pretenda llevar a cabo. Se puede decir que la fijación se realiza según tres procedimientos principales: al aire, entre puntos y mixto.

Al aire

Suelen ser piezas de poca longitud, cilíndricas o con alguna parte cónica. Deben tener una zona que no se rectifique para que puedan acoplarse los órganos de sujeción.

El dispositivo más usado es el plato universal de garras autocentrantes, las cuales pueden moverse manualmente o por medio de un sistema neumático. Además, tiene la ventaja de que sus garras normales pueden sustituirse por otras blandas para no perjudicar una superficie ya rectificada.

También se emplean los platos lisos con bridas y las pinzas, idénticas a las de torno para pequeños diámetros.

Entre puntos

Es el sistema habitual para el rectificado de ejes y árboles. Permite acabados de gran precisión, si los puntos están bien ejecutados ya que así no se transmiten a la pieza los juegos de montaje.

No conviene que el contrapunto sea rígido sino que es preferible que disponga de un sistema de amortiguación (de hecho lo lleva la casi totalidad de las rectificadoras).

Sistema mixto

Por medio del cabezal y la contrapunta, o bien, si el rectificado es interior, con el plato universal y una luneta de apoyo.

15.4.2.2 Rectificado cilíndrico al aire

La pieza se sujeta normalmente con el plato universal. Conviene centrar la pieza, aunque sea sin rigor excesivo, para facilitar el rectificado, especialmente si las demasías de material son escasas.

La muela debe tener salida fácil, siempre que se pueda y, en caso contrario, se ha de prever una entalla o salida de muela de dimensiones normalizadas.

Una vez regulados los topes de inversión del movimiento de la mesa, se acerca la muela a la pieza hasta que aparezcan pequeñas chispas; en este momento, se mide el diámetro a rectificar y se da la primera pasada.

Las pasadas sucesivas se obtienen automáticamente, al igual que la detención de la penetración al llegar a la medida final. Antes de retirar la muela se dan unas pasadas de chispeo para conseguir un acabado perfecto.

La comprobación del diámetro puede realizarse con el pálmer de exteriores sin desmontar la pieza para evitar errores.

15.4.2.3 Rectificado entre puntos

Es preciso que los puntos de la pieza estén bien ejecutados cuando se desea alcanzar gran precisión; por ejemplo, en el caso de los árboles templados, hay que repararlos puntos para eliminar las deformaciones térmicas. Además, los puntos

deben estar perfectamente alineados; una pequeña variación del 1 % puede ser causa de piezas defectuosas, especialmente si éstas son largas.

Las piezas de gran longitud deben apoyarse sobre lunetas para evitar que flexionen por la presión de la muela y resulten de mayor diámetro en el centro. La regla práctica que define el uso de luneta es que la longitud de la pieza no exceda 10 veces al diámetro. La presión que conviene aplicar a los apoyos de la luneta se determina por tanteo y es fruto de la experiencia del operario.

En piezas con chaveteros y extremos acanalados es aconsejable taponar las entallas con madera dura y aumentar también la dureza de la muela. De no tomar esta precaución, es muy fácil que se formen redondeados en los bordes.

15.4.2.4 Rectificado de penetración radial (plongée)

Consiste en una variante del rectificado cilíndrico en la que no existe el avance lateral. La muela penetra radialmente en la pieza hasta alcanzar el diámetro conveniente y, en consecuencia, debe tener la anchura de la banda a rectificar o incluso ser mayor que ella.

Este procedimiento se ha extendido sensiblemente debido a la mejora que produce en los tiempos de producción, porque elimina al vaivén característico de la pieza y la regulación correspondiente.

El rendimiento de la muela es superior porque, al actuar en toda su anchura, hace que trabaje mayor número de granos. Esto obliga a diseñar máquinas más potentes y robustas, capaces de montar muelas de hasta 500 mm de anchura o varias a la vez. Los gorriones de cigüeñales suelen rectificarse en máquinas especiales que trabajan según este sistema. Para trabajar con muela perfilada también se trabaja por penetración

15.4.2.5 Rectificado cilíndrico interior

Aunque la rectificadora cilíndrica universal realiza con mayor soltura rectificados exteriores, mediante el empleo del aparato de rectificar interiores, se pueden ejecutar trabajos de esta naturaleza a plena satisfacción. El aparato rectificador citado se instala en el cabezal portamuelas y su funcionamiento es totalmente autónomo.

El problema fundamental del rectificado interior suele ser la elección de la muela. Conviene respetar al máximo la norma general sobre el abrasivo, empleando carburo de silicio para fundición, latón, aluminio, etc., y corindón para acero. Hay

que usar un tamaño de grano medio, grado medio o blando y aglomerante cerámico de estructura media.

Las velocidades de trabajo son muy superiores a las empleadas en el rectificado exterior, sin que exista peligro de sobrepasar la velocidad de corte.

La muela normalmente es cilíndrica; es preciso afilarla con frecuencia para compensar el desgaste que sufre debido a la poca cantidad de abrasivo que actúa. Siempre que se pueda se empleara refrigeración.

La pieza se monta en el plato de garras o en platos especiales. Para centrar ruedas dentadas se sujetan por su diámetro primitivo lo que asegura un rectificado concéntrico del agujero, circunstancia ésta muy valiosa para el funcionamiento correcto del engranaje. En muchos casos, el rectificado cilíndrico interior se usa como referencia de los rectificados exteriores que debe sufrir la pieza; entonces se monta aquélla en un mandril al aire.

La pieza montada en el plato de garras debe sujetarse con cuidado, especialmente si sus paredes son delgadas, para no deformarla lo más mínimo. Si esto no se puede evitar, hay que cambiar el sistema de fijación, apretando las piezas frontalmente en lugar de hacerlo radialmente.

El centrado de la pieza se lleva a cabo con un reloj comparador de palpador horizontal, que permite explotar los diámetros de entrada y de fondo y el cabeceo que pueda tener la pieza.

La muela debe tener salida fácil por ambos lados de la pieza. Si el orificio es libre, suelen ser suficientes unos cinco o seis milímetros; si no hay salida, debe proyectarse una entalladura interior de la anchura adecuada.

Cuando el orificio a rectificar tenga ranuras circulares o chaveteros conviene escoger una muela algo más dura de lo normal y de grano medio; su anchura debe ser superior a las ranuras existentes.

15.5 Factores de corte en el rectificado

Los factores de corte en el mecanizado con abrasivos que se van a considerar serán: la velocidad de la muela, la profundidad de pasada o penetración y el avance o velocidad de alimentación.

15.5.1 Velocidad tangencial de la muela

Existe una limitación inicial de velocidad que no depende de las condiciones de trabajo sino de la naturaleza del aglomerante y que es preciso respetar rigurosamente.

Además, existen las limitaciones propias de cada trabajo (material, dimensiones de la muela y de la pieza, tipo de rectificado, refrigeración, etc) que es muy difícil evaluar con exactitud.

Por todo ello, los datos teóricos que proporcionan los formularios y los propios constructores de las máquinas no deben tomarse como valores absolutos sino orientativos y, en consecuencia, deben ser verificados y corregidos por las experiencias prácticas.

La velocidad de la muela se expresa en m/s y se calcula por la fórmula ya conocida:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60.000}$$

Para la elección de la velocidad adecuada, se pueden dar unos valores orientativos que servirán de base para establecer la velocidad periférica de una muela. Una vez hallada la velocidad tangencial de la muela se calcula la velocidad de giro, función del diámetro de muela disponible, y se emplea la velocidad de giro del cabezal más próxima a los resultados del cálculo.

Para ello puede emplearse un nomograma. Si la velocidad de la corte debe ser de 25 m/s y el diámetro de la muela es de 150 mm, al trazar una paralela al eje de abscisas que corte la recta inclinada de 150, se obtiene la velocidad de giro en r.p.m. bajando una perpendicular a dicho eje por el punto de intersección; en este caso, el resultado es de 3.180 r.p.m. Si la máquina dispone como valor inferior más próximo el de 3.000 r.p.m., ésta sería la velocidad adoptada.

15.5.2 Velocidad de rotación de la pieza

En el rectificado cilíndrico, además de la velocidad periférica de la muela hay que considerar la velocidad periférica de la pieza. Esta se calcula de modo idéntico al de la muela, pero expresando el resultado en m/min.

La velocidad de la pieza no tiene influencia decisiva en el esmerilado porque lo que cuenta en realidad es la relación entre las velocidades de la piezas y de la muela. En efecto, la relación de velocidades existente, junto con la penetración, determina la longitud y el espesor de la viruta cortada.

Cuando la muela recorre un arco AB, la pieza gira un arco más corto CB. La forma de la viruta obtenida es aproximadamente la de ABC y será tanto más pequeña

cuanto mayor sea la velocidad de la muela y menor la de la pieza. Como es lógico, esta última no debe descender por debajo de cierto valor, porque entonces el rendimiento de la operación sería casi nulo.

15.5.3 Profundidad de pasada

Generalmente, el sobrante de material no se elimina de una sola pasada. Para obtener la máxima calidad superficial y eliminar los errores que se producen por flexión de los órganos mecánicos, el rectificado se efectúa en dos etapas: el desbaste y el acabado, complementado éste con algunas pasadas sin penetración, hasta que finalice la proyección de chispas.

Los valores que se recomiendan para el rectificado cilíndrico exterior están contenidos en tablas. Para el rectificado cilíndrico interior los valores deben ser menores y oscilan entre 0,002 y 0,01 mm. En el rectificado plano pueden variar entre 0,01 y 0,2 mm.

15.5.4 Avance longitudinal

El avance longitudinal en el rectificado cilíndrico o velocidad de traslación de la mesa suele expresarse con relación al ancho de la muela.

De este modo se llega a los siguientes valores de la pieza:

- Desbaste. De $1/2$ a $4/5$ del ancho (mm).
- Acabado. De $1/10$ a $1/4$ del ancho (mm).

En el rectificado cilíndrico interior conviene aumentar estos datos en una tercera parte e incluso más cuando se trate de muelas muy pequeñas, al mismo tiempo que se reduce al mínimo la profundidad de pasada.

La velocidad de la mesa en el rectificado plano se indica en m/min.

15.5.5 Elección de la muela

La elección del tipo de muela (forma y dimensiones) viene impuesto casi siempre por el tipo de rectificado, el equipo disponible y las dimensiones de la pieza.

Las especificaciones de la misma (abrasivo, grano, estructura, etc), son de elección mucho más compleja porque son muy numerosos los factores que intervienen.

De todas formas, teniendo presentes las indicaciones que figuran en el tema anterior, se pueden determinar con suficiente aproximación las características más importantes de las muelas para trabajos corrientes de rectificado.

15.5.6 Influencia del refrigerante

Durante el esmerilado se produce la proyección de partículas metálicas al rojo. La pieza mecanizada no alcanza estas temperaturas, pero sí que llega a alcanzar temperaturas locales de 400-500 °C. Para evitar problemas, producidos por el calor generado (tensiones internas, deformaciones, efectos de revenido, etc.) es conveniente emplear un refrigerante líquido que lo absorba.

El empleo de refrigerante tiene efectos limpiadores sobre la muelas, de modo que los poros tienen tendencia a taponarse menos. Además, influye sobre la precisión de las piezas, al evitar los efectos de la dilatación.

La refrigeración debe ser abundante, continua y aplicada en la zona de contacto entre la pieza y la muela. Cuanto mayor sea ésta, la cantidad de refrigerante deberá crecer en la misma proporción. Por eso, en el rectificado plano frontal, la refrigeración debe ser más intensa que en el rectificado plano tangencial, por ejemplo. También debe aumentar cuando crezca la velocidad de giro de la muela.

Una precaución importante a tener es la de no conectar de improviso el refrigerante, si se ha trabajado en seco durante cierto tiempo, puesto que el impacto del chorro de refrigerante sobre la superficie caliente de la pieza puede ocasionar grietas, especialmente en aceros tratados.

Cuando se emplee muela porosa con refrigerante, conviene eliminar el líquido acumulado en la parte inferior de la muela después de un reposo prolongado, porque origina el desequilibrado de la misma. El líquido se expulsa haciendo girar la muela en vacío durante unos minutos, antes de empezar de nuevo el trabajo.

El producto más empleado es la taladrina (aceite soluble en agua) porque cubre todo el rectificado de los aceros. Para bronce y aluminio da muy buenos resultados una mezcla de trementina y tetracloruro de carbono por su gran poder limpiador, que impide el taponamiento de los poros de la muela.

La fundición se rectifica, con frecuencia, en seco, al igual que los trabajos interiores en agujeros de poco diámetro; en estos casos conviene emplear presiones de esmerilado muy bajas para evitar calentamientos excesivos y un sistema de aspiración de polvos.

15.5.7 Soluciones a problemas del rectificado

15.5.7.1 Facetas

Son franjas regulares que corresponden a defectos superficiales producidos por la variación periódica de la distancia entre la muela y la pieza que se rectifica, ya sea por causa de vibraciones, ya sea por otros motivos.

Estas franjas son más o menos visibles por reflexión de la luz, pero en ciertas ocasiones, el rectificado es tan defectuoso que pueden medirse con facilidad. Para evitarlas hay que usar muelas bien equilibradas; emplear avances adecuados; efectuar fijaciones seguras de las piezas y recurrir a lunetas de apoyo cuando las piezas sean largas y de poco diámetro.

15.5.7.2 Estrías

Son marcas irregulares que aparecen en las superficies rectificadas, debidas a granos irregulares; avance excesivo; refrigerante sucio con partículas en suspensión, etc. Se evitan con el empleo de grano adecuado; rectificando correctamente la muela; mediante un avance adecuado y uso de un refrigerante en perfectas condiciones.

15.6 Tiempos de rectificado

El tiempo teórico de rectificado viene condicionado, en primer lugar, por el tipo de rectificado.

15.6.1 Tiempo de rectificado cilíndrico

Como se trata de un movimiento rectilíneo uniforme, la ecuación del tiempo de rectificado será, al igual que en los casos siguientes, del tipo $t = e/v$.

El espacio recorrido será igual a la longitud de la pieza más las posibles entradas y salidas de muela que, ordinariamente, se hacen iguales a la mitad del espesor de la muela. En todo caso, la longitud total es L .

La velocidad de la mesa v_m será igual al producto del avance longitudinal por vuelta a_l y el número de revoluciones por minuto de la pieza n ; o sea:

$$v_m = a_l \cdot n (\text{mm} / \text{min})$$

En consecuencia, el tiempo principal (tiempo real de rectificado) es igual a:

$$t_p = n_0 \frac{L}{V_m}$$

pero, como el número de pasadas n_c es el cociente del espesor radial a eliminar s y la profundidad de pasada p ; o sea:

$$n_c = \frac{s}{p}$$

El tiempo principal valdrá:

$$t_p = \frac{L \cdot s}{V_m \cdot p} (\text{min})$$

Si la muela trabaja solamente en la carrera de ida, el tiempo será doble:

$$t_p = \frac{2 \cdot L \cdot s}{V_m \cdot p} (\text{min})$$

15.6.2 Tiempo de rectificado plano tangencial

En esta ocasión el espacio a recorrer se ve afectado por el desplazamiento transversal a_t necesario para barrer toda la superficie a rectificar.

El recorrido longitudinal L será igual a la longitud de la pieza más la entrada y salida de muela prevista. El recorrido transversal total será B . El número de carreras por cada pasada completa se calcula dividiendo la distancia de pasadas total necesario n_p resulta:

$$n_c = \frac{B}{a_t} \cdot n_p$$

siendo n_c el número total de carreras precisado. Ahora bien, n_p es el cociente del espesor de material a eliminar s y la profundidad de pasada p ; o sea:

$$n_p = \frac{s}{p}$$

de donde

$$n_c = \frac{B \cdot s}{a_t \cdot p}$$

El recorrido total a efectuar será igual al producto del número de carreras n_c por el valor de la longitud de una carrera L .

$$E = L \cdot n_c = L \cdot \frac{B \cdot s}{a_t \cdot p}$$

Finalmente, el tiempo principal t_p será igual a:

$$t_p = \frac{E}{V_m} = \frac{L \cdot B \cdot s}{V_m \cdot a_t \cdot p} \text{ (min)}$$

15.6.3 Tiempo de rectificado plano frontal

Casi nunca existe desplazamiento transversal de la pieza o de la muela porque la anchura de ésta es suficiente para abarcar todo el ancho de la superficie a mecanizar. Por consiguiente, se puede afirmar que:

$$t_p = n_c \frac{L}{V_m}$$

La longitud de la pasada es igual a la longitud de la pieza más el diámetro de la muela y los márgenes de seguridad.

Como se sabe, $n_c = s/p$; luego:

$$t_p = \frac{L \cdot s}{V_m \cdot p} \text{ (min)}$$

15.7 Potencia necesaria en el rectificado

Igual que en otras operaciones de mecanizado por arranque de viruta, la pieza y la muela están sometidas a un esfuerzo total de corte, cuyo componente principal F_c (resistencia al corte) origina en los árboles de la muela y de la pieza momentos de torsión, de cuya magnitud depende la potencia consumida por el rectificado.

La potencia necesaria para mover la muela es igual a:

$$N = \frac{F_c \cdot v}{75 \cdot \mu}$$

siendo:

N = potencia necesaria en CV

F_c = fuerza de corte en Kgf

v = Velocidad de la muela en m/s

μ = rendimiento del motor (0,8 - 0,85)

La potencia necesaria para mover la pieza es mucho menor porque la velocidad de la misma es muy inferior a la de la muela. Por consiguiente, siempre se emplea la expresión anterior en los cálculos de potencia.

16. PROCESOS ESPECIALES DE ACABADO

Cuando se pretende lograr las tolerancias dimensionales más estrechas (ISO IT-1 a IT-4), así como calidades superficiales del orden de $0.02 \mu\text{m}$, es preciso emplear procesos especiales de superacabado.

Las máquinas destinadas a estos trabajos se han ideado para mejorar el acabado superficial y, en algunos casos, para dar un mayor brillo o mayor presentación.

Se distinguen así máquinas de dos tipos:

- Máquinas acabadoras, propiamente dichas, que suprimen las rugosidades que quedan del rectificado. Dentro de este grupo están la bruñidora, la superacabadora y la lapeadora.
- Máquinas abrillantadoras, que solamente dan brillo, como es el caso de las pulidoras.

16.1 Bruñido

La bruñidora es una máquina parecida a una mandrinadora vertical, provista de una bancada, un montante y un cabezal de uno o varios husillos. El husillo, de funcionamiento hidráulico, lleva acoplada una herramienta abrasiva, cuya apariencia recuerda los mandriles extensibles.

La cabeza de dicho mandril tiene un manguito ranurado, donde se aloja una serie de piedras abrasivas (corindón, carburo de silicio y a veces diamante) de forma rectangular. Por efecto de un vástago con asientos cónicos, que actúan sobre unas varillas radiales, los órganos abrasivos del mandril pueden desplazarse hacia el exterior, presionando las paredes del orificio que se repasa.

Esta herramienta puede ajustarse con precisión, de modo que al llegar a un diámetro determinado, un anillo de tope impide que las piedras abrasivas continúen su labor. Además, la unión del husillo y el mandril no es rígida sino flotante para que no haya ningún problema de desalineación y la herramienta siga exactamente la dirección del eje del orificio.

La velocidad periférica de trabajo es de 0.2 a 0.5 m/s y el movimiento axial de avance debe oscilar entre 12 y 30 m/min.

Pueden someterse a la operación de bruñido diversos materiales como la fundición, el acero templado o sin templar, el metal duro, las aleaciones ligeras, etc. La forma de las superficies suele ser circular e interior (orificios).

Un trabajo de bruñido característico es el repasado de los cilindros de los bloques de motores de explosión. Las máquinas que lo ejecutan son de funcionamiento automático y tienen varios husillos, cuya distancia entre centros puede regularse con exactitud.

16.2 Superacabado

El método de superacabado (superfinish) se basa en la acción repasadora de un cuerpo abrasivo que vibra impulsado por un órgano neumático con amplitud de 1 a 6 mm y a $1.500 \div 3.000$ ciclos por minuto, mientras la pieza gira sobre sí misma.

Debido a la alta velocidad de trabajo, se consigue eliminar en poco tiempo los defectos superficiales y geométricos, llegándose fácilmente a un acabado especular ($R_a = 0,05 \mu\text{m}$). El espesor del material que se quita con el superacabado es de 1 a 10 micras.

La piedra abrasiva se apoya sobre la superficie de la pieza, generalmente cilíndrica, con una débil presión de unos 2 Kg/cm^2 , mientras la pieza gira con velocidad periférica de unos 20 m/min.

Como refrigerante se emplea una mezcla de 80% de petróleo y 20% de aceite, o, simplemente, agua.

Las máquinas de superacabado son similares a las rectificadoras cilíndricas de exteriores en las que se ha sustituido el carro portamuelas por un carro portapiedras, que obliga a apoyar éstas sobre el eje y le da al útil de superacabado su movimiento oscilatorio de cadencia y amplitud adecuadas.

El procedimiento puede aplicarse también acoplando varios cabezales vibradores en un torno o máquina similar.

Generalmente el superacabado se realiza con piezas sujetas entre puntas, pero también puede realizarse sin centros, con piezas apoyadas en rodillos, y de cilindros interiores, utilizando rectificadoras cilíndricas de interiores.

16.3 Lapeado

En el lapeado se interpone polvo abrasivo entre las piezas y las herramientas que efectúan la presión, mientras se someten a movimientos rotativos y a cambios continuos de dirección.

Puede efectuarse a mano o a máquina. La lapeadora es una especie de rectificadora frontal provista de dos discos concéntricos y una jaula intermedia que

contiene las piezas. Los discos tienen movimientos rotativos independientes y el superior puede acercarse o alejarse a voluntad. La jaula de las piezas es un disco de chapa con diversos alojamientos donde se introducen aquellas, conservando una inclinación con respecto al diámetro del disco.

El polvo abrasivo es extraordinariamente fino, y es introducido a cierta presión mezclado con petróleo al que se adiciona aceite de trementina o taladrina.

16.4 Pulido

El pulido es una operación consistente en abrillantar una superficie metálica por medio de abrasivos montados en soportes blandos. Los abrasivos utilizados son: el rojo de Inglaterra, el verde cromo, etc. Según sean los soportes, se pueden distinguir dos métodos:

- el pulido con discos.
- el pulido con banda.

El pulido con discos se realiza utilizando discos de fieltro o de tela impregnadas con la sustancia abrasiva y que se montan de una manera similar a las muelas en las rectificadoras. También se utilizan en máquinas portátiles.

La operación se realiza girando los discos a gran velocidad, con velocidades periféricas de unos 50 m/s, que se consiguen con discos de 300 a 500 mm de diámetro montados en ejes de motores que giran de 1.500 a 3.000 r.p.m.

El pulido con banda abrasiva se realiza con bandas sinfín que giran entre dos poleas de ejes paralelos. La pieza a pulir se apoya sobre la cara exterior de la banda, que va impregnada con el abrasivo. En general, éstas máquinas se utilizan para el pulido de superficies planas.

El pulido prácticamente no quita material pues sólo tiene por objeto hacer desaparecer las ligeras marcas que todavía queden en las piezas y darles brillo especular.